



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

«Βαθμονόμηση Αναλογικών Μηχανών Αεροφωτογράφησης
με τη Χρήση Πεδίου Ελέγχου»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Δ. ΕΥΝΟΓΑΛΑΣ
Οκτώβριος 2010

Στη σύζυγό μου Ασημένια
και στους γονείς μου Δημήτρη & Παναγιώτα...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βαθμονόμηση ή διακρίβωση ή ο έλεγχος των αναλογικών μηχανών αεροφωτογράφησης, δηλαδή ο προσδιορισμός της σταθεράς c της μηχανής, της θέσης του πρωτεύοντος σημείου (x_0, y_0) και της ακτινικής διαστρόφης Δr , με την εφαρμογή ενός συνόλου μετρητικών και υπολογιστικών διαδικασιών. Τα στοιχεία αυτά, αποτελούν τον εσωτερικό προσανατολισμό των μηχανών, ο ακριβής προσδιορισμός των οποίων, τις καθιστά αξιόπιστες στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές ακριβείας, που είναι το βασικό χαρακτηριστικό και πλεονέκτημα της φωτογραμμετρίας.

Για το σκοπό αυτό ιδρύθηκε επίγειο πεδίο ελέγχου έκτασης 24 km^2 , αποτελούμενο από 86 φωτοσταθερά σημεία, βάσει των προτύπων αντίστοιχων πεδίων ελέγχου χωρών του εξωτερικού. Τα σημεία αυτά μετρήθηκαν με *GPS* και στη συνέχεια η περιοχή του πεδίου φωτογραφήθηκε σε κλίμακα 1:5.000 με την αναλογική μηχανή *RMK TOP15* της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ).

Στις μετέπειτα σαρωμένες αυτές φωτογραφίες, εντοπίστηκαν και μετρήθηκαν τα φωτοσταθερά και με την χρήση κατάλληλου λογισμικού (*LPS/ERDAS, BINGO-F, DGAP*) έγινε η συσχέτιση των εικονοσυντεταγμένων των σημείων με τις αντίστοιχες γεωδαιτικές τους, μέσω των φωτογραμμετρικών εξισώσεων, για να προκύψουν τελικά σε μια ενιαία λύση με αυτοβαθμονόμηση με τη μέθοδο συνόρθωσης με δέσμες, τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού.

ABSTRACT

Aim of the present diploma thesis is the calibration of analogue aerial cameras that is the determination of the calibrated principal distance c , the coordinates of the principal point of the camera (x_0, y_0) and the radial distortion Δr with the help of suitably applying a set of mensuration and calculating procedures. These elements also determine the interior orientation of the cameras. Their accurate knowledge makes the use of the cameras reliable for accurate photogrammetric works, which is the main feature and advantage of photogrammetry.

For this purpose a terrestrial test field covering 24 Km² was established consisting of 86 Ground Control Points (GCP), pre-marked with permanent targets, according to the patterns-models of similar test fields abroad. These points were measured by GPS and afterwards the test field was photographed at a scale of 1:5000 with the analogue aerial camera RMK TOP15 of the Hellenic Military Geographical Service (HMGS).

The GCP were localized and measured on the scanned photographs and with the use of proper software (LPS/ERDAS, BINGO-F, DGAP), the image coordinates were correlated to the points with their geodetic coordinates through well known geometric equations. The adjustment was performed through a unique solution with the method of bundle block adjustment with additional parameters including self- calibration.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που πραγματεύεται τη βαθμονόμηση αναλογικών μηχανών αεροφωτογράφισης ανέλαβε, ο καθηγητής του Ε.Μ.Π. κ. Γεωργόπουλος Ανδρέας, στον οποίο οφείλονται ευχαριστίες για την καθοδήγησή του, αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε τόσο στο πρόσωπό μου, όσο και στους δυο συναδέλφους, που από κοινού εργαστήκαμε για να φέρουμε εις πέρας το θέμα που μας ανατέθηκε.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω την αναφορά στην πολύτιμη συνδρομή και των δυο άλλων καθηγητών του εργαστηρίου και μελών της επιτροπής: κ. Καρρά Γεώργιου και κ. Ιωαννίδη Χαράλαμπου, που από την πρώτη στιγμή στάθηκαν δίπλα μου με τις συμβουλές τους, την παροχή εκπαιδευτικού υλικού και την επίλυση των προβλημάτων που συναντούσα, καθώς επίσης και του καθηγητή κ. Δεληκαράογλου Δημήτρη, που μας καθοδήγησε σε ό,τι χρειαστήκαμε σχετικά με τις γεωδαιτικές μετρήσεις με *GPS*.

Ευχαριστίες οφείλονται, για τη συνεργασία και υπομονή τους, στους δυο φίλους-συναδέλφους και συμφοιτητές, που από κοινού ολοκληρώσαμε το όλο εγχείρημα: Φιλιόπουλο Ιωάννη και Παπαδόπουλο Νέστορα, στις διπλωματικές των οποίων παρουσιάζονται οι διαδικασίες ίδρυσης και μέτρησης του πεδίου ελέγχου και βαθμονόμησης των ψηφιακών μηχανών αντίστοιχα.

Ευχαριστώ τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ), τόσο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να φοιτήσω στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, όσο και για τη βοήθεια που μου παρείχε στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, η οποία προσωποποιείται σε συγκεκριμένα άτομα, με κύριους συντελεστές τους υπεύθυνους για την εκτέλεση της πτήσης και συγκεκριμένα τον κ. Παππά Αλέξανδρο. Επίσης ευχαριστώ οποιονδήποτε άλλο συνάδελφο, που συνέβαλε τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου με τις πολύτιμες συμβουλές του.

Η παρούσα διπλωματική, δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την συνδρομή της εταιρείας *Geomatics*, που παρείχε τα υλικά μέσα για την κατασκευή του πεδίου ελέγχου, καθώς και την παραχώρησή του για φωτογράφιση από την ΓΥΣ.

Τέλος σε αναφορά, αλλά πρώτα απ' όλα σε προτεραιότητα, ευχαριστώ το Θεό που με έχει αξιώσει με υγεία να πραγματοποιώ τους στόχους μου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Σκοπός Εργασίας	2
1.3 Δομή Εργασίας	2
2. ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ	4
2.1 Χαρακτηριστικά Μηχανών Αεροφωτογράφισης.....	4
2.2 Γενικές Προδιαγραφές Μηχανών Αεροφωτογράφισης	5
3. Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	7
3.1 Η Κεντρική Προβολή	7
3.2 Εσωτερικός Προσανατολισμός.....	9
3.2.1 Βασικές παράμετροι εσωτερικού προσανατολισμού.....	9
3.2.2 Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού.....	10
3.3 Ο Φωτογραφικός Φακός.....	12
3.3.1 Πορεία ακτίνων σε λεπτό φακό	12
3.3.2 Πορεία ακτίνων σε σύστημα φακών.....	13
3.4 Σφάλματα Φακών - Υποβάθμιση Οπτικής Ποιότητας	15
3.5 Σφάλματα Φακών - Υποβάθμιση γεωμετρικής ακρίβειας.....	15
3.5.1 Συμμετρική Ακτινική διαστρόφη (radial distortion)	15
3.5.2 Κατηγορίες συμμετρικής ακτινικής διαστρόφης.....	17
3.5.3 Μοντελοποίηση συμμετρικής ακτινικής διαστρόφης.....	19
3.5.4 Ασύμμετρη διαστρόφη εκκεντρότητας (decentring distortion).....	22
3.6 Λοιπά Γεωμετρικά Σφάλματα	26
3.7 Μοντελοποίηση Λοιπών Γεωμετρικών Σφαλμάτων	27
3.7.1 Παραμορφώσεις αναλογικών μηχανών	27
3.7.2 Επιλογή επιπρόσθετων παραμέτρων	27
3.7.3 Παραμορφώσεις ψηφιακών μηχανών.....	32
4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ	36
4.1 Έννοια Βαθμονόμησης.....	36
4.2 Ιστορική Αναδρομή	37
4.3 Φορείς Διαπίστευσης.....	39
4.3.1 Γενικές έννοιες.....	39
4.3.2 Η ανάγκη για πρότυπα και προδιαγραφές	40
4.3.3 Οργανισμοί παραγωγής προτύπων (<i>Standards organizations</i>)	41
4.3.4 Εθνικές υπηρεσίες (<i>Federal agencies</i>)	42
4.3.5 Κατασκευαστές.....	44
4.3.6 Ανεξάρτητοι οργανισμοί πιστοποίησης.....	45
4.3.7 Επιστημονικές κοινότητες	45
4.3.8 Ο ευρωπαϊκός οργανισμός European Spatial Data Research (EuroSDR)	45
4.4 Ταξινόμηση Μεθόδων Διακρίβωσης Φωτογραφικών Μηχανών	47
4.5 Οπτική Μέθοδος Βαθμονόμησης	47
4.5.1 Βαθμονόμηση με τη χρήση ευθυγραμμιστών.....	48
4.5.2 Βαθμονόμηση με τη χρήση γωνιομέτρων	52
4.6 Φωτογραφική Μέθοδος	56
4.6.1 Βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με σημεία γνωστών συντεταγμένων	56
4.6.2 Βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με χαρακτηριστικά από το χώρο του αντικειμένου.....	59

4.6.3	Βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με σημεία αγνώστων συντεταγμένων	63
4.6.4	Ταυτόχρονη βαθμονόμηση	63
4.6.5	Αυτοβαθμονόμηση	64
4.6.6	Άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός (DLT)	66
4.6.7	Βαθμονόμηση με την αστρική μέθοδο	69
4.6.8	Ανακατασκευή	70
4.7	Βαθμονόμηση συστήματος (<i>System Calibration</i>)	70
4.8	Η Εξέλιξη στη Βαθμονόμηση Ψηφιακών Μηχανών	72
4.8.1	DSS (Applanix)	74
4.8.2	DMC (ZI-Imaging)	75
4.8.3	Ultracam _D (Vexcel - Microsoft)	84
4.8.4	Leica ADS40	85
4.8.5	DIMAC (Dimac Systems)	88
5.	ΠΕΔΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	89
5.1	Ανασκόπηση Υπαρχόντων Πεδίων Ελέγχου	89
5.1.1	Πεδία Ελέγχου Willunga, Kapunda, Jamijarvi	89
5.1.2	Πεδίο ελέγχου Vaihingen/Enz	91
5.1.3	Πεδίο ελέγχου Fredrikstad	93
5.1.4	Πεδίο ελέγχου Sjöckulla	94
5.1.5	Πεδίο ελέγχου Madison	101
5.1.6	Πεδίο ελέγχου Pavia	102
5.1.7	Πεδίο ελέγχου Gleisdorf	104
5.1.8	Πεδίο ελέγχου Valladolid	105
5.1.9	Πεδίο ελέγχου Franklin Mill	106
5.1.10	Πεδίο ελέγχου Stennis Space Center	107
5.1.11	Πεδίο ελέγχου του Rheidt	110
5.1.12	Λοιπά πεδία ελέγχου	110
5.1.13	Συγκεντρωτικός πίνακας στοιχείων υπαρχόντων πεδίων	111
6.	ΥΛΙΚΟ - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	114
6.1	Φωτογράφιση Πεδίου	114
6.1.1	Βασικά μέρη μηχανών αεροφωτογράφισης – Γενικά	114
6.1.2	Χρησιμοποιούμενη φωτομηχανή	115
6.1.3	Πτητικά μέσα αεροφωτογραφήσεων - Γενικά	118
6.1.4	Χρησιμοποιούμενο πτητικό μέσο	118
6.1.5	Λογισμικό	119
6.2	Επεξεργασία Εικόνων	119
6.2.1	Υλικό σάρωσης	119
6.2.2	Υλικό επεξεργασίας εικόνων	120
6.2.3	Λογισμικό σάρωσης	120
6.2.4	Λογισμικό επεξεργασίας ραδιομετρίας εικόνων	120
6.2.5	Λογισμικό εκτέλεσης προσανατολισμών, μέτρησης συντεταγμένων στο σύστημα της εικόνας και αεροτριγωνισμού	120
6.2.6	Λογισμικό συνόρθωσης	121
7.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	122
7.1	Επιλεγείσα Μέθοδος Βαθμονόμησης	122
7.1.1	Μαθηματικό μοντέλο	122
7.1.2	Ακρίβειες	126
7.1.3	Αξιοπιστία	128

7.2	Πεδίου Ελέγχου	128
7.2.1	Περιοχή.....	128
7.2.2	Τύπος στόχου.....	130
7.2.3	Γεωδαιτικές μετρήσεις.....	132
7.3	Λήψη Α/Φ.....	132
7.3.1	Προετοιμασία πεδίου.....	132
7.3.2	Φωτογράφιση.....	132
7.4	Σάρωση Φίλμ.....	134
7.4.1	Ραδιομετρική ανάλυση.....	134
7.4.2	Χωρική ανάλυση.....	135
7.5	Επεξεργασία Εικόνων – Εφαρμογή LPS-ERDAS.....	136
7.5.1	Δημιουργία νέου έργου (project) και ρύθμιση παραμέτρων.....	136
7.5.2	Εισαγωγή εικόνων και δημιουργία πυραμίδων.....	136
7.5.3	Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού.....	138
7.5.4	Σκόπευση φωτοσταθερών.....	138
7.5.5	Συλλογή σημείων σύνδεσης.....	140
7.5.6	Εκτέλεση αεροτριγωνισμού.....	143
7.5.7	Αποτελέσματα LPS-ERDAS.....	144
7.5.8	Ακρίβειες.....	146
7.6	Εφαρμογή BINGO-F.....	147
7.6.1	Ρυθμίσεις Λειτουργίας.....	147
7.6.2	Επιλογή τιμών παραμέτρων.....	150
7.6.3	Αποτελέσματα.....	154
7.6.4	Ακρίβειες.....	156
7.7	Εφαρμογή DGAP.....	156
7.7.1	Γενικά.....	156
7.7.2	Λειτουργία.....	157
7.7.3	Μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων.....	158
7.7.4	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.....	159
7.7.5	Αποτελέσματα.....	160
7.8	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	162
8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		164
8.1	Γενικά.....	164
8.2	Χρήση LPS.....	164
8.3	Χρήση BINGO-F.....	165
8.4	Χρήση DGAP.....	165
8.5	Αποτελέσματα.....	166
8.6	Προτάσεις.....	166
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		B-1
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Α».....		Π-1
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Β».....		Π-6
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Γ».....		Π-7
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Δ».....		Π-10

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3-1: Το μοντέλο σημειακής οπής για την κάμερα.....	7
Σχήμα 3-2: Κεντρική προβολή σημείου ($P \rightarrow p$) και ευθείας ($D \rightarrow d$) του χώρου.....	8
Σχήμα 3-3: Βασικές παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού.....	9
Σχήμα 3-4: Σωστή και εσφαλμένη ανάπλαση δέσμης ακτίνων.....	9
Σχήμα 3-5: Διόρθωση παραμόρφωσης φιλμ.....	10
Σχήμα 3-6: Διόρθωση πρωτεύοντος σημείου.....	11
Σχήμα 3-7: Διόρθωση ακτινικής διαστροφής.....	11
Σχήμα 3-8: Επίδραση ατμοσφαιρικής διάθλασης.....	11
Σχήμα 3-9: Επίδραση καμπυλότητας γης.....	12
Σχήμα 3-10: Πορεία ακτίνων σε ένα λεπτό φακό.....	12
Σχήμα 3-11: Ιδανική απεικόνιση της γεωμετρικής οπτικής.....	13
Σχήμα 3-12: Ορισμός μαθηματικού κέντρου προβολής.....	14
Σχήμα 3-13: Το ζητούμενο του εσωτερικού προσανατολισμού.....	14
Σχήμα 3-14: Ακτινική διαστρόφη.....	16
Σχήμα 3-15: Επίδραση της ακτινικής διαστρόφης.....	17
Σχήμα 3-16: Ακτινική διαστρόφη.....	17
Σχήμα 3-17: Pincushion distortion.....	18
Σχήμα 3-18: Θετική και αρνητική ακτινική παραμόρφωση.....	18
Σχήμα 3-19: Γκαουσιανή ακτινική διαστρόφη σε διάφορες κλίμακες εικόνας για το φακό Fujinon 25mm, τοποθετημένο σε μηχανή CCD Pulnix.....	19
Σχήμα 3-20: Διαγράμματα «ισοροπημένης» ακτινικής διαστρόφης σε διάφορες κλίμακες εικόνας για το φακό Fujinon 25mm, τοποθετημένο σε μηχανή CCD Pulnix.....	20
Σχήμα 3-21: Διόρθωση ακτινικής διαστρόφης.....	21
Σχήμα 3-22: Απόκλιση από την ευθυγράμμιση των στοιχείων ενός φακού.....	23
Σχήμα 3-23: Ασύμμετρη διαστρόφη εκκεντρότητας.....	23
Σχήμα 3-24: Επίδραση ασύμμετρης διαστρόφης εκκεντρότητας.....	24
Σχήμα 3-25: Γωνία φ_0 εφαπτομενικής διαστρόφης.....	25
Σχήμα 3-26: Εννέα σημεία της εικόνας στα οποία αποκαθίστανται οι συντεταγμένες με το μοντέλο του Ebner.....	30
Σχήμα 3-27: Παράμετροι Ebner και η επίδρασή τους στην φωτογραφία.....	32
Σχήμα 4-1: Διαδικασία εξασφάλισης ποιότητας για τα ψηφιακά εναέρια συστήματα από την USGS.....	43
Σχήμα 4-2: Μέθοδοι βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών.....	47
Σχήμα 4-3: Ορισμός σημείου αυτοευθυγράμμισης.....	48
Σχήμα 4-4: Ομάδα ευθυγραμμιστών (multicollimator system)-1.....	49
Σχήμα 4-5: Αποτύπωση εικόνας ευθυγραμμιστών χωρίς περιστροφή (αριστερά) και με περιστροφή (δεξιά) της μηχανής.....	50
Σχήμα 4-6: Ευθυγράμμιση μηχανής στο σύστημα multicollimator.....	50
Σχήμα 4-7: «Αποτύπωμα» εικόνας καθ' ενός ευθυγραμμιστή στο φωτογραφικό επίπεδο (αναφερόμενα αντίστοιχα στις διατάξεις που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-2:).	51
Σχήμα 4-8: Καμπύλη ακτινικής διαστρόφης.....	52
Σχήμα 4-9: Γωνιόμετρο.....	53
Σχήμα 4-10: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του γωνιομέτρου.....	54
Σχήμα 4-11: Ακτινική διαστρόφη των ημιδιαγωνίων A έως D με αρχή το H_A	54
Σχήμα 4-12: Ορισμός μαθηματικού κέντρου προβολής.....	55
Σχήμα 4-13: Ακτινική διαστρόφη των ημιδιαγωνίων του Σχήματος 4-11 με αναφορά το H_S και η ακτινική διαστρόφη που προκύπτει από αυτές.....	55
Σχήμα 4-14: Μέση ακτινική οπτική διαστρόφη με $ \Delta r_{\max} = \Delta r_{\min} $	56
Σχήμα 4-15: Ορισμός σημείων στο φωτογραφικό επίπεδο.....	56
Σχήμα 4-16: Γεωμετρία υπολογισμών (Field method).....	58
Σχήμα 4-17: Ζεύγος παράλληλων διανυσμάτων στο χώρο του αντικειμένου και το	

παράλληλο προς αυτά διάνυσμα μέσω του προβολικού κέντρου	62
Σχήμα 4-18: Σχέση μηχανής και IMU	64
Σχήμα 4-19: Μετασχηματισμός 2D-3D	67
Σχήμα 4-20: Σύστημα αναφοράς στην αστρική μέθοδο βαθμονόμησης	69
Σχήμα 4-21: Γεωμετρικές σχέσεις της DMC κατά τη διεύθυνση της πτήσης	78
Σχήμα 4-22: Στερεομοντέλο της DMC και μετατόπιση του υψομέτρου	79
Σχήμα 4-23: Εκτροπή dx' και dy' σε σχέση με το h_g και το $\Delta h/h_g$	80
Σχήμα 4-24: σ_0 για τις βαθμονομήσεις του Oberkochen (αριστερά) και της Jena (δεξιά) για διαφορετικούς φακούς	82
Σχήμα 5-1: Τύποι στόχων, χρησιμοποιούμενοι στα πεδία ελέγχου	90
Σχήμα 5-2: Πεδίο ελέγχου Fredrikstad	93
Σχήμα 5-3: Κατανομή GCP στο πεδίο ελέγχου Valladolid	105
Σχήμα 6-1: Σκαρίφημα μιας μετρητικής μηχανής εναέριων λήψεων	114
Σχήμα 7-1: Τύπος στόχου	130
Σχήμα 7-2: Αρχικός προγραμματισμός πτήσης για τη φωτογράφιση του πεδίου ελέγχου με τη μηχανή RMK TOP15 της ΓΥΣ	133
Σχήμα 7-3: Θέση εικόνων φωτογράφισης πεδίου	133
Σχήμα 7-4: Ορισμός του PPS ως αρχή μέτρησης εικονοσυντεταγμένων στο πρόγραμμα BINGO-F	148
Σχήμα 7-5: Ορισμός FC ως αρχή μέτρησης εικονοσυντεταγμένων στο LPS	148
Σχήμα 7-6: Μεταβολή σταθεράς c συναρτήσει sc, x_0, y_0	151
Σχήμα 7-7: Μεταβολή x_0, y_0 συναρτήσει sc, x_0, y_0	152
Σχήμα 7-8: Μεταβολή Test Value στοιχείων μηχανής συναρτήσει sc, x_0, y_0	152
Σχήμα 7-9: Επίδραση συμμετοχής επιπρόσθετων παραμέτρων στα αποτελέσματα βαθμονόμησης	153

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3-1: Κάμερα σημειακής οπής	7
Εικόνα 3-2: Μέτρηση τοπογραφίας αισθητήρα CCD επίγειας ψηφιακής μηχανής – Συνολική «υψομετρική» διαφορά $1.7\mu\text{m}$ και RMS αποχής από την επιπεδότητα $0.3\mu\text{m}$	33
Εικόνα 4-1: Η πυραμίδα συσχετισμού των προτύπων οργάνων	40
Εικόνα 4-2: Ομάδα ευθυγραμμιστών (multicollimator system)-2	49
Εικόνα 4-3: Εικόνα (από πάνω) της βάσης τοποθέτησης της μηχανής	50
Εικόνα 4-4: Γωνιόμετρο του πανεπιστημίου Helsinki	53
Εικόνα 4-5: Εργαστηριακό πεδίο ελέγχου βαθμονόμησης μηχανών ΕΜΠ	59
Εικόνα 4-6: Μεταφερόμενα και μόνιμα πεδία επίγειων μηχανών	59
Εικόνα 4-7: Στοιχεία άμεσης γεωαναφοράς αεροφωτογραφίας	72
Εικόνα 4-8: Φακοί ψηφιακών συστημάτων καταγραφής	73
Εικόνα 4-9: Η DSS σε εξωτερικό σκελετό για τη σταθεροποίηση της θήκης της	74
Εικόνα 4-10: Κλωβός βαθμονόμησης της DSS	74
Εικόνα 4-11: Η DMC της ZI-Imaging και η παγχρωματική της εικόνα	75
Εικόνα 4-12: Συστοιχία φακών της DMC	76
Εικόνα 4-13: Ίχνος των παγχρωματικών λήψεων	76
Εικόνα 4-14: Στοιχεία μέτρησης Jena	81
Εικόνα 4-15: Στοιχεία μέτρησης Oberkochen	81
Εικόνα 4-16: Μετρούμενα σημεία στην κατά Jena βαθμονόμηση	81
Εικόνα 4-17: μετρούμενα σημεία στη βαθμονόμηση του Oberkochen	81
Εικόνα 4-18: Στόχος στην κατά Jena βαθμονόμηση	81
Εικόνα 4-19: Στόχος στην κατά Oberkochen βαθμονόμηση	81
Εικόνα 4-20: Πεδίο ελέγχου του Elchingen	83

Εικόνα 4-21: Η μηχανή Ultracam _D της Vexcel και η αποκτώμενη εικόνα	84
Εικόνα 4-22: Επίγειο πεδίο ελέγχου για βαθμονόμηση της Ultracam _D	85
Εικόνα 4-23: ADS40	86
Εικόνα 4-24: ADS40 σε αεροσκάφος.....	86
Εικόνα 4-25: Η ψηφιακή μηχανή DIMAC	88
Εικόνα 5-1: Απεικόνιση περιοχής	91
Εικόνα 5-2: Ορθοφωτογραφία και σκίαση αναγλύφου περιοχής.....	92
Εικόνα 5-3: Οριοθέτηση συνολικής περιοχής (κόκκινο περίγραμμα) – Πύκνωση σημείων (μωβ περίγραμμα).....	92
Εικόνα 5-4: Χρησιμοποιούμενα επίγεια σημεία.....	92
Εικόνα 5-5: Κινητός στόχος ραδιομετρικής βαθμονόμησης.....	93
Εικόνα 5-6: GCP στο πεδίο Fredrikstad.....	94
Εικόνα 5-7: Τύποι στόχων στο πεδίο ελέγχου Sjöckulla	95
Εικόνα 5-8: Κατανομή σημείων πεδίου Sjöckulla και μοντέλα διαφορετικών κλιμάκων βαθμονόμησης	97
Εικόνα 5-9: Μόνιμοι και κινητοί στόχοι στο πεδίο ελέγχου Sjöckulla.....	97
Εικόνα 5-10: Δείγματα χαλκιών	98
Εικόνα 5-11: Πυκνοί ραβδωτοί στόχοι ανάλυσης.....	99
Εικόνα 5-12: Siemens Star	99
Εικόνα 5-13: Κινητή κλίμακα του γκρι.....	100
Εικόνα 5-14: Μόνιμη κλίμακα του γκρι.....	100
Εικόνα 5-15: Τετραγωνικές περιοχές 15m x 7m.....	100
Εικόνα 5-16: Περιοχή πεδίου ελέγχου Madison.....	101
Εικόνα 5-17: Προετοιμασία στόχων.....	101
Εικόνα 5-18: Περιοχή πεδίου υψηλής πυκνότητας στόχων για βαθμονόμηση ψηφιακών μηχανών.....	102
Εικόνα 5-19: Χωροσταθμικό δίκτυο και δίκτυο GPS του πεδίου ελέγχου Pavia	102
Εικόνα 5-20: Κατανομή AGCP	103
Εικόνα 5-21: Επισήμανση στόχου (κινητή)	103
Εικόνα 5-22: Κατασκευή δοκιμαστικών μεταφερόμενων (αριστερά) και μόνιμων (δεξιά) στόχων διαφορετικού μεγέθους και σχήματος	103
Εικόνα 5-23: Ορατότητα σημείου σε κλίμακες 1:5.000 - 1:8.000 - 1:18.000 από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα	104
Εικόνα 5-24: Κατανομή NGCP.....	104
Εικόνα 5-25: Πεδίο ελέγχου Gleisdorf και κατανομή των GCP	105
Εικόνα 5-26: Χρησιμοποιούμενοι προσημασμένοι στόχοι στο πεδίο ελέγχου Valladoid	105
Εικόνα 5-27: Κατανομή σημείων στο πεδίο ελέγχου Franklin Mill.....	106
Εικόνα 5-28: Παρκινγκ εμπορικού κέντρου.....	106
Εικόνα 5-29: Παρκινγκ εμπορικού κέντρου και επιλογή και μέτρηση σημείων επί αυτού	107
Εικόνα 5-30: Γεωδαιτικοί στόχοι πεδίου SSC.....	108
Εικόνα 5-31: Βαμμένα καλύμματα φρεατίων σαν ευκαιριακοί στόχοι.....	108
Εικόνα 5-32: Κατανομή σημείων στο SSC	108
Εικόνα 5-33: Στόχοι ακμών για χωρικό (αριστερά)-ραδιομετρικό (δεξιά) χαρακτηρισμό του πεδίου SSC	109
Εικόνα 5-34: Δεξαμενή μέτρησης της θερμικής ραδιομετρίας στο SSC V&V.....	109
Εικόνα 5-35: Πεδίο ελέγχου Rheidt	110
Εικόνα 6-1: Η μηχανή RMK TOP15.....	115
Εικόνα 6-2: Σώμα μηχανής RMK TOP15	116
Εικόνα 6-3: Αποθήκη φωτογραφικού υλικού T-MC.....	116
Εικόνα 6-4: Βάση σταθεροποίησης T-AS	117
Εικόνα 6-5: Γωνίες αεροσκάφους, που καλείται να αποκαταστήσει η βάση.....	117
Εικόνα 6-6: Τοποθέτηση μηχανής στο αεροσκάφος.....	117

Εικόνα 6-7: Χρήση Η/Υ κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης.....	118
Εικόνα 6-8: Αεροσκάφος C-12.....	119
Εικόνα 6-9: Φωτογραμμετρικός σαρωτής Leica DSW700.....	120
Εικόνα 7-1: Περιοχή πεδίου ελέγχου.....	129
Εικόνα 7-2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής πεδίου.....	129
Εικόνα 7-3: Φωτογραφική κάλυψη πεδίου ελέγχου.....	130
Εικόνα 7-4: Επιλογή θέσης φωτοσταθερών σημείων.....	130
Εικόνα 7-5: Μόνιμοι στόχοι πεδίου.....	131
Εικόνα 7-6: Προετοιμασία κινητών στόχων.....	131
Εικόνα 7-7: Κατασκευή βάθρων τοποθέτησης μεταφερόμενων στόχων.....	131
Εικόνα 7-8: Μέτρηση με δέκτη Spectra.....	132
Εικόνα 7-9: Μέτρηση με δέκτη Trimble.....	132
Εικόνα 7-10: Τοποθέτηση μεταφερόμενων στόχων στα βάθρα.....	132
Εικόνα 7-11: Τοποθέτηση φιλμ στον σαρωτή DSW700.....	134
Εικόνα 7-12: Αρνητικό επί του σαρωτή με απεικόνιση προγραμματιζόμενων στοιχείων λήψης.....	134
Εικόνα 7-13: Απεικόνιση κέντρου του στόχου σε 3x3 pixel.....	135
Εικόνα 7-14: Πληροφορίες σαρωμένης εικόνας.....	136
Εικόνα 7-15: Εισαγωγή εικόνων στο project.....	137
Εικόνα 7-16: Χειρισμός πυραμίδων εικόνας από το ERDAS.....	137
Εικόνα 7-17: Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού.....	138
Εικόνα 7-18: Σκόπευση φωτοσταθερών και εισαγωγή γεωδαιτικών τους συντεταγμένων.....	139
Εικόνα 7-19: Οριακή εμφάνιση φωτοσταθερών λόγω σκιάς και διερχόμενου οχήματος.....	139
Εικόνα 7-20: Διαφορετική απεικόνιση του ίδιου στόχου σε εικόνες διαφορετικών γραμμών πτήσης.....	139
Εικόνα 7-21: Κατανομή σημείων ελέγχου.....	140
Εικόνα 7-22: Επιλογή τρόπου προσδιορισμού σχετικής θέσης εικόνων.....	141
Εικόνα 7-23: Ρυθμίσεις αυτόματης εξαγωγής σημείων σύνδεσης.....	142
Εικόνα 7-24: Αρχείο image.dat.....	147
Εικόνα 7-25: Εφαρμογή RELAX.....	149
Εικόνα 7-26: Εφαρμογή BINGO-F.....	149
Εικόνα 7-27: Εκκίνηση βοηθητικών προγραμμάτων BINGO-F για οπτικοποίηση αποτελεσμάτων.....	150
Εικόνα 7-28: Επίδραση επιπρόσθετων παραμέτρων (αριστερά: επιλογή grid all, δεξιά: επιλογή grid tang).....	155
Εικόνα 7-29: Καμπύλη συμμετρικής ακτινικής διαστροφής.....	155
Εικόνα 7-30: Εναπομείνουσες παραμορφώσεις εικόνας.....	156

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Οι σπουδαιότεροι τύποι φακών για εναέρια Φωτογραμμετρία (τυπικό μέγεθος αρνητικού 23x23 cm ² , όπου h=ύψος πτήσης από το έδαφος).....	6
Πίνακας 4-1: Κατασκευαστικοί οίκοι αερομηχανών.....	44
Πίνακας 4-2: Εκπαιδευτικά ιδρύματα.....	45
Πίνακας 4-3: Στάδια προγράμματος EuroDAC ²	47
Πίνακας 4-4: Χαρακτηριστικά ψηφιακών συστημάτων καταγραφής.....	73
Πίνακας 4-5: Τεχνικές προδιαγραφές και παράμετροι της διάταξης των παγχρωματικών φακών της DMC.....	76
Πίνακας 4-6: Παράμετροι δοκιμαστικής πτήσης.....	83
Πίνακας 4-7: Πτήση ελέγχου κλίμακας 1:4000.....	83
Πίνακας 4-8: Πτήση ελέγχου κλίμακας 1:5000.....	83

Πίνακας 4-9: Πτήση ελέγχου κλίμακας 1:10000.....	83
Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά πεδίων	90
Πίνακας 5-2: Αριθμός στόχων ανά είδος.....	93
Πίνακας 5-3: Μεγέθη εδαφοψηφίδας των στόχων της Εικόνα 5-7	96
Πίνακας 5-4: Συσχέτιση κλίμακας-φωτοσταθερών-ακρίβειας και είδους στόχων στο πεδίο ελέγχου Sjöckulla	96
Πίνακας 5-5: Χαρακτηριστικά στόχων ανάλυσης.....	99
Πίνακας 5-6: Κύρια χαρακτηριστικά υπαρχόντων πεδίων ελέγχου	113
Πίνακας 6-1: Χαρακτηριστικά αεροσκάφους C-12.....	119
Πίνακας 7-1: Αποτελέσματα βαθμονόμησης LPS/ERDAS	146
Πίνακας 7-2: Αποτελέσματα δοκιμών BINGO-F με μεταβολές τυπικών σφαλμάτων στις τιμές των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού.....	153
Πίνακας 7-3: Επίδραση αριθμού επιπρόσθετων παραμέτρων στα αποτελέσματα της συνόρθωσης δέσμης με αυτοβαθμονόμηση.....	154
Πίνακας 7-4: Παραδείγματα σύνταξης αρχείων εισόδου στο DGAP	158
Πίνακας 7-5: Μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων που ενσωματώνονται στο DGAP	159
Πίνακας 7-6: Αποτελέσματα βαθμονόμησης DGAP.....	160
Πίνακας 7-7: Αποτελέσματα DGAP πολυωνυμικών μοντέλων Ebner-Gruen	160
Πίνακας 7-8: Αποτελέσματα DGAP μοντέλων Australis, Gap, εσωτερικού προσανατολισμού και συνδυασμού εσωτερικού-ακτινικής-εφαπτομενικής διαστροφής	161
Πίνακας 7-9: Αποτελέσματα DGAP μοντέλων Brown και συνδυασμού εσωτερικού προσανατολισμού με επιπλέον τύπους παραμορφώσεων.....	161
Πίνακας 7-10: Σύγκριση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης χωρίς επιπρόσθετες παραμέτρους μεταξύ LPS, BINGO-F και DGAP	162

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εν συντομία οι λόγοι που απαιτούν τη βαθμονόμηση των εναέριων φωτογραφικών μηχανών και οι αιτίες που οδηγούν στη βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου. Αναφέρεται ο σκοπός της διπλωματικής καθώς επίσης και η δομή της εργασίας.

1.1 Γενικά

Βαθμονόμηση ή διακρίβωση ενός οργάνου μέτρησης, είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων, οι οποίες σκοπό έχουν τον εντοπισμό και την εκτίμηση των τιμών των σφαλμάτων του. Έτσι και οι **εναέριες μετρητικές φωτογραφικές μηχανές**, ως όργανα μέτρησης που ουσιαστικά καταγράφουν διευθύνσεις, απαιτείται να βαθμονομούνται για διαφόρους λόγους.

Ο πρώτος και σημαντικότερος είναι να εξακριβωθεί εάν η μηχανή συνεχίζει να λειτουργεί στα επίπεδα ακριβείας για τα οποία σχεδιάστηκε. Αυτό το μέρος της διαδικασίας της βαθμονόμησης, είναι ένας έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν η μηχανή πληροί τα κριτήρια σχεδιασμού της και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή όχι. Η άλλη κλασική λειτουργία της διαδικασίας της βαθμονόμησης, είναι η παροχή στους φωτογραμμέτες των απαραίτητων παραμέτρων, για την αποκατάσταση των συστηματικών αποκλίσεων από την ιδανική κεντρική προβολή. Απ' την άλλη, όταν τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με βασικούς στατιστικούς ελέγχους και στοιχεία του ιστορικού της μηχανής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της σταθερότητας της μηχανής και/ή των αλλοιώσεων που προκαλεί στις εικόνες που καταγράφει.

Και ενώ οι περισσότεροι από τους οίκους βαθμονόμησης, που δεν είναι απαραίτητα και κατασκευαστικοί, απαιτούν η μηχανή να είναι σε λειτουργική κατάσταση πριν από τη βαθμονόμηση, τα αποτελέσματά της μπορούν να επιτρέψουν στο χρήστη να προβλέψει σε ποια χρονική στιγμή απαιτείται ρύθμιση ή επισκευή της. Η πρόβλεψη γίνεται αξιολογώντας εάν τα αποτελέσματα, ανεξάρτητα για την κάθε παράμετρο, ακολουθούν μια κανονική κατανομή γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή. Εάν αυτό δεν συμβαίνει, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο συνδυασμός των στοιχείων του ιστορικού της μηχανής και μιας ανάλυσης παλινδρόμησης, για να καθοριστεί πότε τα αποτελέσματα θα ξεπεράσουν ένα επιτρεπτό όριο και επομένως θα απαιτηθεί βαθμονόμηση.

Η διεθνής εμπειρία, τόσο με τα αναλογικά όσο και με τα ψηφιακά συστήματα αεροφωτογράφησης, έχει δείξει ότι η εργαστηριακή γεωμετρική βαθμονόμησή τους δεν είναι απαραίτητα έγκυρη σε συνθήκες πτήσης, οι οποίες φυσικά διαφέρουν από τις συνθήκες εργαστηρίου. Άλλωστε για τέτοιου είδους βαθμονόμηση, απαιτείται εργαστηριακός εξοπλισμός, που δεν είναι προσιτός στον μέσο χρήστη και το κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό εάν την εργασία την αναλάβει ένας πιστοποιημένος οίκος. Η γνώση των παραμέτρων του συστήματος με μεγάλη ακρίβεια, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές άμεσης γεωαναφοράς των εικόνων και σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια. Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης ενός πεδίου βαθμονόμησης, είναι ότι εκτός από την μηχανή μεμονωμένα, μπορεί να βαθμονομηθεί ολόκληρο το σύστημα φωτογράφησης και οι προσδιοριζόμενες παράμετροι δεν είναι μόνο θεωρητικά, αλλά και πρακτικά έγκυρες σε συνθήκες πτήσης.

Στην βαθμονόμηση και έλεγχο με τη χρήση πεδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες προσεγγίσεις. Έτσι το πεδίο ελέγχου μπορεί να είναι μόνιμο ή προσωρινό, με μόνιμους ή μεταφερομένους στόχους ή ακόμη και αντικείμενα π.χ. ευθείες γραμμές, από την περιοχή φωτογράφησης. Αν και μέχρι τώρα δεν υπάρχουν γενικώς αποδεκτές μέθοδοι για την βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου, αρκετές διεθνείς ομάδες εργασίας, ασχολούνται με την ανάπτυξη ενιαίων πρακτικών και προτύπων στον τομέα αυτό. Όπως για παράδειγμα, η ομάδα

για τη βαθμονόμηση και πιστοποίηση του *GEOS/ISPRS* (Morain and Zanoni, 2004), η πρωτοβουλία για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό από την *USGS* (*USGS*, 2004) και το δίκτυο *EuroSDR* για τη βαθμονόμηση ψηφιακών μηχανών (Cramer, 2004). Απαιτούνται όμως περισσότερα εμπειρικά αποτελέσματα για τη βελτιστοποίηση και έλεγχο των προτεινόμενων μεθόδων και πρακτικών.

Στο πλαίσιο αυτού του αντικειμένου, ανατέθηκαν από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της **Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών** του Ε.Μ.Π. τρεις παράλληλες (μαζί με την παρούσα) διπλωματικές εργασίες (Παπαδόπουλος, 2010 και Φιλιόπουλος, 2010). Η όλη προσπάθεια αφορούσε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος της βαθμονόμησης των μηχανών αεροφωτογράφησης, αναλογικών και ψηφιακών με τη χρήση ενός πεδίου ελέγχου, με βάση τη διεθνή εμπειρία και πρακτική.

Έτσι, για πρώτη φορά στη χώρα μας, κατασκευάστηκε ένα μόνιμο πεδίο ελέγχου αποτελούμενο από μόνιμους βαμμένους στόχους σε φυσικά και τεχνητά αντικείμενα, αλλά και από βάθρα τοποθέτησης μεταφερόμενων στόχων με μεγάλη ακρίβεια κέντρωσης. Στη συνέχεια το πεδίο φωτογραφήθηκε με αναλογική και ψηφιακή μηχανή αεροφωτογράφησης και πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση τους.

Οι τρεις παράλληλες διπλωματικές εργασίες έχουν τα Κεφάλαια 2 έως 5 κοινά, τα οποία αφορούν το απαραίτητο θεωρητικό τους υπόβαθρο.

1.2 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βαθμονόμηση ή διακρίβωση ή ο έλεγχος των αναλογικών μηχανών αεροφωτογράφησης και συγκεκριμένα της μηχανής *RMK TOP15*, δηλαδή ο προσδιορισμός της σταθεράς c της μηχανής, της θέσης του πρωτεύοντος σημείου (x_0, y_0) και της ακτινικής διαστολής Δr , με την εφαρμογή της μεθόδου της **συνόρθωσης δέσμης με αυτοβαθμονόμηση (*self-calibration*) και της χρήσης του πεδίου ελέγχου, που ιδρύθηκε για το σκοπό αυτό.**

Οι επιμέρους υποστόχοι που τίθενται προκειμένου να ολοκληρωθεί το συγκεκριμένο θέμα, αφορούν την αντιμετώπιση ενός φωτογραμμετρικού προβλήματος από την αρχή μέχρι το τέλος του σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο, καθώς απαιτήθηκαν:

- Θεωρητική μελέτη, σχεδιασμός, υλοποίηση και μέτρηση του πεδίου ελέγχου.
- Προγραμματισμός πτήσης για τη φωτογράφησή του στην επιθυμητή κλίμακα και για το συγκεκριμένο σκοπό.
- Κατανόηση των θεμελιωδών φωτογραμμετρικών θεμάτων σε θεωρητικό επίπεδο, όπως: καταλληλότητα δεδομένων (π.χ. ακρίβειες φωτοσταθερών, μέγεθος εικονοψηφίδας), προσανατολισμοί, μέθοδοι αεροτριγωνισμού, αυτόματη εύρεση ομολογιών, ακρίβειες των διαδικασιών, ερμηνεία αποτελεσμάτων, κ.τ.λ.
- Πρακτική εφαρμογή των παραπάνω στο κατάλληλο υλικό και λογισμικό (φωτογραμμετρικός σαρωτής, ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός, λογισμικά συνόρθωσης).

1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει οχτώ κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου του κεφαλαίου της εισαγωγής, με το αντίστοιχο περιεχόμενο:

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια γρήγορη περιγραφή των χαρακτηριστικών των φωτομηχανών εναέριων λήψεων, τον έλεγχο των οποίων πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι έννοιες της κεντρικής προβολής και των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού. Επίσης, αναλύονται τόσο η γεωμετρία όσο και τα σφάλματα του φωτογραφικού φακού και ο τρόπος μοντελοποίησης τους για το σύνολο των μηχανών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις μεθόδους βαθμονόμησης των φωτογραφικών μηχανών, εναέριων και επίγειων. Αναφέρεται ο σκοπός της βαθμονόμησης, ταξινομούνται σε κατηγορίες οι μέθοδοι και περιγράφονται συνοπτικά. Παρουσιάζεται επίσης η ανάγκη βαθμονόμησης των μηχανών όπως αυτή εξελίσσεται ιστορικά, καθώς και των φορέων διαπίστευσης αυτού του είδους των εργασιών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση και ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, που αναφέρεται στα πεδία ελέγχου που υπάρχουν διεθνώς και τις προδιαγραφές τους, για την εξυπηρέτηση διαφόρων φωτογραμμετρικών αναγκών.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα μέσα σε υλικό και λογισμικό, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της εργασίας.

Στο έβδομο κεφάλαιο, που αφορά την εφαρμογή με την μηχανή *RMK TOP15* αναλύεται η επιλεγείσα, για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, μέθοδος βαθμονόμησης. Περιγράφεται συνοπτικά το πεδίο ελέγχου που φωτογραφήθηκε και αναλύονται όλες οι επιμέρους διαδικασίες, όσον αφορά δηλαδή τη λήψη και τη σάρωση των εικόνων, τις μετρήσεις σε αυτές και την εκτέλεση των προγραμμάτων εξαγωγής των παραμέτρων βαθμονόμησης.

Στο όγδοο κεφάλαιο τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν από την ενασχόληση με το θέμα.

2. ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ

Η εργασία αυτή αρχίζει, κάνοντας μια γρήγορη αναφορά στις αερομηχανές και στο τρόπο λειτουργίας τους, ώστε να γίνουν κατανοητά αργότερα, αφενός τα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις με τα όργανα αυτά, και αφετέρου η αναγκαιότητα της γνώσης και εξάλειψής τους.

2.1 Χαρακτηριστικά Μηχανών Αεροφωτογράφισης

Τα δύο κύρια πεδία εφαρμογής των εναερίων λήψεων είναι η Φωτογραμμετρία και η Φωτοερμηνεία. Στη Φωτοερμηνεία απαιτείται πρωτίστως υψηλή ποιότητα στην απόδοση των λεπτομερειών και επομένως η βασική απαίτηση εκεί είναι η ευκρίνεια και η διαχωριστική ικανότητα της λήψης, ενώ αντίθετα η γεωμετρική πιστότητα, δηλαδή η έλλειψη διαστρωφής και η γνώση των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού, είναι πρωταρχικής σημασίας στη Φωτογραμμετρία (*Kraus, 2003*).

Οι αεροφωτογραφικές μηχανές αποτελούν μια ειδική κατηγορία μετρητικών ή φωτογραμμετρικών μηχανών, που ανεπτύχθησαν για εφαρμογές αποτυπώσεων οι οποίες συνήθως απαιτούν μετρήσεις ακριβείας. Οι μηχανές αυτές από την κατασκευή τους είναι ουσιαστικώς, όπως ήδη αναφέρθηκε, όργανα μέτρησης, αντίστοιχα με τα γνωστά θεοδόλιχα. Με την καταγραφή της εικόνας στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια καταγράφονται και οι άπειρες διευθύνσεις προς τα άπειρα σημεία που αποτυπώνονται στο φιλμ. Ως στάση του μετρητικού οργάνου θεωρείται το σημείο που αντιστοιχεί στο προβολικό κέντρο του φακού τη στιγμή της λήψης. Το σημείο αυτό δεν είναι το φυσικό κέντρο του φακού, αλλά κάποιο άλλο σημείο μέσα στο φακό, του οποίου η θέση πρέπει να είναι γνωστή, για να μπορεί η φωτογραφία να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις. Ακόμα πρέπει η εσωτερική γεωμετρία των μηχανών αυτών να είναι σταθερή και γνωστή. Με αυτό υπονοείται ότι πρέπει να είναι γνωστές οι παράμετροι του γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο είναι συνήθως η Κεντρική Προβολή, με το οποίο θα περιγραφεί αναλυτικά η διαδικασία της φωτογράφισης, ώστε να είναι δυνατή η ακριβής μετρητική εκμετάλλευση των λήψεων. Η γνώση αυτής της εσωτερικής γεωμετρίας των φωτογραμμετρικών μηχανών είναι εντελώς αντίστοιχη με τον έλεγχο των οργάνων μέτρησης γωνιών (θεοδόλιχα) και προκύπτει από ειδικές διαδικασίες που συνιστούν τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών. Συνήθως οι μηχανές αυτές συνοδεύονται από ένα πιστοποιητικό βαθμονόμησης ή διακρίβωσης, που δίνει ακριβώς όλα τα στοιχεία ποιότητας της γεωμετρικής απεικόνισης με τη συγκεκριμένη μηχανή, ώστε να εξασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων και των εξ αυτών υπολογιζόμενων μεγεθών (*Kraus, 1994*).

Εκτός από τη σταθερή και γνωστή γεωμετρία τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μηχανών αυτών, που τις διαφοροποιούν από τις ερασιτεχνικές και τις ημι-μετρητικές μηχανές, είναι:

- **Σταθερή εσωτερική γεωμετρία:** Προσδιορίζεται με ακρίβεια η μορφή της δέσμης των ακτίνων.
- **Εικονοσήματα:** Σημεία, στο πλαίσιο της φωτογραφικής μηχανής, που παρέχουν τη δυνατότητα καθορισμού ενός συστήματος αναφοράς για τις μετρήσεις στην εικόνα.
- **Χαμηλή ακτινική διαστρωφή:** Σφάλμα των φακών, που προκαλεί αποχές από το μοντέλο της κεντρικής προβολής.
- **Επιπεδότητα του φιλμ:** Όταν δεν εξασφαλίζεται, προκαλεί γεωμετρικά σφάλματα, μειώνοντας έτσι την ακρίβεια.
- **Μεγάλο μέγεθος αρνητικού:** Για ευρύτερη κάλυψη του αντικειμένου.
- **Διαθέτουν τη δυνατότητα καταγραφής διαφόρων χρήσιμων πληροφοριών στη φωτογραφία,** όπως π.χ. την τιμή της σταθεράς της μηχανής, την ώρα λήψης, αρίθμηση κ.τ.λ.

2.2 Γενικές Προδιαγραφές Μηχανών Αεροφωτογράφισης

Οι μετρητικές μηχανές αεροφωτογραφήσεων τοποθετούνται, προφανώς, σε αεροπλάνα αεροφωτογραφήσεων που διαθέτουν ειδική καταπακτή με κρυστάλλινο κάλυμμα και επομένως πρέπει η εγκατάστασή τους να καλύπτει τις τεχνικές προδιαγραφές ασφαλείας, που ισχύουν στην αεροπλοΐα και να μπορούν να λειτουργούν στις ιδιαίτερες συνθήκες της πτήσης. Ειδικότερα για την διασφάλιση της εσωτερικής τους γεωμετρίας οι μετρητικές μηχανές αεροφωτογραφήσεων πρέπει να διαθέτουν και τις παρακάτω χαρακτηριστικές ιδιότητες:

- Γενικώς μη μεταβαλλόμενη εστιακή απόσταση (σταθερά μηχανής). Αυτό συνεπάγεται ότι είναι συνήθως σταθερής εστίασης, γεγονός που άλλωστε υπαγορεύεται από το ότι οι μηχανές αυτές φωτογραφίζουν αντικείμενα στο φωτογραφικό άπειρο.
- Οι διαστάσεις της εικόνας είναι σήμερα πια τυποποιημένες και είναι $23 \times 23 \text{ cm}^2$. Αυτή η τυποποίηση εξασφαλίζει χαμηλά κόστη του χρησιμοποιούμενου φωτογραφικού υλικού, των οργάνων εμφάνισης και εκτύπωσης καθώς επίσης και των φωτογραμμετρικών οργάνων απόδοσης και φυσικά μεγαλύτερη επιφάνεια κάλυψης.
- Η επιπεδότητα του φιλμ εξασφαλίζεται με ειδικούς μηχανισμούς, οι οποίοι βασίζονται είτε στην πίεση του φιλμ είτε στην υποπίεση με τη δημιουργία κενού αέρος.
- Οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ αεροδρομίου (κλειστή καταπακτή, στάθμευση στον ήλιο για μεγάλα χρονικά διαστήματα) και υψομέτρου εργασίας (καταπακτή ανοικτή) είναι πολύ μεγάλες. Επομένως θα πρέπει να έχουν προβλεφθεί κατά την κατασκευή τους μέτρα αντιμετώπισης, όπως πχ. ειδικά υλικά με μικρό συντελεστή διαστολής, συστήματα μεταφοράς ψυχρού αέρα, κάλυμμα της καταπακτής κτλ.
- Τα σημεία πλαισίου πρέπει να φωτίζονται, ώστε να είναι ευδιάκριτα και το πλήθος τους κυμαίνεται από 4 σε 8, για να είναι δυνατός ο εντοπισμός ακόμα και μικρών συστηματικών σφαλμάτων στα άκρα των λήψεων, κατά το στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων.

Επίσης, πρέπει να εξασφαλίζονται και συγκεκριμένες προδιαγραφές για τον εξωτερικό προσανατολισμό τους κατά τη φωτογράφιση, που σε αντίθεση με τις επίγειες μηχανές λήψης, δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα. Έτσι οι μηχανές αεροφωτογραφήσεων:

- Πρέπει να διαθέτουν βάση στήριξης με δυνατότητα στροφών ω και φ , ώστε να μπορούν να οριζοντιώνονται. Για τα αναλυτικά όργανα απόδοσης δεν ισχύει αυτός ο περιορισμός, όμως οι σύγχρονες μηχανές οριζοντιώνονται αυτομάτως με τη βοήθεια ειδικών αισθητήρων ακριβείας.
- Πρέπει να διαθέτουν μηχανισμό που να επιτρέπει στροφή γύρω από τον οπτικό άξονα ($\kappa < 3 \text{ grad}$), για τη διόρθωση, κατά την πτήση, της απόκλισης της πορείας του αεροπλάνου από την προδιαγεγραμμένη.
- Πρέπει να ακολουθείται με ακρίβεια η γραμμή (ίχνος) πτήσης τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Επομένως η μηχανή θα πρέπει να διαθέτει καλό σύστημα πλοήγησης.
- Οι διαδοχικές λήψεις μιας ζώνης πρέπει να εκτελούνται με βάση τη σχεδιασμένη κατά μήκος επικάλυψη ακόμα και σε ορεινά εδάφη. Επομένως η μηχανή λήψης πρέπει να διαθέτει μηχανισμό τήρησης επικάλυψης.
- Τυχόν διορθώσεις των παραμέτρων πτήσης επιτρέπεται να γίνονται μόνο στα χρονικά διαστήματα μεταξύ των λήψεων, γεγονός που κάνει απαραίτητη την ύπαρξη συστήματος ένδειξης της χρονικής στιγμής έκθεσης.
- Η κίνηση του αεροσκάφους προκαλεί κατά την έκθεση, μία μετακίνηση των απεικονιζόμενων σημείων της εικόνας, με αποτέλεσμα το φλουτάρισμά της, που εξαλείφεται με κατάλληλο μηχανισμό που κινεί το φιλμ προς την διεύθυνση πτήσης. Τα σημεία πλαισίου θα πρέπει να παραμένουν εστιασμένα. Ο μηχανισμός αυτός που καλείται μηχανισμός αντιστάθμισης της πρόσθιας κίνησης (*Forward Motion*

Compensation-FMC), είναι πολύ σημαντικός για την ευκρίνεια της λήψης και την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων.

- Επειδή απαιτούνται σχετικά μικροί χρόνοι έκθεσης (1/150-1/1000) πρέπει να χρησιμοποιούνται κεντρικά κλείστρα μικρής σχετικής διαμέτρου, ώστε να εξασφαλίζεται ο ίδιος εξωτερικός προσανατολισμός για όλη την εικόνα.

Ο Πίνακας 2-1 δίνει πληροφορίες για τους συνήθεις φακούς που διατίθενται σήμερα για αεροφωτογραφήσεις. Ο οξυγώνιος φακός με $c=60\text{cm}$ κατασκευάζεται μόνο από την εταιρεία *Zeiss* και έχει μέγιστη διαστροφή $50\mu\text{m}$. Όλοι οι άλλοι φακοί έχουν μέγιστη διαστροφή κάτω των $10\mu\text{m}$.

Γωνιακό άνοιγμα	Οξυγώνιος 33 grad	Κανονικός 62 grad	Ενδιάμεσος 85 grad	Ευρυγώνιος 100 grad	Υπερευρυγώνιος 140 grad
Σταθερά c [cm]	60	30	21	15	9
Λόγος σταθεράς c προς διαγώνιο εικόνας	2:1	1:1	2:3	1:2	1:4
Λόγος βάση-προς-απόσταση (B/H) για 60% κατά μήκος επικάλυψη.	1:6.6	1:3.3	1:2.3	1:1.6	1:0.95
Επιφάνεια μοντέλου ($h = \text{const.}$)	6	25	50	100%	290
Ύψος πτήσης πάνω από το έδαφος (Εμβαστό = const., Κλίμακα = const.)	400	200	150	100%	60

Πίνακας 2-1: Οι σπουδαιότεροι τύποι φακών για εναέρια Φωτογραμμετρία (τυπικό μέγεθος αρνητικού $23 \times 23 \text{ cm}^2$, όπου h =ύψος πτήσης από το έδαφος)

Πηγή: Γεωργόπουλος & Χλιβερού, 2003

3. Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η έννοια της κεντρικής προβολής, που είναι το επιθυμητό, πλην όμως μη υλοποιήσιμο, ιδεατό μαθηματικό μοντέλο ειδικά για μια μετρητική φωτογραφική μηχανή. Επίσης, αναλύονται τόσο η γεωμετρία όσο και τα σφάλματα του φωτογραφικού φακού και ο τρόπος μοντελοποίησής τους για το σύνολο των μηχανών.

3.1 Η Κεντρική Προβολή

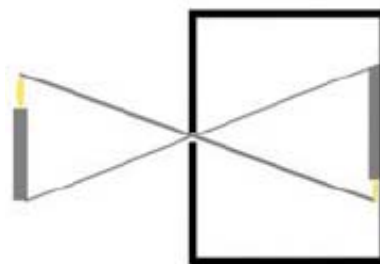
Μια φωτογραφική μηχανή μπορεί να μοντελοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τις ιδιότητες, που απαιτείται να περιγραφούν και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το μοντέλο, με τον επιθυμητό κάθε φορά βαθμό ακρίβειας. Για την περίπτωση της τρισδιάστατης απεικόνισης χώρου, αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως, είναι ο τρόπος με τον οποίο τα σημεία του χώρου απεικονίζονται στην εικόνα. Ένα απλό, γραμμικό γεωμετρικό μοντέλο είναι το μοντέλο της «κάμερας σημειακής οπής» (*pinhole camera model*). Με βάση το μοντέλο αυτό, ένα απλό φωτοστεγανό κουτί (Εικόνα 3-1), με μια πολύ μικρή τρύπα διαμέτρου 0.25mm, αποτελεί την πιο απλή φωτογραφική μηχανή.



Εικόνα 3-1: Κάμερα σημειακής οπής

Πηγή: Γεωργόπουλος, 1998

Οι οπτικές ακτίνες που προέρχονται από ένα αντικείμενο του χώρου μπροστά στην κάμερα αυτή, διέρχονται από μια μικρή οπή, αμελητέων διαστάσεων d και προσπίπτοντας στο επίπεδο της εικόνας, δημιουργούν ένα αντεστραμμένο είδωλο του αντικειμένου (Σχήμα 3-1).



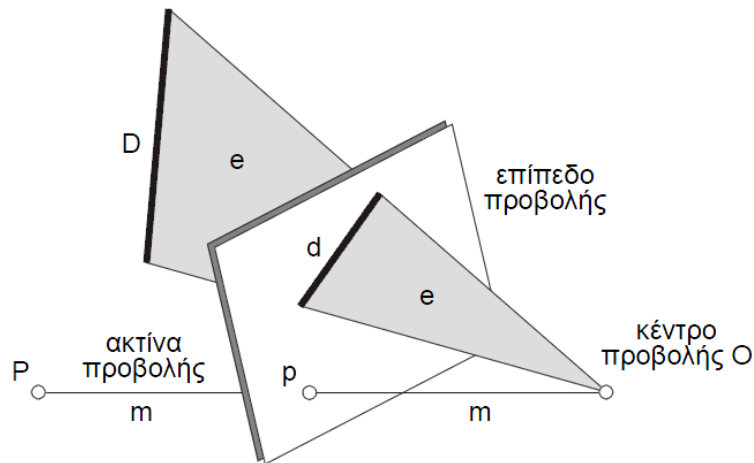
Σχήμα 3-1: Το μοντέλο σημειακής οπής για την κάμερα

Πηγή: www.sfak.gr

Από αυστηρά γεωμετρική άποψη – δηλαδή ανεξάρτητα από την οπτική διαδικασία που την δημιούργησε – μια εικόνα/φωτογραφία θεωρείται γενικά ότι είναι το προϊόν μιας κεντρικής προβολής. Η κεντρική προβολή, είναι το θεωρητικό μαθηματικό και γεωμετρικό μοντέλο, που περιγράφει την **ιδανική** φωτογραφική απεικόνιση και έχει άμεση εφαρμογή **μόνο** στη μηχανή σημειακής οπής, που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3-2, που ακολουθεί, θεωρείται σε πρώτη προσέγγιση, ότι τα σημεία του χώρου προβάλλονται σε ένα επίπεδο προβολής (= επίπεδο του αρνητικού για τις κοινές αναλογικές εικόνες) μέσω μιας δέσμης ακτίνων προβολής, οι οποίες διέρχονται όλες από το κέντρο προβολής (ή προβολικό κέντρο ή και σημείο λήψης. Αποτέλεσμα μιας κεντρικής

προβολής και εν προκειμένω μιας φωτογραφικής απεικόνισης, είναι ένα σύνολο εικονοσημείων τα οποία συγκροτούν μια προοπτικά παραμορφωμένη προβολή του αντικειμένου, δηλαδή μια προοπτική απεικόνισή του (Πέτσα, 2000).



Σχήμα 3-2: Κεντρική προβολή σημείου ($P \rightarrow p$) και ευθείας ($D \rightarrow d$) του χώρου

Πηγή: Πέτσα, 2000

Λέμε λοιπόν ότι η εικόνα **προσεγγίζεται** γεωμετρικά με το μοντέλο της κεντρικής προβολής. Τούτο οφείλεται κυρίως σε σφάλματα των φακών αλλά και σε πολλούς άλλους παράγοντες που επενεργούν στην φυσική διαδικασία της απεικόνισης, όπως π.χ. η μη επιπεδότητα του φιλμ ή η ατμοσφαιρική διάθλαση. Είναι δηλαδή η κεντρική προβολή, το μαθηματικό μοντέλο, με το οποίο προσεγγίζεται γεωμετρικά, η οπτική διαδικασία δημιουργίας μιας εικόνας, ως το καλύτερο γεωμετρικό ισοδύναμο της οπτικής απεικόνισης, το οποίο επιτρέπει την χρήση των εικόνων για μετρητικούς σκοπούς (Πέτσα, 2000).

Για την περίπτωση της προοπτικής απεικόνισης, η κεντρική προβολή ορίζεται από τα παρακάτω:

- α. Τη θέση του επιπέδου προβολής (προοπτικό επίπεδο)
- β. Την απόσταση του κέντρου προβολής (προοπτικό κέντρο) από το επίπεδο προβολής
- γ. Τη θέση της ορθής προβολής του κέντρου πάνω στο επίπεδο.

Αρκεί, συνεπώς, να προσδιοριστούν οι παραπάνω παράμετροι, για να περιγραφεί η φωτογραφική απεικόνιση από το γεωμετρικό μοντέλο που επιλέχθηκε. Να μπορεί, δηλαδή, να εκφραστεί με μαθηματικές σχέσεις η γεωμετρία που ισχύει στη φωτογραφική μηχανή.

Σε μια φωτογραφική μηχανή, μετρητική, ημι-μετρητική ή μη μετρητική, παρουσιάζονται τα παρακάτω φαινόμενα, που δημιουργούν δυσκολίες στην εφαρμογή του μοντέλου της κεντρικής προβολής (Γεωργόπουλος, 1998):

- i. Το σύστημα φακών, που χρησιμοποιείται συνήθως για να εστιάσει τις ακτίνες από το χώρο του αντικειμένου στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια, έχει κάποιες φυσικές διαστάσεις, που δεν είναι αμελητέες. Συνεπώς, δεν μπορεί να θεωρηθεί το σύστημα αυτό ως σημείο, ως προοπτικό κέντρο δηλαδή, όπως θα απαιτούσε η κεντρική προβολή. Απαιτείται, λοιπόν, η αναζήτηση και ο προσδιορισμός του ή των σημείων εκείνων, στα οποία θα μπορούσε να αποδοθούν οι ιδιότητες του προοπτικού κέντρου.
- ii. Παρατηρείται γενικά μια εκκεντρότητα του συστήματος των φακών ως προς το εστιακό επίπεδο, που οφείλεται είτε σε κατασκευαστικές ατέλειες, είτε σε έλλειψη σταθερότητας του φωτογραφικού θαλάμου. Απαιτείται συνεπώς ο προσδιορισμός του σημείου προβολής του προοπτικού κέντρου στο εστιακό επίπεδο (πρωτεύον σημείο).
- iii. Κατασκευαστικές ατέλειες, τέλος, του ίδιου του φακού, προκαλούν τα διάφορα σφάλματα των φακών. Αυτό που ενδιαφέρει εδώ είναι η διαστροφή του φακού, ως το σφάλμα που έχει επίδραση στη γεωμετρική θέση των απεικονιζομένων σημείων. Απαιτείται λοιπόν, προσδιορισμός κάθε φορά και της γεωμετρικής παραμόρφωσης του ειδώλου, λόγω διαστροφής του φακού.

3.2 Εσωτερικός Προσανατολισμός

Για να καταστεί, επομένως, δυνατή η εφαρμογή του μοντέλου της κεντρικής προβολής στη φωτογραφική λήψη, θα πρέπει να αποκατασταθεί ο **εσωτερικός προσανατολισμός** της, δηλαδή να προσδιοριστεί η πρωτεύουσα απόσταση (c), η θέση του πρωτεύοντος σημείου στο εστιακό επίπεδο (x_0, y_0) και το μέγεθος της διαστρόφης του φακού (Δr) (Γεωργόπουλος, 1998).

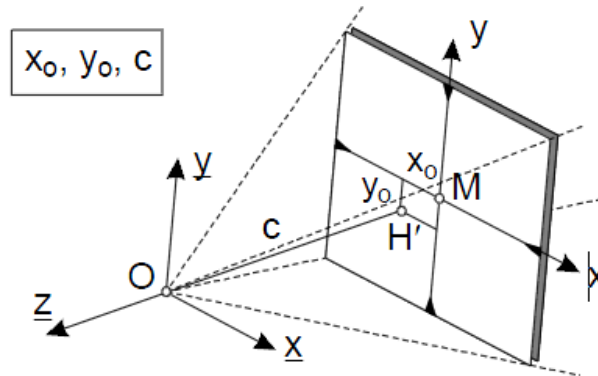
Εσωτερικός προσανατολισμός δηλαδή, είναι η διαδικασία ανάπλασης της δέσμης, που αντιστοιχεί σε δεδομένη εικόνα και οι παραπάνω παράμετροι, καλούνται παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών, επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης της μηχανής (*camera calibration*) (Μπαντέκας, 1980).

3.2.1 Βασικές παράμετροι εσωτερικού προσανατολισμού

Οι βασικές παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού, για τον ακριβή καθορισμό της δέσμης και την ανάπλασή της, είναι οι εξής:

- οι δύο εικονοσυντεταγμένες x_0, y_0 του πρωτεύοντος σημείου H' και
- η σταθερά c της μηχανής,

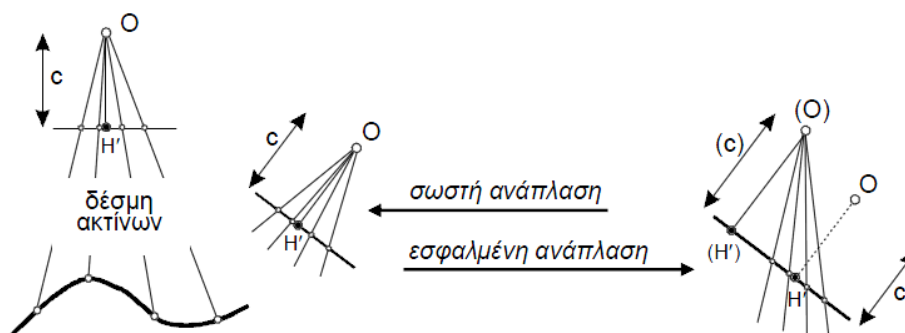
δηλαδή τα στοιχεία που ορίζουν την προβολή H' (πρωτεύον σημείο), του προβολικού κέντρου O στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων (με αρχή το M , από την τομή των ευθειών που ενώνουν τα απέναντι εικονοσήματα) και την απόστασή του c (πρωτεύουσα απόσταση), από το επίπεδο του αρνητικού. Η σύνδεση των μετρημένων εικονοσημάτων με το κέντρο προβολής θα ορίσουν την προβολική δέσμη ακτίνων.



Σχήμα 3-3: Βασικές παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού

Πηγή: Πέτσα, 2000

Ο λανθασμένος ορισμός των παραμέτρων αυτών, επηρεάζει κατά πολύ την ορθή ανάπλαση της δέσμης των ακτίνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4:



Σχήμα 3-4: Σωστή και εσφαλμένη ανάπλαση δέσμης ακτίνων

Πηγή: Πέτσα, 2000

3.2.2 Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί και το γεγονός ότι η πορεία μιας φωτεινής ακτίνας από ένα σημείο στο έδαφος μέχρι τη φωτοευαίσθητη επιφάνεια του φιλμ, παραμορφώνεται εξαιτίας μιας σειράς παραγόντων. Αυτοί κατά σειρά είναι:

- i. Καμπυλότητα της γης
- ii. Ατμοσφαιρική διάθλαση
- iii. Ακτινική διαστροφή
- iv. Θέση πρωτεύοντος σημείου
- v. Συρρίκνωση του φιλμ

Επομένως η διόρθωση –ή καλύτερα– η αναγωγή των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων, γίνεται με σειρά **αντίστροφη** της αναφερθείσας και είναι απαραίτητη, για να αναχθούν τα μετρούμενα σημεία στις γεωμετρικές θέσεις, που απαιτεί το γεωμετρικό μοντέλο της Κεντρικής Προβολής που επιλέχθηκε, για να περιγράψει τη συγκεκριμένη δέσμη.

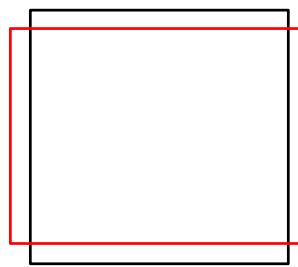
Η διαδικασία αυτή λέγεται **αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού** και ουσιαστικώς αναπλάθει τη δέσμη των οπτικών ακτίνων (Γεωργόπουλος, 1998). Προϋπόθεση είναι βέβαια η ακριβής γνώση των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού. Η σειρά αποκατάστασης είναι:

➤ Συρρίκνωση (παραμόρφωση) του φιλμ

Είναι δυνατό να διορθωθεί, εάν είναι γνωστές οι πραγματικές αποστάσεις S_x, S_y των σημείων πλαισίου κατά μήκος των αξόνων x και y . Μετρώνται οι εικονοσυντεταγμένες x', y' των σημείων αυτών και υπολογίζονται εκ νέου οι αποστάσεις S'_x, S'_y , οπότε και ανάγονται στις διορθωμένες τιμές.

Όταν υπάρχουν τέσσερα εικονοσήματα στις γωνίες της εικόνας, μια πιο ακριβής μέθοδος διόρθωσης (Zhizhuo, 1990), δίνεται μέσω του προβολικού μετασχηματισμού:

$$x = \frac{a_1 x' + a_2 y' + a_3}{c_1 x' + c_2 y' + 1} \quad y = \frac{b_1 x' + b_2 y' + b_3}{c_1 x' + c_2 y' + 1} \quad (3.2-1)$$



$$\begin{aligned} x &= x' * S_x / S'_x \\ y &= y' * S_y / S'_y \end{aligned} \quad (3.2-2)$$

Σχήμα 3-5: Διόρθωση παραμόρφωσης φιλμ

Άλλη μια μέθοδος αποκατάστασης των σφαλμάτων των παραμορφώσεων του φιλμ είναι με τη χρήση πολυωνύμων, με την δυσκολία να έγκειται στον καθορισμό των συντελεστών τους (Μπαντέκας, 1980).

Ένα τέτοιο μοντέλο χρησιμοποιούμενο από το *National Geodetic Survey*, όταν υπάρχουν τέσσερα και οχτώ εικονοσήματα είναι αντίστοιχα:

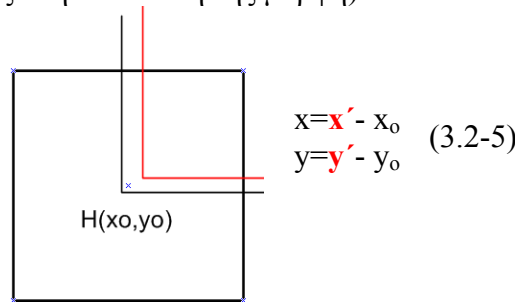
$$\Delta x = x - x' = x + a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \quad (3.2-3)$$

$$\Delta y = y - y' = y + b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= x - x' = x + a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 + a_6 x^2 y + a_7 xy^2 \\ \Delta y &= y - y' = y + b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 y^2 + b_6 x^2 y + b_7 xy^2 \end{aligned} \quad (3.2-4)$$

➤ **Πρωτεύον σημείο**

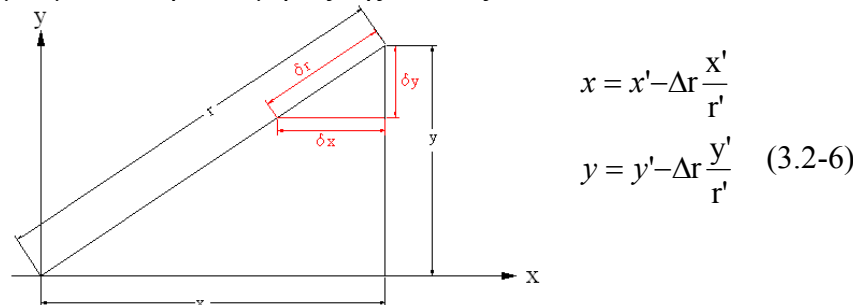
Έχουν υπολογιστεί τα x' και y' και ανάγονται στα x και y , ουσιαστικώς πρόκειται για μια μετάθεση του συστήματος αναφοράς (η διόρθωση αυτή ενσωματώνεται πρακτικά στην εξίσωση συγγραμμικότητας στην πιο απλή της μορφή).



Σχήμα 3-6: Διόρθωση πρωτεύοντος σημείου

➤ **Διαστροφή**

Το θέμα της διαστροφής των φακών αναλύεται διεξοδικά στην παράγραφο 3.5. Η σημαντικότερη διαστροφή που απαιτεί διόρθωση είναι η ακτινική, όπου ουσιαστικώς πρόκειται για μια μετάθεση κατά μήκος της ακτίνας.

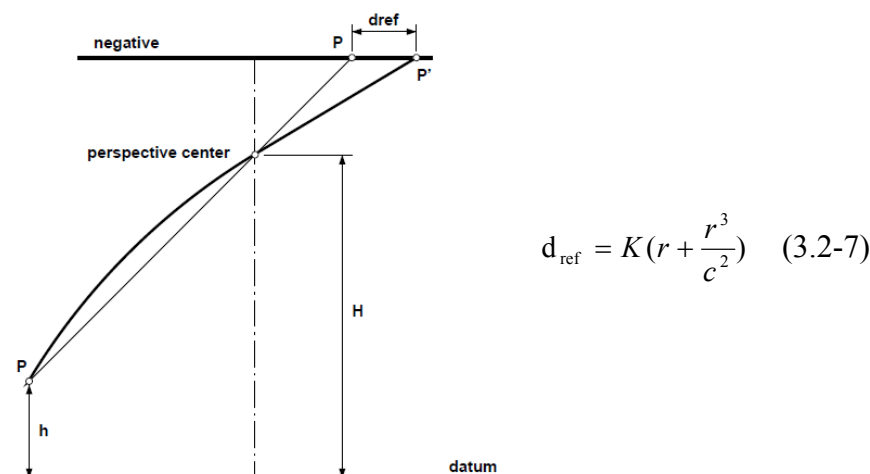


Σχήμα 3-7: Διόρθωση ακτινικής διαστροφής

Με Δr το πολυώνυμο της διαστροφής και r την ακτινική απόσταση.

➤ **Ατμοσφαιρική διάθλαση**

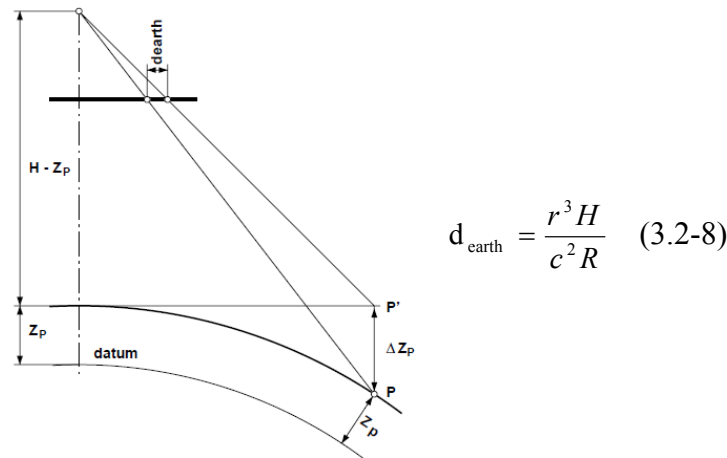
Λόγω της επίδρασής της, οι ακτίνες από τα σημεία του εδάφους προς τη μηχανή λήψεως ακολουθούν καμπύλη τροχιά, αντί ευθείας, με αποτέλεσμα όλα τα σημεία της εικόνας να μετατοπίζονται ακτινικά, απομακρυνόμενα από το ναδίρ της εικόνας (Μπαντέκας, 1980). Απαιτείται επομένως μια διόρθωση, όπως δίνεται από τη σχέση (3.2-7), με την εμφανιζόμενη σταθερά K να έχει τιμή: $K = \left(\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h^2}{(h^2 - 6h + 250)H} \right) 10^{-6}$, με H το ύψος πτήσης και h το υψόμετρο του εδάφους σε Km.



Σχήμα 3-8: Επίδραση ατμοσφαιρικής διάθλασης

➤ Καμπυλότητα γης

Προκύπτει από το γεγονός ότι σημείο P επί της επιφάνειας της θάλασσης, θεωρείται ως σημείο του επιπέδου αναφοράς P' , έχοντας μετάθεση $\Delta Z_P = S^2/2R$, που προκαλεί μια γωνιακή μετατόπιση μεταφραζόμενη σε αντίστοιχη μετάθεση επί της εικόνας.



Σχήμα 3-9: Επίδραση καμπυλότητας γης

3.3 Ο Φωτογραφικός Φακός

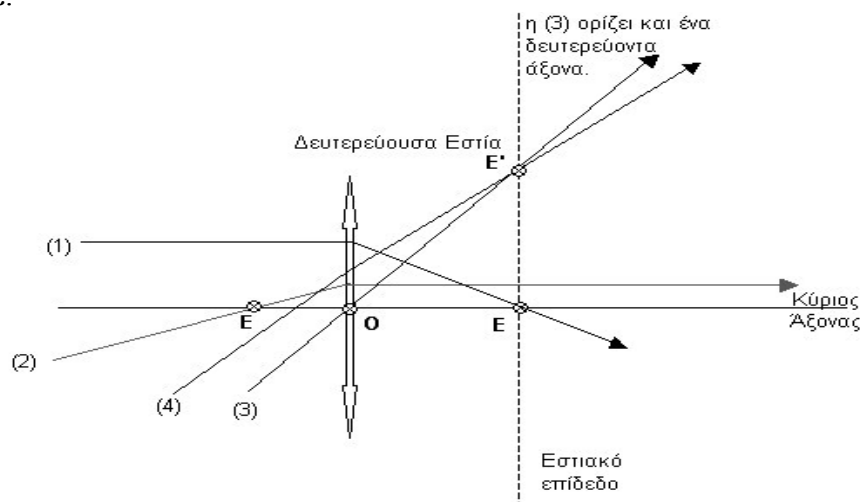
Ο φακός είναι ένα σώμα διαφανές που περιορίζεται από τουλάχιστον δύο διαθλαστικές επιφάνειες (δίοπτρα), με συνέπεια να αποτελεί οπτικό σύστημα που βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της διάθλασης.

Είναι το σημαντικότερο μέρος της φωτογραφικής μηχανής, γιατί από αυτόν κυρίως εξαρτάται η ποιότητα και η ευκρίνεια της εικόνας. Η αποστολή του φωτογραφικού φακού είναι να συγκεντρώσει, να προβάλει και να εστιάσει τις ακτίνες που ανακλώνται από τα προς φωτογράφιση αντικείμενα στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια του φιλμ, που βρίσκεται στο εστιακό επίπεδο (Γεωργόπουλος, 1998).

Οι λεπτοί φακοί με τους οποίους ασχολείται η γεωμετρική οπτική, είναι αμελητέου πάχους.

3.3.1 Πορεία ακτίνων σε λεπτό φακό

Οι λεπτοί φακοί είναι ιδανική περίπτωση φακών, οι οποίοι έχουν πολύ μικρό πάχος. Οι ακτίνες που συγκεντρώνονται στον φακό είναι κεντρικές, δηλαδή απέχουν λίγο από τον κύριο άξονα και έχουν μικρή κλίση ως προς αυτόν. Κάθε ακτίνα που διέρχεται από το οπτικό κέντρο δεν υφίσταται απολύτως καμία μετατόπιση. Αν εξεταστεί και σχηματικά η πορεία των ακτίνων, τότε:



Σχήμα 3-10: Πορεία ακτίνων σε ένα λεπτό φακό

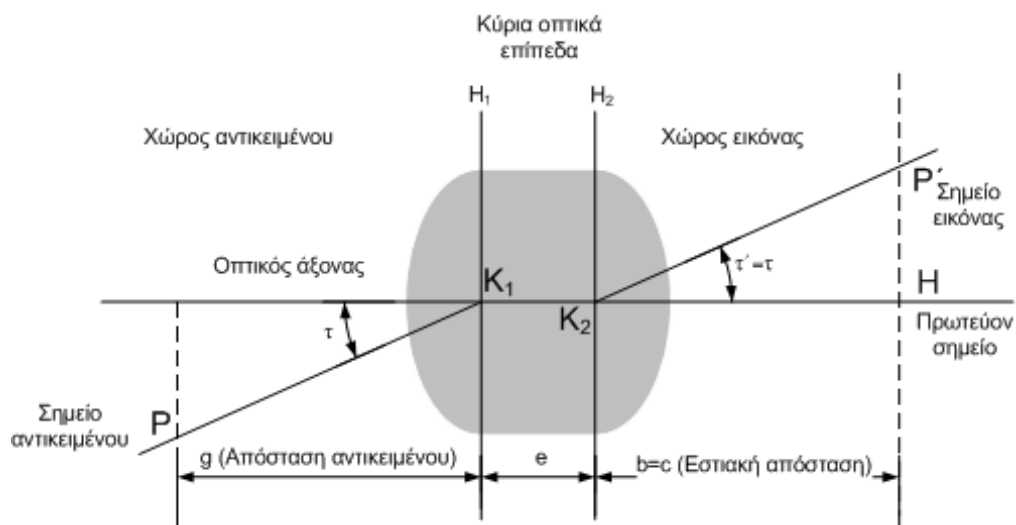
Πηγή: www.sfak.gr

- Η ακτίνα (1) είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα και διαθλώμενη από τον φακό, διέρχεται από την κύρια εστία.
- Η ακτίνα (2) διέρχεται από την κύρια εστία, άρα η διαθλώμενη από τον φακό θα είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα.
- Η ακτίνα (3) διέρχεται από το οπτικό κέντρο και συνεχίζει την πορεία της χωρίς καμία μετατόπιση.
- Η ακτίνα (4) είναι μια τυχαία ακτίνα. Αναγκαστικά θα διέλθει από μια δευτερεύουσα εστία E' .
- Δευτερεύουσες εστίες, είναι οι εστίες στις οποίες συγκλίνουν ακτίνες που έχουν παράλληλη διεύθυνση προς ένα δευτερεύοντα άξονα.

3.3.2 Πορεία ακτίνων σε σύστημα φακών

Στην παράγραφο 3.3.1 παραπάνω, παρουσιάστηκε η πορεία των ακτίνων σε έναν θεωρητικά λεπτό φακό. Σε αυτόν ορίζεται ένα κέντρο, από το οποίο όλες οι ακτίνες διέρχονται χωρίς απόκλιση. Για **συστήματα** όμως φακών, ορίζονται δυο κύρια επίπεδα H_1 και H_2 , ως εκείνα τα επίπεδα που αλληλοαπεικονίζονται ορθά και σε κλίμακα 1:1. Η τομή των επιπέδων αυτών με τον οπτικό άξονα, ορίζουν τα δεσμικά σημεία K_1 και K_2 , κατά τέτοιο τρόπο ώστε η εξερχόμενη (κεντρική) ακτίνα από το K_2 , να σχηματίζει την ίδια γωνία $\tau' = \tau$ με τον οπτικό άξονα, όπως και η προσπίπτουσα ακτίνα στο K_1 (Kraus, 2003).

Για την **ιδανική** αυτή περίπτωση συστήματος φακών, K_1 θα ήταν το εξωτερικό (προς το αντικείμενο) προβολικό κέντρο O και το K_2 το αντίστοιχο εσωτερικό (προς την εικόνα). Η σταθερά c της μηχανής, θα ήταν ίση με την εστιακή απόσταση b . Η εστιακή απόσταση και η απόσταση g του αντικειμένου, μετρώνται πάντα από τα κύρια επίπεδα.



Σχήμα 3-11: Ιδανική απεικόνιση της γεωμετρικής οπτικής

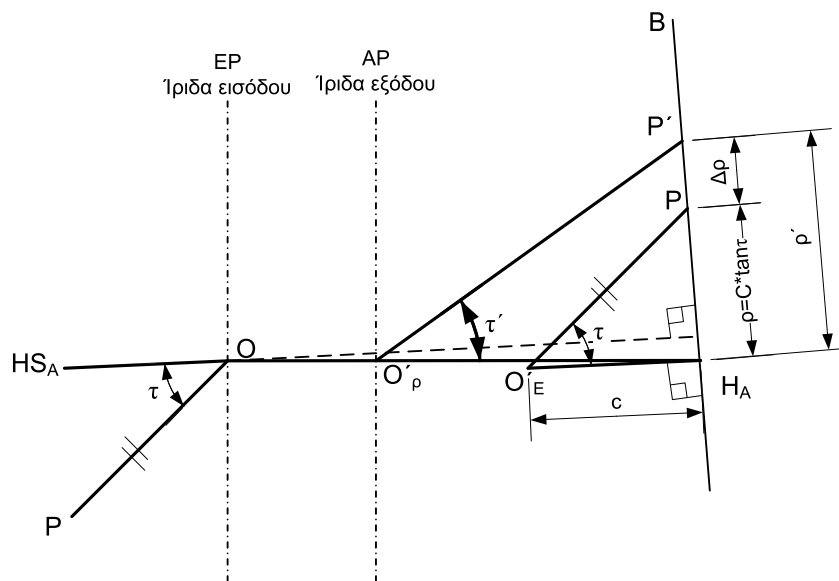
Πηγή: Kraus, 2003

Οι φωτογραφμετρικοί φακοί όμως είναι συστήματα φακών, αποτελούμενα από επιμέρους φακούς διαφορετικών υλικών κατασκευής και ως εκ τούτου δεν ισχύει για αυτούς η ιδανική περίπτωση, που αναφέρθηκε παραπάνω. Σε κάποια θέση μεταξύ του εξωτερικού και εσωτερικού φακού υπάρχει το **διάφραγμα**, για τον έλεγχο της ποσότητας του φωτός που εισέρχεται από το αντικείμενο στο σύστημα φακών, αλλά και για τη διατήρηση της εστίασης στο απαιτούμενο βάθος πεδίου. Τα είδωλα του διαφράγματος από την πλευρά του αντικειμένου και της εικόνας, ονομάζονται **ίριδα εισόδου** (EP) και **ίριδα εξόδου** (AP) αντίστοιχα (Kraus, 2003). Το κέντρο της ίριδας εισόδου, είναι το εξωτερικό προβολικό κέντρο O , στο οποίο θεωρείται ότι συγκλίνουν οι ακτίνες από τα σημεία του χώρου και αφού διαγράψουν μια πορεία στο εσωτερικό του φακού εξέρχονται από αυτόν, για να δημιουργήσουν την εικόνα στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια.

Στην πραγματικότητα αυτά που συμβαίνουν, βάσει των οποίων ξεκινά η αναζήτηση του εσωτερικού (μαθηματικού) κέντρου προβολής, απεικονίζονται στο Σχήμα 3-12 και περιγράφονται ως εξής:

- Άξονας αναφοράς στη φωτογραμμετρία, δεν είναι ο οπτικός άξονας OA , αλλά μια κατάλληλα επιλεγμένη κύρια ακτίνα HS . Αυτή είναι αρχικά κάθετη στο επίπεδο της εικόνας B και διέρχεται από το κέντρο της ίριδας εισόδου O . Η φυσική της προέκταση συναντά το επίπεδο σχηματισμού της εικόνας στο σημείο αυτοευθυγράμμισης H_A .
- Το εστιακό επίπεδο δεν είναι αυστηρά κάθετο στον οπτικό άξονα.
- Οι γωνίες τ , ορίζονται στο κέντρο της ίριδας εισόδου EP και όχι στα δεσμικά σημεία και επειδή η EP δεν βρίσκεται στο κύριο επίπεδο H_I , η γωνία τ' προς την πλευρά της εικόνας διαφέρει από την τ .

Ορίζεται επομένως ένα μαθηματικό κέντρο προβολής O'_E με τέτοιο τρόπο, ώστε να βρίσκεται σε απόσταση c (σταθερά της μηχανής), η προβολή του στο εστιακό επίπεδο να είναι το σημείο αυτοευθυγράμμισης H_A (εξήγηση στη παράγραφο 4.5) και η γωνία τ να υλοποιείται κατά το δυνατόν καλύτερα και από την πλευρά της εικόνας.

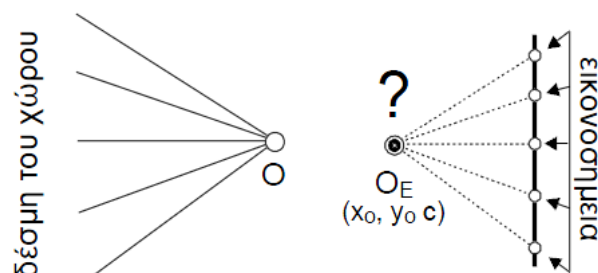


Σχήμα 3-12: Ορισμός μαθηματικού κέντρου προβολής

Πηγή: Kraus, 2003

Εναπομένοντα σφάλματα, οδηγούν στην **οπτική διαστρόφη** $\Delta\rho$, που αναλύεται λεπτομερώς στη συνέχεια (Παράγραφος 3.5). Έτσι το σημείο P αντί να απεικονιστεί ορθά στην αντίστοιχη του θέση στο επίπεδο της εικόνας, απεικονίζεται στη θέση P' (Σχήμα 3-12).

Το ζητούμενο λοιπόν στη φωτογραμμετρία δεν είναι να ανακατασκευαστεί η πορεία των ακτίνων μέσα στον φακό, αλλά να οριστεί μαθηματικό σημείο O_E («εσωτερικό» κέντρο προβολής), το οποίο συνδεδεμένο με τα εικονοσημεία θα ορίσει δέσμη κατά το δυνατόν ίδια με εκείνη που γέννησε την εικόνα. Αυτό το μαθηματικό (χωρίς άμεση φυσική σημασία) σημείο (Σχήμα 3-13), ορίζεται με τη θέση του (x_o, y_o, c) στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων (Πέτσα, 2000).



Σχήμα 3-13: Το ζητούμενο του εσωτερικού προσανατολισμού

Πηγή: Πέτσα, 2000

3.4 Σφάλματα Φακών - Υποβάθμιση Οπτικής Ποιότητας

Η ποιότητα και η ακρίβεια μιας φωτογραφικής εικόνας, εξαρτάται άμεσα από την πιστότητα της κατασκευής του φακού. Κατασκευαστικές ατέλειες στους φακούς όμως, προκαλούν διάφορα σφάλματα υποβαθμίζοντας την οπτική ποιότητα αλλά και τη γεωμετρική ακρίβεια της εικόνας.

Τα σφάλματα των φακών, που προκαλούν υποβάθμιση της οπτικής ποιότητας της εικόνας είναι: **η χρωματική εκτροπή, η αναλαμπή, η σφαιρική εκτροπή, ο αστιγματισμός, η κόμη και η καμπύλωση πεδίου** (Γεωργόπουλος & Χλιβερού, 2003). Η διαστροφή, από την άλλη, υποβαθμίζει τη γεωμετρική ακρίβεια και αναφέρεται σε μετατοπίσεις των σημείων επί του φωτογραφικού επιπέδου, από την κανονική τους θέση (Σχήμα 3-12) και είναι πολύ σημαντική από φωτογραμμετρική άποψη.

3.5 Σφάλματα Φακών - Υποβάθμιση γεωμετρικής ακρίβειας

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι το σημαντικότερο σφάλμα, που προκαλεί υποβάθμιση της γεωμετρικής πιστότητας μιας εικόνας είναι η **διαστροφή**, η οποία αφορά τη γεωμετρική θέση των ειδώλων.

Στην κλασική γλώσσα της οπτικής η διαστροφή ορίζεται ως η αστάθεια της μεγέθυνσης των (πλευρών των) αντικειμένων. Αν και ο ορισμός αυτός είναι σχετικά πολύ απλός και μπορεί να δώσει την αίσθηση της διαφοράς μεταξύ των πραγματικών και θεωρητικών εικονοσυντεταγμένων των αντικειμένων στο επίπεδο της εικόνας, που προκύπτουν λόγω διαφορετικής μεγέθυνσης, η πολυπλοκότητα δημιουργείται από τους διαφορετικούς τρόπους έκφρασης (ανάλογα με τον συγγραφέα) αυτής της διαφοράς: μερικές φορές ως σφάλμα και μερικές φορές ως διόρθωση (Lahoz, Méndez, & Rubio). Αλλά όλοι οι ορισμοί είναι στην πραγματικότητα οι ίδιοι και όλα τα μοντέλα καθορίζουν τον «εκτοπισμό» των σημείων από τις «κανονικές» (που επιβάλλουν οι νόμοι της προοπτικής προβολής) τους θέσεις από το πρωτεύον σημείο, είτε σε μεγαλύτερη απόσταση (μηνοειδής παραμόρφωση) είτε σε μικρότερη (πιθοειδής παραμόρφωση) από αυτό (αναλυτικά στη παράγραφο 3.5.2).

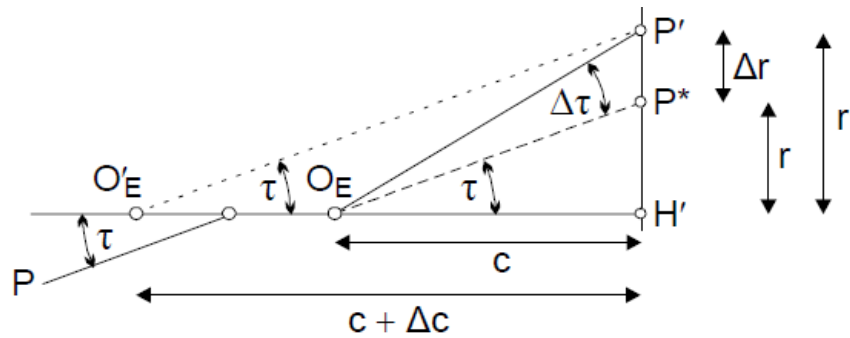
Η διαστροφή οφείλεται σε δυο κυρίως ατέλειες των φακών, οι οποίες απαντώνται στα περισσότερα συστήματα φακών και που δημιουργούν αντίστοιχα δυο τύπους διαστροφής.

3.5.1 Συμμετρική Ακτινική διαστροφή (radial distortion)

Η πρώτη είναι συνήθης εκτροπή, αναπτυχθείσα από τον *Seidel* και οφείλεται στο γεγονός, ότι η κεντρική ακτίνα της δέσμης δεν διέρχεται από το κέντρο του φακού (Μπαντέκας, 1980). Συναντάται και σαν παραμόρφωση *Seidel* (δr_s) από κάποιους συγγραφείς (Πατιάς, 1994). Το σφάλμα αυτό προκαλεί μια ακτινική μετατόπιση των ειδώλων από τον οπτικό άξονα, είναι **συμμετρική** ως προς αυτόν και καλείται **ακτινική διαστροφή** (*radial distortion*).

Εξ αιτίας της, οι προβολικές ακτίνες δεν εξέρχονται από τον φακό με την ίδια γωνία με την οποία προσπίπτουν, με αποτέλεσμα οι ευθείες του χώρου να μην απεικονίζονται ως ευθείες, αλλά καμπυλωμένες, διαφοροποιώντας ταυτόχρονα την μεγέθυνση των ειδώλων στο εστιακό επίπεδο, με την διαφοροποίηση αυτή να είναι γενικώς συμμετρική ως προς το κέντρο του φακού (ακτινική συμμετρική διαστροφή), λόγω της εκ περιστροφής κατασκευής του (Γεωργόπουλος, 1998). Οι αποκλίσεις που προκαλεί, είναι μηδενικές στο κέντρο της εικόνας, ενώ μεγιστοποιούνται στις μεγαλύτερες αποστάσεις από το κέντρο, δηλαδή στις τέσσερις γωνίες της εικόνας.

Έτσι με μια απλούστευση στο Σχήμα 3-12, ορίζεται η σχέση στα εμπλεκόμενα μεγέθη με τη βοήθεια του Σχήμα 3-14 που ακολουθεί.



Σχήμα 3-14: Ακτινική διαστρόφη

Πηγή: Πέτσα, 2000

Στο Σχήμα 3-14, φαίνεται το εικονοσημείο P' (απεικόνιση του P) να απεικονίζεται σε ακτινική απόσταση r' αντί της ορθής θέσης του P^* (στην ακτινική απόσταση r) που επιβάλλει η κεντρική προβολή ($r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}$). Το μέγεθος της ακτινικής διαστρόφης Δr , προσδιορίζεται ως:

$$\Delta r = r' - c \cdot \tan \tau = r' - r \quad (3.5-1)$$

δηλαδή ως διαφορά της πραγματικής αποστάσεως του ειδώλου από το κέντρο της εικόνας μείον τη θεωρητική απόστασή του. Εάν θεωρηθεί ότι το μοντέλο της κεντρικής προβολής δεν έχει σφάλματα, η ορθή θέση P^* του σημείου P , θα ήταν σε ακτινική απόσταση r , η οποία δίνει τη λεγόμενη *συνάρτηση της εικόνας*:

$$r = c \cdot \tan \tau \quad (3.5-2)$$

Επομένως, στις τρεις βασικές παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού (x_o, y_o, c), που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.1, έρχονται να προστεθούν και οι διορθώσεις που επιφέρονται λόγω της διαστρόφης, για να διαμορφωθεί τελικά η συνάρτηση της εικόνας, που εκφράζει την κεντρική προβολή συνδέοντας γωνίες του χώρου (γωνία τ) με στοιχεία της εικόνας (ακτινική απόσταση r) μέσω παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού (σταθερά c της μηχανής και διαστρόφη). Με τον συνυπολογισμό των σφαλμάτων, οι ισοδύναμες εκφράσεις της συνάρτησης της εικόνας, διαμορφώνονται ως εξής:

$$r' = c \cdot \tan \tau + \Delta r$$

$$r' = c \cdot \tan(\tau + \Delta \tau) \quad (3.5-3)$$

$$r' = (c + \Delta c) \cdot \tan \tau$$

Το πρόβλημα στον προσδιορισμό της ακτινικής διαστρόφης είναι το ότι, ενώ κάποιος μπορεί να παρατηρήσει και επομένως να μετρήσει την τιμή της γωνίας τ και την ακτινική απόσταση r , που προκύπτει από αυτή, είναι αδύνατον να μετρήσει την πρωτεύουσα απόσταση c . Αντιθέτως, η γνώση για την πρωτεύουσα απόσταση, συμπεραίνεται από αυτό που απαιτείται να υπολογιστεί: την ακτινική διαστρόφη, που ήδη έχει οριστεί ως συνάρτηση της ίδιας της πρωτεύουσας απόστασης.

Έτσι ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της ακτινικής διαστρόφης, που έχει υιοθετηθεί και χρησιμοποιηθεί από αρκετούς συγγραφείς, είναι να θεωρείται σαν μια μεταβολή της πρωτεύουσας απόστασης, συναρτήσει και αυτή της γωνίας των οπτικών ακτίνων, κάτι που εκφράζεται από τις παραπάνω εξισώσεις (3.5-3). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το πρόβλημα της υπόθεσης μιας σταθερής φυσικής διάστασης, όπως ορίζεται δηλαδή η εστιακή απόσταση (*focal length*) f , και δεν αναζητείται έτσι ένα συγκεκριμένο σημείο ως κέντρο, το οποίο βεβαίως θα υπάρχει. Η αναζήτησή του είναι ανώφελο να γίνει, καθώς μια εκλεγμένη τιμή για την πρωτεύουσα απόσταση c , είναι πάντα μια καλή επιλογή, εάν συνυπολογιστεί και η διαφορά Δc . Αυτή η διαφορά Δc , δημιουργεί και μια συγκεκριμένη κατανομή της διαφοράς Δr (Σχήμα 3-14) της θέσης κάθε σημείου της εικόνας, από την ιδεατή του θέση r (Lahoz, Méndez, & Rubio).

Επομένως υπάρχουν ουσιαστικά άπειροι συνδυασμοί των Δr και c , που να ικανοποιούν τις ισοδύναμες εκφράσεις της συνάρτησης της εικόνας (3.5-3). Μια αυθαίρετα εκλεγμένη τιμή

του c δίνει κάποιες τιμές του Δr , ενώ μεταβολή του c κατά Δc , θα επιφέρει μεταβολή του Δr κατά $\delta_{\Delta r} = \Delta c \cdot \tan \tau$.

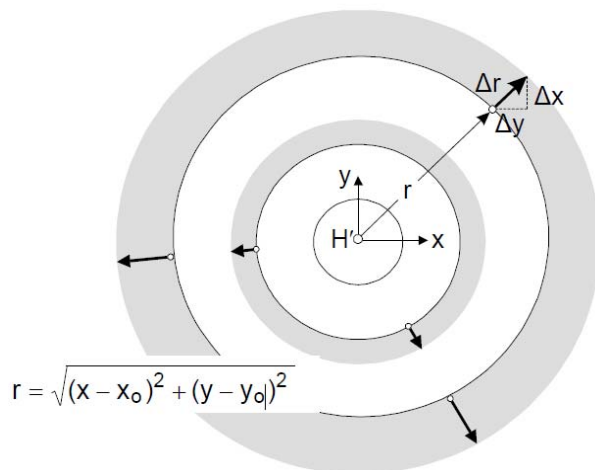
Η εστιακή απόσταση, που προσδιορίζεται με αυτόν τον τρόπο και παρέχει την ελάχιστη ακτινική διαστρόφη, ονομάζεται **διορθωμένη εστιακή απόσταση** (Μπαντέκας, 1980) ή **πρωτεύουσα απόσταση** ή **σταθερά c της μηχανής** και η εύρεση του συνδυασμού των c , Δr που περιγράφουν κατά το δυνατόν πιστότερα τη συγκεκριμένη κεντρική προβολή, είναι το ζητούμενο του προσδιορισμού των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού (Πέτσα, 2000), δηλ. της βαθμονόμησης.

Εξετάζοντας τα όμοια τρίγωνα στο Σχήμα 3-14, εξάγεται ότι:

$$\frac{r}{c} = \frac{r + \Delta r}{c + \Delta c} \Leftrightarrow \Delta r = \Delta c \cdot \frac{r}{c} \quad (3.5-4)$$

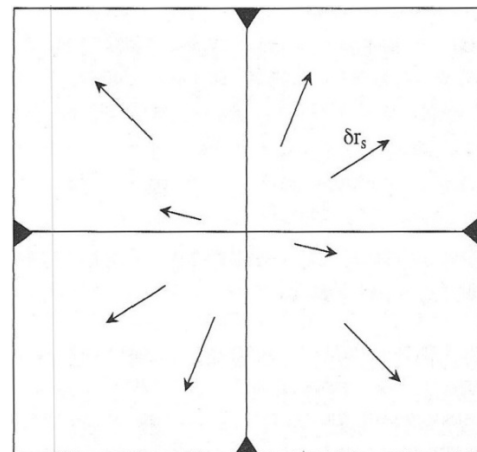
δηλαδή η διαστρόφη είναι ανάλογη του r , ισοδυναμώντας με μια ενιαία γραμμική μεταβολή κλίμακας στην εικόνα.

Στην πραγματικότητα δηλαδή, η ακτινική διαστρόφη (Δr), εισάγει μια **μεταβολή κλίμακας**, που είναι ενιαία για κάθε ακτινική απόσταση r στην εικόνα, είναι δηλαδή συνάρτηση της ακτινικής απόστασης r από το κέντρο της εικόνας ή ακριβέστερα από το πρωτεύον σημείο (Πέτσα, 2000).



Σχήμα 3-15: Επίδραση της ακτινικής διαστρόφης

Πηγή: Πέτσα, 2000



Σχήμα 3-16: Ακτινική διαστρόφη

Πηγή: Πατιάς, 1994

Αντίστροφα κάθε ενιαία μεγέθυνση ή σμίκρυνση της εικόνας προερχόμενη από την ακτινική διαστρόφη, μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω μιας μεταβολής του c κατά την κατάλληλη ποσότητα Δc , αναδεικνύοντας έτσι τον αληθινό χαρακτήρα της σταθεράς της μηχανής, ως συντελεστή κλίμακας ή ακριβέστερα ως μαθηματικής σταθεράς με διαστάσεις μήκους (Πέτσα, 2000).

3.5.2 Κατηγορίες συμμετρικής ακτινικής διαστρόφης

Η ακτινική διαστρόφη επηρεάζεται κατά μέγεθος και μορφή, από τη θέση του διαφράγματος. Ακολουθούν παραδείγματα (Σχήμα 3-18) των δύο διαφορετικών υποκατηγοριών της ακτινικής παραμόρφωσης, που είναι δυνατόν να ενυπάρχουν σε μία εικόνα. Εάν εξεταστεί ένα ορθογώνιο πλέγμα ως αντικείμενο, στο πεδίο της εικόνας θα παρουσιαστεί σαν ένα πλέγμα καμπυλωμένο. Αυτό γίνεται γιατί η εγκάρσια μεγέθυνση, σε ένα σύστημα με παραμόρφωση, αλλάζει συναρτήσει της απόστασης από τον οπτικό άξονα.

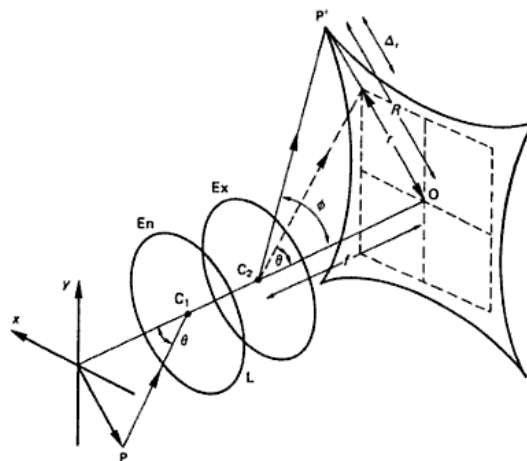
- **Πιθοειδής ή αρνητική διαστρόφη (Barrel distortion)**

Σε αυτό το είδος παραμόρφωσης, το διάφραγμα βρίσκεται εμπροσθεν του φακού. Η οπτική μεγέθυνση της εικόνας μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από τον οπτικό άξονα (που διέρχεται από το κέντρο της εικόνας) και τότε το σχήμα της εικόνας του πλέγματος που θα

ληφθεί, θα είναι βαρελοειδές “Barrel”. Έτσι, σαν αποτέλεσμα, η σκηνή φαίνεται να έχει προσαρμοστεί επάνω σε μία σφαιρική επιφάνεια. Τυπική κατηγορία φακών που εισάγουν αυτό το είδος παραμόρφωσης είναι οι υπερευρυγώνιοι φακοί (*fish-eye lenses*), που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε φωτογραφικές μηχανές και βιντεοκάμερες.

• **Μηνοειδής ή θετική διαστροφή (*Pincushion distortion*)**

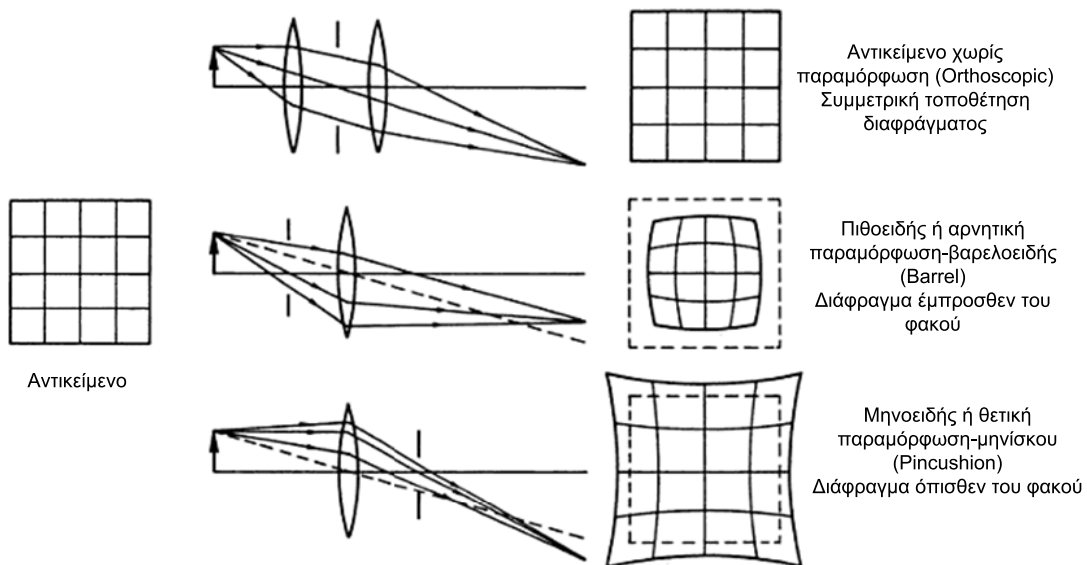
Εδώ συναντάμε την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά από το φακό, δηλαδή ενώ το διάφραγμα βρίσκεται πίσω από τον φακό, το επίπεδο μεγέθυνσης της εικόνας αυξάνει καθώς απομακρυνόμαστε από τον οπτικό άξονα, με αύξηση της γωνίας εξόδου των προσιπτουσών ακτίνων. Τότε, το σχήμα της εικόνας θα είναι “*Pincushion*” (δηλ. σαν ένα μαξιλαράκι με καρφίτσες) ή σαν ένα μηνισκοειδές (ή μηνοειδές). Τυπική κατηγορία φακών που σχετίζονται με αυτό το είδος παραμόρφωσης, είναι συνήθως οι φθινοί τηλεφακοί (*telephoto lenses*) (Ray, 2002).



Σχήμα 3-17: Pincushion distortion

Πηγή: Ray, 2002

Η έκφραση της διαστροφής ως «σφάλμα», όπως δόθηκε στην εξίσωση (3.5-1), αποτελεί το κριτήριο της προσήμανσης για τους ορισμούς της αρνητικής και θετικής διαστροφής, που αναφέρθηκαν πριν, θεωρώντας θετική την παραμόρφωση της εικόνας προς τα έξω και αρνητική την αντίθετή της (Lahoz, Méndez, & Rubio). Λόγω του διαφορετικού τρόπου προσέγγισης της διαστροφής ως σφάλμα ή διόρθωση από διάφορους συγγραφείς, όπως αναφέρθηκε, ενδέχεται και η προσήμανση να είναι αντίθετη, με το ίδιο όμως αποτέλεσμα.



Σχήμα 3-18: Θετική και αρνητική ακτινική παραμόρφωση

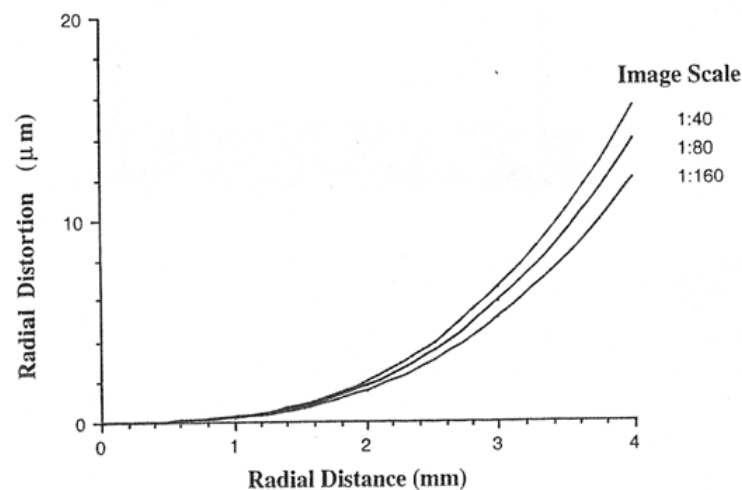
Πηγή: Ray, 2002

Μια ανάμειξη των δυο αυτών τύπων παραμόρφωσης, που είναι λιγότερο συνηθισμένη αλλά όχι και σπάνια, αναφέρεται ως παραμόρφωση τύπου «μουστάκι» (*moustache distortion*). Ξεκινά ως πιθοειδής (*barrel*) παραμόρφωση κοντά στο κέντρο της εικόνας και σταδιακά μετατρέπεται σε μηνοειδή (*pincushion*) προς την περιφέρεια της εικόνας, μοιάζοντας έτσι σαν ένα «μουστάκι» ([http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(optics))).

3.5.3 Μοντελοποίηση συμμετρικής ακτινικής διαστρωφής

Στην παράγραφο 3.5.1, παρουσιάστηκε μια αντιμετώπιση του προβλήματος της ακτινικής διαστρωφής σε σχέση με τη γωνία των οπτικών ακτίνων, αλλά και της πρωτεύουσας απόστασης c , που οδήγησαν στις ισοδύναμες μορφές της συνάρτησης της εικόνας.

Η *οπτική ή Γκαουσιανή ακτινική διαστρωφή* περιγράφει το μέγεθος της ακτινικής διαστρωφής, όταν χρησιμοποιείται ως βάση για τους υπολογισμούς η ονομαστική τιμή της πρωτεύουσας απόστασης (Atkinson, 1996). Αναφέρεται δηλαδή στην εστιακή απόσταση f και είναι χαρακτηριστική για κάθε φακό (Γεωργόπουλος, 1998). Το επόμενο Σχήμα 3-19, δείχνει ότι το μέγεθος αυτών των διαστρωφών μεταβάλλεται με την ακτινική απόσταση και μπορεί να αλλάξει με την εστίαση.



Σχήμα 3-19: Γκαουσιανή ακτινική διαστρωφή σε διάφορες κλίμακες εικόνας για το φακό Fujinon 25mm, τοποθετημένο σε μηχανή CCD Pulnix

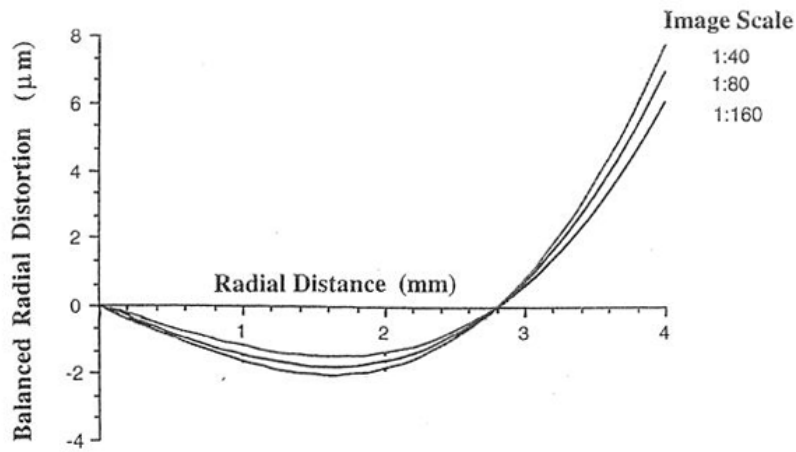
Πηγή: Atkinson, 1996

Λόγω του ότι η ακτινική διαστρωφή και η πρωτεύουσα απόσταση c δεν είναι καλά ορισμένες, καθώς η μια παράμετρος ορίζεται σε σχέση με την άλλη όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.5-1), απαιτείται ένα τουλάχιστον επιπλέον κριτήριο για τον ορισμό της ακτινικής διαστρωφής.

Η «ισορροπημένη» ακτινική διαστρωφή (*balanced radial distortion*), είναι ο όρος που χρησιμοποιείται όπου η Γκαουσιανή καμπύλη έχει μετασχηματιστεί μαθηματικά με τη μετατόπιση της πρωτεύουσας απόστασης κατά μια ποσότητα Δc , η οποία έχει επιλεγεί έτσι ώστε:

- Η μέση τιμή της μετασχηματισμένης καμπύλης της διαστρωφής σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση r_0 να είναι μηδέν, όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 3-20, ή
- Η μέση τιμή του τετραγώνου της διαστρωφής σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση να είναι ελάχιστη, ή
- Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της διαστρωφής σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση να είναι ίσες $|\max \Delta r| = |\min \Delta r|$ (Atkinson, 1996).

Οι εκφράσεις της μεταβολής Δc για τις περιπτώσεις αυτές, παρουσιάζονται στη συνέχεια της παραγράφου.



Σχήμα 3-20: Διαγράμματα «ισορροπημένης» ακτινικής διαστρώσης σε διάφορες κλίμακες εικόνας για το φακό Fujinon 25mm, τοποθετημένο σε μηχανή CCD Pulnix

Πηγή: Atkinson, 1996

Η διαφορά μεταξύ των δυο αυτών γραφικών παραστάσεων, μπορεί να θεωρηθεί ως η κλίση του άξονα τετμημένων κατά τη γωνία που απαιτείται, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή μαθηματική συνθήκη. Αυτή η γωνία συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση της ακτινικής διαστρώσης, μέσω του όρου $K_0 r$, όπως φαίνεται στην σχέση (3.5-8), που ακολουθεί.

Σε έναν τέτοιου είδους μαθηματικό μετασχηματισμό, δεν υπάρχει κάποιο υπολογιστικό πλεονέκτημα, εκτός από τη δυνατότητα που παρέχεται στον κατασκευαστή φακών να παρουσιάσει μια γραφική παράσταση με μικρή ακτινική διαστρώση. Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για την έκφραση της Γκαουσιανής ακτινικής διαστρώσης.

Η ακτινική διαστρώση εκφράζεται ως πολυώνυμο περιττών δυνάμεων του r ως εξής (Brown, 1968):

$$\Delta r = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 + \dots \quad (3.5-5)$$

Όπου: x_0, y_0 οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου,

x, y οι παρατηρούμενες εικονοσυντεταγμένες ενός σημείου,

$\bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0$, οι εικονοσυντεταγμένες με αρχή το πρωτεύον σημείο

$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, η ακτινική απόσταση και

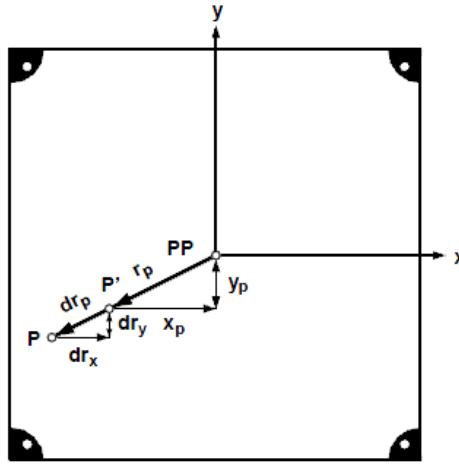
$K_1, K_2, K_3, K_5, \dots$ συντελεστές της ακτινικής διαστρώσης, που αντιστοιχούν σε άπειρη εστίαση.

Η διαστρώση αυτή, μοιράζεται στις κατά x και y συνιστώσες της $\Delta x_r, \Delta y_r$, με τις οποίες θα διορθωθούν οι, ανηγμένες πλέον ως προς το πρωτεύον σημείο, εικονοσυντεταγμένες:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_r &= \frac{\bar{x}}{r} \Delta r = \frac{\bar{x}}{r} \cdot (K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 + \dots) \\ \Delta y_r &= \frac{\bar{y}}{r} \Delta r = \frac{\bar{y}}{r} \cdot (K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 + \dots) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (3.5-6)$$

$$\Delta x_r = \bar{x} \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6 + \dots)$$

$$\Delta y_r = \bar{y} \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6 + \dots)$$



Σχήμα 3-21: Διόρθωση ακτινικής διαστρώσης

Πηγή: Schenk, 2005

Όπως έδειξε ο Brown το 1956, η εξίσωση της ακτινικής διαστρώσης Δr (3.5-5), που αναφέρεται σε μια πρωτεύουσα απόσταση c μπορεί να μετασχηματιστεί σε μια ισοδύναμη συνάρτηση διαστρώσης Δr_b , την «ισορροπημένη» ακτινική διαστρώση, η οποία είναι συσχετισμένη με μια αυθαίρετα ορισμένη πρωτεύουσα απόσταση $c + \Delta c$. Ο μετασχηματισμός αυτός εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Delta r_b = \left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right) \cdot \Delta r + \frac{\Delta c}{c} \cdot r \quad (3.5-7)$$

Η οποία οδηγεί στην έκφραση της «ισορροπημένης» μορφής της ακτινικής διαστρώσης:

$$\Delta r_b = K'_0 \cdot r + K'_1 \cdot r^3 + K'_2 \cdot r^5 + K'_3 \cdot r^7 + \dots \quad (3.5-8)$$

$$\text{με: } K'_0 = \frac{\Delta c}{c}, K'_1 = \left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right) \cdot K_1, K'_2 = \left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right) \cdot K_2, \dots, K'_i = \left(1 + \frac{\Delta c}{c}\right) \cdot K_i$$

Ο όρος K'_0 , αντιστοιχεί σε μια ενιαία μεταβολή της κλίμακας της εικόνας και εξαλείφεται με κατάλληλη αλλαγή της εστιακής απόστασης, οπότε το πολυώνυμο λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (3.5-5) (Μπαντέκας, 1980). Η κατάλληλη αυτή αλλαγή, μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποιον από τους εξής τρόπους:

Καταρχάς μπορεί να γίνει, αναγκάζοντας τη μετασχηματισμένη συνάρτηση της ακτινικής διαστρώσης να πάρει την τιμή μηδέν, σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση r_0 . Συνεπώς, εάν Δr_0 , είναι η τιμή της ακτινικής διαστρώσης σε αυτή την απόσταση r_0 , προκύπτει από την σχέση (3.5-7) ότι:

$$\Delta c = - \left(\frac{c}{r_0 + \Delta r_0} \right) \Delta r_0 \quad (3.5-9)$$

Εναλλακτικά, η ποσότητα Δc μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε η μέση τιμή της συνάρτησης της ακτινικής διαστρώσης να πάρει την τιμή μηδέν σε μια καθορισμένη απόσταση r_0 . Αυτό προκύπτει από την επιλογή:

$$\Delta c = - \frac{w \cdot c}{w + \frac{1}{2} r_0^2} \quad (3.5-10)$$

Με:

$$w = \int_0^{r_0} \Delta r dr = \frac{r_0^4}{2} \left(\frac{K_1}{2} + \frac{K_2}{3} r_0^2 + \frac{K_3}{4} r_0^4 + \dots \right) \quad (3.5-11)$$

Μία ακόμη επιλογή συνίσταται στον μετασχηματισμό της συνάρτησης της διαστρώσης με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*rms*) της διαστρώσης

σε μια καθορισμένη απόσταση r_0 . Αυτό μπορεί να γίνει επιλέγοντας μεταβολή:

$$\Delta c = -\frac{(s+w) \cdot c}{2s+w+r_0^2} \quad (3.5-12)$$

με την ποσότητα w να δίνεται από την σχέση (3.5-11) και την s από την (3.5-13):

$$s = \int_0^{r_0} r \Delta r dr = r_0^5 \left(\frac{K_1}{5} + \frac{K_2}{7} r_0^2 + \frac{K_3}{9} r_0^4 + \dots \right) \quad (3.5-13)$$

Ο τελικός μετασχηματισμός, που μπορεί να θεωρηθεί, είναι εκείνος κατά τον οποίο η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της διαστροφής να είναι σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση ίσες σαν απόλυτες τιμές: $|\max \Delta r| = |\min \Delta r|$. Η καταλληλότερη τιμή για το Δc σε αυτή τη περίπτωση βρίσκεται με μια διαδικασία δυο σταδίων.

Αρχικά επιλέγεται μια αρχική τιμή Δc_0 , σύμφωνα με κάποια από τις σχέσεις (3.5-10) ή (3.5-12). Στη συνέχεια προσδιορίζεται η κλίση m μιας ευθείας γραμμής, η οποία διερχόμενη από το αρχικό σημείο είναι τέτοια, ώστε οι μέγιστες θετικές και αρνητικές αποκλίσεις της μετασχηματισμένης συνάρτησης της διαστροφής από τη γραμμή, να είναι αναλόγου μεγέθους. Ο προσδιορισμός αυτός μπορεί να γίνει είτε γραφικά (με τη βοήθεια ενός διαφανούς χάρακα) είτε αριθμητικά (με τη μέθοδο δοκιμών). Σε κάθε περίπτωση, η τελική τιμή για τη μεταβολή της σταθεράς της μηχανής, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta c = \Delta c_0 - m(c + \Delta c_0) \quad (3.5-14)$$

Όλα τα παραπάνω είδη μετασχηματισμών, αποδίδουν προβολικά ισοδύναμα αποτελέσματα. Όταν η ποσότητα $\Delta c/c$ είναι μικρή (όπως συνήθως συμβαίνει), το σφάλμα στη βαθμονομημένη τιμή της c , δεν έχει καμιά πρακτική επίδραση στο μετασχηματισμό και μπορεί με ασφάλεια να αγνοηθεί. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της αναλυτικής προσέγγισης της βαθμονόμησης είναι ο εύκολος υπολογισμός της μετάδοσης σφάλματος στα τελικά αποτελέσματα, κάτι που δεν προσφέρουν οι εργαστηριακές μέθοδοι βαθμονόμησης (Brown, 1968).

Για τους περισσότερους φακούς, που βρίσκονται στις μη μετρητικές μηχανές των 35mm και 70mm, μόνο οι όροι K_0 και K_1 , είναι σημαντικοί για την περιγραφή της ακτινικής διαστροφής στο μέγεθος του μm . Για τους ευρυγώνιους φακούς και εκείνους που χρησιμοποιούνται στις μετρητικές μηχανές, μπορεί να απαιτούνται και οι όροι K_2 και K_3 (Atkinson, 1996).

Η *United States Geological Services*, χρησιμοποιεί το μοντέλο της «ισορροπημένης» ακτινικής διαστροφής, που πρότεινε ο Brown, χρησιμοποιώντας τους όρους K_0 έως K_3 :

$$\Delta r = K_0 \cdot r + K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 \quad (3.5-15)$$

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την ακτινική διαστροφή από την *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, είναι το:

$$\Delta r = K_1 \cdot r \cdot (r^2 - r_0^2) + K_2 \cdot r \cdot (r^4 - r_0^4) + K_3 \cdot r \cdot (r^6 - r_0^6) \quad (3.5-16)$$

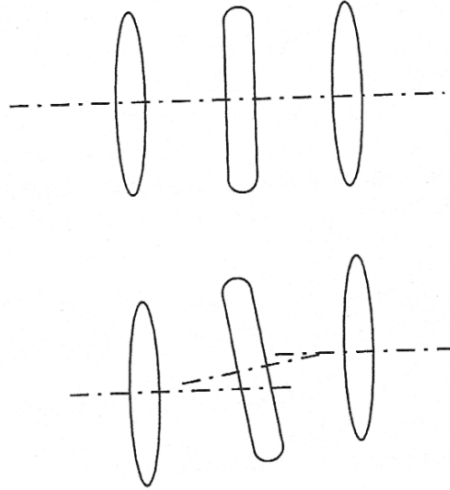
Σημειώνεται ότι το μοντέλο αυτό, μπορεί εύκολα να αναγνωρισθεί από το μοντέλο της *USGS*, αν υποθεθεί ότι $-K_0 = r_0^2 \cdot (K_1 + K_2 \cdot r_0^2)$

3.5.4 Ασύμμετρη διαστροφή εκκεντρότητας (decentring distortion)

Ο δεύτερος τύπος διαστροφής, προέρχεται από την πρακτική αδυναμία ευθυγραμμίσεως των οπτικών αξόνων των φακών, οι οποίοι σχηματίζουν ένα σύστημα φακών (Σχήμα 3-22), από ανωμαλίες στις επιφάνειές τους και από τυχόν κλίσεις του εστιακού επιπέδου σε σχέση με τον άξονα των φακών (Spriggs, 1966).

Η παραμόρφωση αυτή είναι ασύμμετρης μορφής και μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες: σε μια ακτινική Δr_r και σε μια εγκάρσια Δr_t (Σχήμα 3-23), όπου η πρώτη από αυτές είναι της τάξης των 10 μm ενώ η δεύτερη της τάξης των 3 μm (Πατιάς, 1994).

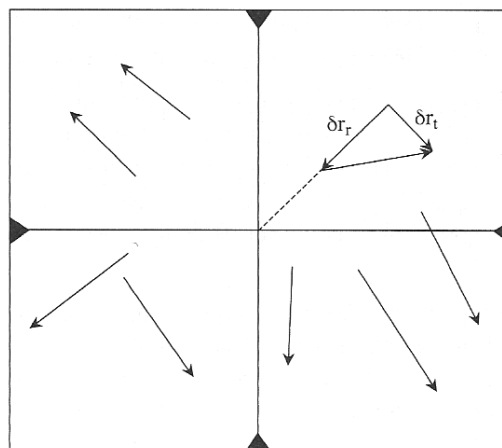
Ο γεωμετρικός τύπος των σημείων, που εμφανίζουν αυτού του είδους την παραμόρφωση, δεν είναι κυκλικός (=συμμετρικός), γύρω από το πρωτεύον σημείο, όπως στο Σχήμα 3-15, γι' αυτό και αυτού του είδους η παραμόρφωση ονομάζεται «ασύμμετρη».



Σχήμα 3-22: Απόκλιση από την ευθυγράμμιση των στοιχείων ενός φακού

Πηγή: Atkinson, 1996

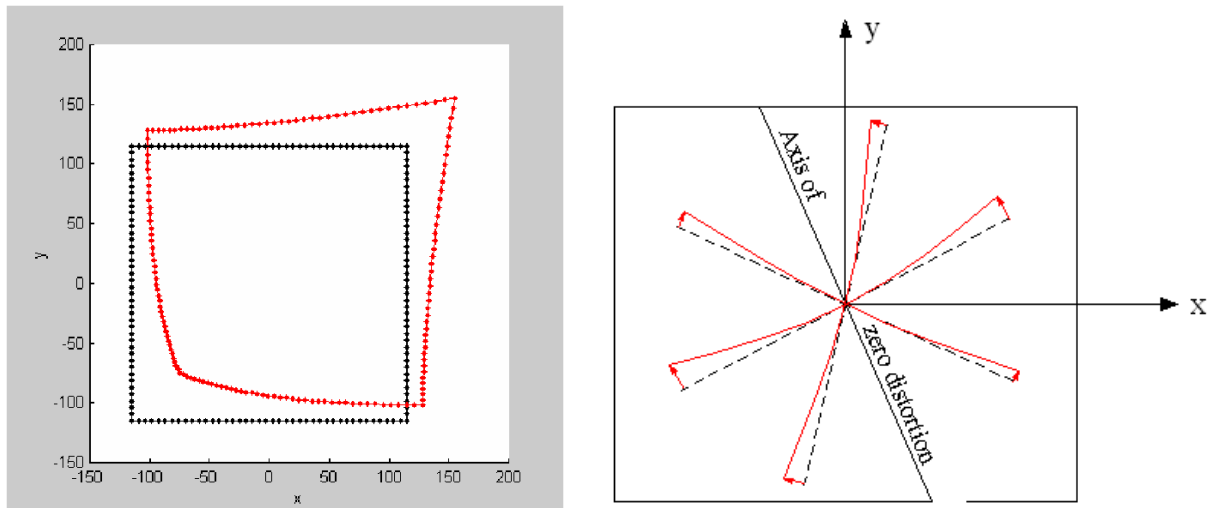
Οι τιμές της ακτινικής και της εφαπτομενικής διαστρόφης προκύπτουν από τις διαδικασίες διακρίβωσης των μηχανών και συνήθως δίνονται από τους κατασκευαστές των φωτογραμμετρικών μηχανών στο πιστοποιητικό διακρίβωσης που συνοδεύει τις μηχανές αυτές (Γεωργόπουλος, 1998).



Σχήμα 3-23: Ασύμμετρη διαστρόφη εκκεντρότητας

Πηγή: Πατιάς, 1994

Η επίδραση του σφάλματος αυτού είναι κατά πολύ (περίπου το 1/20) μικρότερη από την αντίστοιχη της ακτινικής διαστρόφης και το αποτέλεσμα παραμόρφωσης που προκαλεί, είναι μια ευθεία του αντικειμένου να εμφανίζεται ως καμπύλη στην εικόνα, ακόμη και αν διέρχεται από το πρωτεύον σημείο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-24, που ακολουθεί.



Σχήμα 3-24: Επίδραση ασύμμετρης διαστρώσης εκκεντρότητας

Πηγή: Αριστερά: www.usgs.gov, Δεξιά: www.ferris.edu

Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί και εδώ, για την αντιμετώπιση της διαστρώσης αυτής, για την οποία επιπρόσθετα αναφέρεται ότι από κάποιους συγγραφείς χαρακτηρίζεται ως εφαπτομενική διαστρώση (πχ Atkinson, 1996).

Μπορεί δε, να γίνει μια γραφική παράσταση της εφαπτομενικής διαστρώσης, με τρόπο ανάλογο της ακτινικής (Atkinson, 1996; Luhmann, 2010), με την εξής συνάρτηση:

$$P(r) = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \cdot r^2 \quad (3.5-17)$$

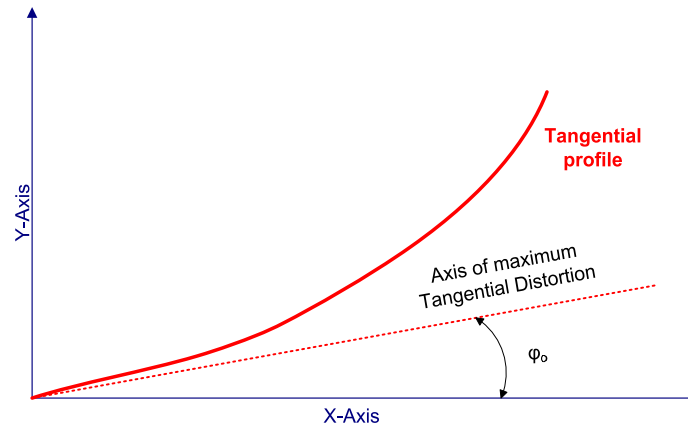
όπου οι παράμετροι P_1 , P_2 αναφέρονται σε εστίαση στο άπειρο. Το αποτέλεσμα της εφαπτομενικής διαστρώσης μπορεί να αναπαρασταθεί με ικανοποιητική ακρίβεια σε πολυωνυμική μορφή με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= \left(1 - \frac{c}{S}\right) \cdot [P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y}] \\ \Delta y_d &= \left(1 - \frac{c}{S}\right) \cdot [P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1\bar{x}\bar{y}] \end{aligned} \quad (3.5-18)$$

Όπου: x_0 , y_0 οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου,
 x , y οι παρατηρούμενες εικονοσυντεταγμένες ενός σημείου,
 $\bar{x} = x - x_0$, $\bar{y} = y - y_0$, οι εικονοσυντεταγμένες με αρχή το πρωτεύον σημείο
 $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, η ακτινική απόσταση,
 c η πρωτεύουσα απόσταση για ένα φακό εστιασμένο σε απόσταση S από τη μηχανή.

Ένα χαρακτηριστικό της εφαπτομενικής διαστρώσης, είναι η γωνία φ_0 , η οποία εκφράζει τη γωνία που σχηματίζεται στο επίπεδο της εικόνας, από τον άξονα x και τον άξονα της μέγιστης ακτινικής διαστρώσης. Δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3.5-19)$$

Σχήμα 3-25: Γωνία φ_0 εφαπτομενικής διαστρόφηςΠηγή: www.ferris.edu

Ένα από τα πρώτα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να περιγράψουν το σύνολο της ασύμμετρης παραμόρφωσης εκκεντρότητας, ήταν το μοντέλο του «λεπτού πρίσματος» από τον *Brown* το 1964. Το μοντέλο αυτό προερχόταν από προηγούμενες παρατηρήσεις του *Washer* το 1956, σύμφωνα με τις οποίες η χρήση λεπτών πρισμάτων μπορεί να διορθώσει τις μετατοπίσεις των σημείων, εξ αιτίας της ασύμμετρης παραμόρφωσης εκκεντρότητας.

Το μοντέλο «λεπτού πρίσματος» του *Brown*, συγκρίθηκε με ένα μοντέλο που είχε προταθεί από τον *Conrady* (1917) μέσω της απευθείας αναλυτικής παρατήρησης των διερχόμενων ακτίνων, από ένα μη ευθυγραμμισμένο σύστημα φακών. Το μοντέλο αυτό, προέβλεπε αντίστοιχα για την ακτινική και εφαπτομενική συνιστώσα της παραμόρφωσης εκκεντρότητας ότι:

$$\begin{aligned}\Delta r &= 3P_r \cdot \sin(\varphi - \varphi_0) \\ \Delta t &= P_r \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)\end{aligned}\quad (3.5-20)$$

Όπου: $P_r = J_1 r^2 + J_2 r^4 + J_3 r^6 + \dots$, η συνάρτηση του προφίλ της διαστρόφης,

φ , η γωνία μεταξύ του θετικού άξονα x και της ευθείας προς το σημείο

της εικόνας ($\varphi = \arcsin\left(\frac{\bar{x}}{r}\right) = \arccos\left(\frac{\bar{y}}{r}\right)$) και

φ_0 , η γωνία που σχηματίζεται στο επίπεδο της εικόνας, από τον άξονα x και τον άξονα της μέγιστης ακτινικής διαστρόφης.

Στο μοντέλο του «λεπτού πρίσματος», ο παράγοντας 3 στην έκφραση του Δr , είχε αντικατασταθεί από τη μονάδα. Και τα δυο μοντέλα πάντως, απαιτούσαν τον προσδιορισμό των παραμέτρων φ , φ_0 , J_1 , J_2 κτλ.

Ο *Brown* το 1968 έδειξε ότι το μοντέλο του *Conrady*, μπορεί να εκφραστεί ως διόρθωση στις κατά x και y συνιστώσες μέσω των εξισώσεων:

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= [1 + P_3 r^2 + P_4 r^2] \cdot [P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y}] \\ \Delta y_d &= [1 + P_3 r^2 + P_4 r^2] \cdot [P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x}\bar{y}]\end{aligned}\quad (3.5-21)$$

Όπου:

$$P_1 = -J_1 \sin \varphi_0, P_2 = J_1 \cos \varphi_0, P_3 = \frac{J_2}{J_1}, P_4 = \frac{J_3}{J_1}\quad (3.5-22)$$

Το μοντέλο αυτό τυγχάνει ευρείας αποδοχής από μεγάλους οργανισμούς, πχ *USGS*, ενώ από το σύνολο σχεδόν των συγγραφέων χρησιμοποιείται μόνο κατά τις δυο παραμέτρους P_1 και P_2 :

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= [P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y}] \\ \Delta y_d &= [P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x}\bar{y}]\end{aligned}\quad (3.5-23)$$

3.6 Λοιπά Γεωμετρικά Σφάλματα

Η όλη διαδικασία της φωτογράφισης συνδέεται με μια ποικιλία σφαλμάτων τόσο τυχαίων όσο και συστηματικών, επιπρόσθετα στα σφάλματα των φακών που προαναφέρθηκαν, των οποίων η επίδραση στις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού είναι αξιοσημείωτη και πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται υπ' όψη. Από αυτά, βολική είναι η κατηγοριοποίηση των **συστηματικών σφαλμάτων**, στις ακόλουθες δυο κατηγορίες (Brown, 1968):

- Προσωρινά ή παροδικά συστηματικά σφάλματα
- Συνεχή ή εμμένοντα συστηματικά σφάλματα

Τα προσωρινά συστηματικά σφάλματα είναι εκείνα τα οποία είναι μεν συστηματικά σε μια συγκεκριμένη εικόνα, αλλά ουσιαστικά είναι **ανεξάρτητα** από εικόνα σε εικόνα. Απ' την άλλη, παραμένοντα συστηματικά σφάλματα χαρακτηρίζονται εκείνα που παρουσιάζουν την τάση να παραμένουν υψηλά **συσχετισμένα** από εικόνα σε εικόνα.

Σε μια διαδικασία αναλυτικής βαθμονόμησης αναλογικών αερομηχανών με τη βοήθεια πολλών εικόνων θεωρείται, σχεδόν δεδομένος, ένας μεγάλος αριθμός πιθανών πηγών **παροδικών συστηματικών σφαλμάτων**. Μια λίστα τους μπορεί να περιλαμβάνει (Brown, 1968):

- Μεταβολές πάχους του συνδυασμού φιλμ-φωτογραφικού γαλακτώματος
- Μη ομοιόμορφη (ασταθής) διαστασιολόγηση του φιλμ
- Διαθλαστικές ανωμαλίες που προκαλούνται από τις αναταραχές της ατμόσφαιρας
- Τυχαίες τοπικές αδυναμίες συμμόρφωσης του φιλμ ακριβώς με το επίπεδο
- Γωνιακές κινήσεις της μηχανής κατά τη διάρκεια της φωτογραφικής έκθεσης
- Δυναμικές παραμορφώσεις της μηχανής, που προκαλούνται από τις επιταχύνσεις του αεροσκάφους ή και από τις διορθωτικές κινήσεις σταθεροποίησης της βάσης της μηχανής
- Παραμορφώσεις οφειλόμενες στις θερμοκρασιακές μεταβολές
- Συνιστώσες συστηματικών σφαλμάτων, που διαφοροποιούνται με το χρόνο και οφείλονται στο προσωπικό και τα όργανα μέτρησης επί των εικόνων.

Χωρίς αμφιβολία μπορούν να προστεθούν και άλλοι παράγοντες στον παραπάνω κατάλογο. Το θέμα είναι ότι ενώ η συνολική επίδραση τέτοιων σφαλμάτων είναι σημαντική σε μια δεδομένη εικόνα, τείνει να είναι ανεξάρτητη από εικόνα σε εικόνα. Απ' την άλλη, οι πηγές των **συνεχών (παραμενόντων) συστηματικών σφαλμάτων** σε μια βαθμονόμηση από λήψη αεροφωτογραφιών μπορεί να περιλαμβάνουν (Brown, 1968):

- Αποχές από την επιπεδότητα του κυλίνδρου του φιλμ
- Στιγμαϊές κλίσεις του κυλίνδρου κατά τη διάρκεια της έκθεσης (οφειλόμενο εν μέρει στην προηγούμενη αιτία)
- Επίδραση πρίσματος από το παράθυρο της καταπακτής του αεροπλάνου, λόγω διαφορών πίεσης και θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος
- Μόνιμες, μη αποκαθιστάμενες συνιστώσες της παραμόρφωσης του φιλμ
- Συστηματικά σφάλματα στο σύστημα αντιστάθμισης πρόσθιας κίνησης
- Σφάλματα μετρήσεων προσδιορισμού των επίγειων σημείων ελέγχου
- Μη αποκαθιστάμενα συστηματικά σφάλματα των οργάνων μέτρησης.

Τα σφάλματα αυτά μπορούν εν μέρει να αποκατασταθούν με τη χρήση των παραμέτρων της βαθμονόμησης. Έτσι για παράδειγμα ένας κύλινδρος φιλμ που ξεφεύγει από την επιπεδότητα εισάγει μια επίδραση, που μπορεί να απορροφηθεί από τους βαθμονομημένους συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής, ενώ μια στιγμιαία ελαφριά του κλίση τη στιγμή της έκθεσης αποκαθίσταται από την κατάλληλη επιλογή των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου (Brown, 1968).

3.7 Μοντελοποίηση Λοιπών Γεωμετρικών Σφαλμάτων

Η μεγάλη ποικιλία των σφαλμάτων και η άγνοια του ακριβούς τρόπου επίδρασής τους, δεν επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση καθενός από αυτά για την αποκατάστασή τους, διαδικασία η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί εν μέρει εμπειρικά, π.χ. με τη βοήθεια διορθωτικών πολυωνύμων, για κάποια από αυτά ή για μια ομάδα από αυτά ή για το σύνολό τους. Ωστόσο για τα σημαντικότερα από αυτά, έχουν γίνει προσπάθειες εύρεσης τρόπων αποκατάστασης της επίδρασής τους, παραδείγματα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.7.1 Παραμορφώσεις αναλογικών μηχανών

➤ *In-plane distortion*

Η κατεργασία (με τα συνήθη φωτογραφικά γαλακτώματα) και η μετέπειτα αποθήκευση του φιλμ, μπορεί να το συρρικνώσει και να επιδράσει στη διαφορετική κλίμακα και στη μη ορθογωνικότητα (στρέβλωση) των αξόνων του συστήματος αναφοράς της εικόνας (Estler, Edmundson, Peggs, & Parker). Οι παραμορφώσεις αυτές απαιτούν διόρθωση των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων με ένα πχ πολυωνυμικό μοντέλο της μορφής (Fraser, Shortis, & Ganci, 1995):

$$\begin{cases} \Delta x_f \\ \Delta y_f \end{cases} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i \begin{cases} b_{ij} \\ c_{ij} \end{cases} \bar{x}^{(i-j)} \bar{y}^j \quad (3.7-1)$$

Όπου b_{ij} και c_{ij} συντελεστές που προκύπτουν από τη διαδικασία της βαθμονόμησης και η σειρά αναπτύσσεται για τους όρους $n=3$ ή $n=4$. Στην επόμενη παράγραφο, συζητείται η επιλογή των μεθόδων διόρθωσης.

➤ *Out-of-plane distortion*

Η μη επιπεδότητα του εστιακού επιπέδου είναι ένα συστηματικό σφάλμα, το οποίο προκαλεί ακτινική μετατόπιση των σημείων, η οποία είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης των φωτεινών ακτίνων. Συνεπώς οι οξυγώνιοι φακοί με μεγάλη εστιακή απόσταση, επηρεάζονται λιγότερο από αυτό το σφάλμα, σε σχέση με τους ευρυγώνιους φακούς μικρής εστιακής απόστασης (Fraser, 1997). Αν πρόκειται για μηχανή με φιλμ, όπου η τοπογραφία του επιπέδου της εικόνας μπορεί να μετρηθεί απευθείας, οι μεταβολές των εικονοσυντεταγμένων μπορούν να μοντελοποιηθούν και μέσω πολυωνύμων τρίτου ή τετάρτου βαθμού, ως εξής:

$$\begin{cases} \Delta x_u \\ \Delta y_u \end{cases} = \begin{cases} \bar{x}/r \\ \bar{y}/r \end{cases} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i a_{ij} \bar{x}^{(i-j)} \bar{y}^j \quad (3.7-2)$$

Όπου a_{ij} είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου του μοντέλου της επιφανείας και η σειρά τυπικά περιορίζεται στους όρους $n=3$ ή $n=4$.

3.7.2 Επιλογή επιπρόσθετων παραμέτρων

Παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2.2 η διαδικασία διόρθωσης των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων εξαιτίας της επίδρασης μιας σειράς παραγόντων, όπως η ακτινική διαστροφή, η διάθλαση της ατμόσφαιρας κτλ. Παρά τις διορθώσεις αυτές, παρουσιάζεται η ανάγκη περαιτέρω βελτιστοποίησης των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων για αυτούς τους ίδιους τους παράγοντες, εκτός από την ανάγκη διόρθωσης εξαιτίας της ύπαρξης των συστηματικών σφαλμάτων που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.6, καθώς η διόρθωση της ακτινικής διαστροφής για παράδειγμα, μπορεί να προέρχεται από μια βαθμονόμηση της μηχανής, που πλέον δεν ισχύει. Επιπλέον, οι συντεταγμένες των εικονοσημάτων, από τις οποίες υπολογίζονται οι διορθώσεις για τις παραμορφώσεις του φιλμ, έχουν μετρηθεί σε θερμοκρασία διαφορετική από εκείνη της αεροφωτογράφισης και ακόμα η κατάσταση της ατμόσφαιρας τη στιγμή λήψης της φωτογραφίας είναι διαφορετική από την υπόθεση της τυπικής ατμόσφαιρας, στην οποία βασίστηκαν οι αντίστοιχες διορθώσεις (Kraus, 1997).

Για τις φωτογραφίες των μετρητικών μηχανών λοιπόν, θα πρέπει να προστεθούν επιπρόσθετες παράμετροι για τις διορθώσεις των υπολοίπων σφαλμάτων της διαστρωφής, των παραμορφώσεων του φιλμ κτλ, ενώ για τις ερασιτεχνικές μηχανές, που τα στοιχεία αυτά είναι συνήθως άγνωστα εξ αρχής, οι παράμετροι θα πρέπει να αναφέρονται στη συνολική διαστρωφή των φακών, των παραμορφώσεων κ.τ.λ.

Υπάρχει μια ποικιλία διαφορετικών προσεγγίσεων σε μοντέλα και παραμέτρους, για να αντισταθμιστούν τα συστηματικά και μη σφάλματα στο χώρο της εικόνας.

Η επίδραση των φαινομένων χωρίζεται σε ομάδες επιρροής και η επίδραση των μεμονωμένων ομάδων περιγράφεται από ένα κατάλληλο μοντέλο, το άθροισμα των οποίων δίνει το συνολικό μοντέλο, που διαμορφώνεται ως εξής (Stallmann, 2008):

$$\begin{aligned}\Delta x &= \Delta x_i + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_f + \Delta x_u \\ \Delta y &= \Delta y_i + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_f + \Delta y_u\end{aligned}\quad (3.7-3)$$

Όπου ο κάθε δείκτης αφορά:

- i : τον εσωτερικό προσανατολισμό
- r : την ακτινική διαστρωφή
- d : την εφαπτομενική διαστρωφή
- f : τις αφινικές παραμορφώσεις και
- u : την απόκλιση από την επιπεδότητα.

Οι επιπρόσθετες παράμετροι για να επιδράσουν στην επιθυμητή αποκατάσταση των σφαλμάτων, επιλέγονται με βάση δυο σχήματα: Ένα το οποίο επιλέγει τις παραμέτρους σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των σφαλμάτων της εικόνας (φυσική μοντελοποίηση) και ένα με τη μορφή συντελεστών πολυωνύμων (μαθηματική μοντελοποίηση), όπως αναφέρθηκε, όπου οι συντεταγμένες κατά x και κατά y , έχουν τα δικά τους ξεχωριστά διορθωτικά πολυώνυμα. Βέβαια κατά καιρούς έχουν προταθεί συνδυασμοί και των δυο αυτών τρόπων (Zhizhuo, 1990; Stallmann, 2008). Στη συνέχεια παρουσιάζεται κάθε ομάδα «επιρροής» στα σφάλματα της εικόνας (Stallmann, 2008):

- Εσωτερικός προσανατολισμός (*interior orientation*)

Σε κάθε περίπτωση βαθμονόμησης, πρέπει να προσδιοριστούν τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού x_o, y_o, c . Ως μέρος όμως του συνόλου των επιπρόσθετων παραμέτρων, δεν προσδιορίζονται τα ίδια τα στοιχεία αυτά, αλλά οι μεταβολές τους $\Delta x_o, \Delta y_o, \Delta c$.

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= \Delta x_o + \frac{\bar{x}}{c} \Delta c \\ \Delta y_i &= \Delta y_o + \frac{\bar{y}}{c} \Delta c\end{aligned}\quad (3.7-4)$$

- Ακτινική διαστρωφή (*radial distortion*)

Για την διόρθωσή της υιοθετείται συνήθως, από τους περισσότερους ερευνητές, το μοντέλο του *Brown* μέχρι την τρίτη παράμετρο:

$$\begin{aligned}\Delta x_r &= \bar{x} \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) \\ \Delta y_r &= \bar{y} \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6)\end{aligned}\quad (3.7-5)$$

- Εφαπτομενική διαστρωφή (*decentring distortion*)

Ομοίως και εδώ:

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= [P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y}] \\ \Delta y_d &= [P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1\bar{x}\bar{y}]\end{aligned}\quad (3.7-6)$$

- Διαφορετική κλίμακα και μη ορθογωνικότητα αξόνων (*in plane distortion*)

Η διόρθωση αυτού του σφάλματος μοντελοποιήθηκε από τον *Brown* το 1976 ως εξής:

$$\begin{aligned}\Delta x_f &= \bar{x}a_1 + \bar{y}a_2 + \bar{x}\bar{y}a_3 + \bar{y}^2a_4 + \bar{x}^2\bar{y}a_5 + \bar{x}\bar{y}^2a_6 + \bar{x}^2\bar{y}^2a_7 \\ \Delta y_f &= \bar{x}\bar{y}a_8 + \bar{x}^2a_9 + \bar{x}^2\bar{y}a_{10} + \bar{x}\bar{y}^2a_{11} + \bar{x}^2\bar{y}^2a_{12}\end{aligned}\quad (3.7-7)$$

- Μη επιπεδότητα επιφάνειας (*Out-of-plane distortion*)

Ομοίως η διόρθωση αυτού του σφάλματος μοντελοποιήθηκε από τον *Brown* το 1976 ως εξής:

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= (\bar{x}^2 - \bar{y}^2)s_x a_{13} + \bar{x}^2\bar{y}^2s_x a_{14} + (\bar{x}^4 - \bar{y}^4)s_x a_{15} \\ \Delta y_u &= (\bar{x}^2 - \bar{y}^2)s_y a_{13} + \bar{x}^2\bar{y}^2s_y a_{14} + (\bar{x}^4 - \bar{y}^4)s_y a_{15} \\ \mu\epsilon: s_x &= -\frac{\bar{x}}{c}, s_y = -\frac{\bar{y}}{c}\end{aligned}\quad (3.7-8)$$

Οι περισσότερες συζητήσεις για τη χρήση επιπρόσθετων παραμέτρων, που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση των συστηματικών σφαλμάτων των παρατηρούμενων ποσοτήτων (που κύρια είναι εικονοσυντεταγμένες), αφορούν τη συνόρθωση μοντέλων με τη μέθοδο της δέσμης, καθώς η μέθοδος αυτή έχει αποδειχτεί ως η πιο ακριβής και βολική μέθοδος συνόρθωσης, μιας και οι παρατηρούμενες ποσότητες είναι εικονοσυντεταγμένες.

➤ Επιπρόσθετες παράμετροι με τη θεώρηση των χαρακτηριστικών των σφαλμάτων της εικόνας

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την περιγραφή με παραμέτρους, αυτών των παραγόντων των σφαλμάτων που αναφέρθηκαν, ένας από τους οποίους προτάθηκε από τον *Brown* και παρατίθεται στις σχέσεις (3.7-9), με τη βοήθεια 29 παραμέτρων και διαφοροποιείται ελαφρώς από τα προαναφερθέντα, καθώς είναι προσανατολισμένος για την περίπτωση του αεροτριγωνισμού (*Zhizhuo*, 1990). Τόσο ο ίδιος όσο και άλλοι συγγραφείς, παρουσίασαν τροποποιημένα μοντέλα, προσπαθώντας την επίτευξη της βέλτιστης αποκατάστασης διαφορετικών ομάδων σφαλμάτων. Το συνολικό μοντέλο διόρθωσης του *Brown*, όπου οι επιλεγμένοι 29 συντελεστές, αναφέρονται σε συγκεκριμένες ομάδες επιρροής σφαλμάτων, έχει ως εξής (3.7-9):

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1\bar{x} + a_2\bar{y} + a_3\bar{x}^2 + a_4\bar{x}\bar{y} + a_5\bar{y}^2 + a_6\bar{x}^2\bar{y} + a_7\bar{x}\bar{y}^2 \\ &+ \frac{\bar{x}}{r}(c_1\bar{x}^2 + c_2\bar{x}\bar{y} + c_3\bar{y}^2 + c_4\bar{x}^3 + c_5\bar{x}^2\bar{y} + c_6\bar{x}\bar{y}^2 + c_7\bar{y}^3) \\ &+ \bar{x}(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(\bar{y}^2 + 3\bar{x}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y} + \Delta x_o + \left(\frac{\bar{x}}{c}\right)\Delta c \\ \Delta y &= b_1\bar{x} + b_2\bar{y} + b_3\bar{x}^2 + b_4\bar{x}\bar{y} + b_5\bar{y}^2 + b_6\bar{x}^2\bar{y} + b_7\bar{x}\bar{y}^2 \\ &+ \frac{\bar{y}}{r}(c_1\bar{x}^2 + c_2\bar{x}\bar{y} + c_3\bar{y}^2 + c_4\bar{x}^3 + c_5\bar{x}^2\bar{y} + c_6\bar{x}\bar{y}^2 + c_7\bar{y}^3) \\ &+ \bar{y}(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + 2P_1\bar{x}\bar{y} + P_2(\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2) + \Delta y_o + \left(\frac{\bar{y}}{c}\right)\Delta c\end{aligned}\quad (3.7-9)$$

Σε αυτό το μοντέλο, οι συντελεστές:

- a_1, a_2, \dots, a_7 και b_1, b_2, \dots, b_7 εκφράζουν τις παραμορφώσεις του φιλμ
- c_1, c_2, \dots, c_7 εκφράζουν τα σφάλματα στην επιπεδότητα του φιλμ
- K_1, K_2, K_3 είναι οι συντελεστές της ακτινικής διαστρόφης
- P_1, P_2 οι συντελεστές της εφαπτομενικής διαστρόφης και
- $\Delta x_o, \Delta y_o, \Delta c$ οι διορθώσεις για τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού.

Ένα άλλο μοντέλο που προτάθηκε από τον *Brown*, χρησιμοποιεί ένα σύνολο 15 παραμέτρων και με την προσθήκη των διορθώσεων Δx_o , Δy_o , Δc και των K_1 , K_2 , K_3 για τη διαστρόφη, διαμορφώνεται σε ένα μοντέλο 21 παραμέτρων τελικά (*Estler, Edmundson, Peggs, & Parker*)

και είναι το εξής (3.7-10):

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= a_1 \bar{x} + a_2 \bar{y} + a_3 \bar{x}\bar{y} + a_4 \bar{y}^2 + a_5 \bar{x}^2 \bar{y} + a_6 \bar{x}\bar{y}^2 + a_7 \bar{x}^2 \bar{y}^2 \\
 &+ \frac{\bar{x}}{c} [a_{13}(\bar{x}^2 - \bar{y}^2) + a_{14} \bar{x}^2 \bar{y}^2 + a_{15}(\bar{x}^4 - \bar{y}^4)] \\
 &+ \bar{x}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + \Delta x_o + \left(\frac{\bar{x}}{c}\right) \Delta c \\
 \Delta y &= a_8 \bar{x}\bar{y} + a_9 \bar{x}^2 + a_{10} \bar{x}^2 \bar{y} + a_{11} \bar{x}\bar{y}^2 + a_{12} \bar{x}^2 \bar{y}^2 \\
 &+ \frac{\bar{y}}{c} [a_{13}(\bar{x}^2 - \bar{y}^2) + a_{14} \bar{x}^2 \bar{y}^2 + a_{15}(\bar{x}^4 - \bar{y}^4)] \\
 &+ \bar{y}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + \Delta y_o + \left(\frac{\bar{y}}{c}\right) \Delta c
 \end{aligned} \tag{3.7-10}$$

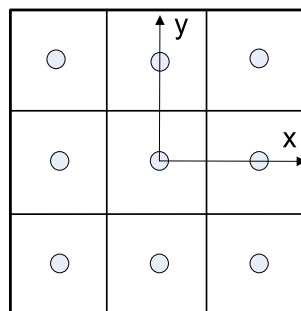
Σε αυτό το μοντέλο οι συντελεστές:

- a_1, a_2, \dots, a_{12} εκφράζουν τις παραμορφώσεις του φιλμ
- a_{13}, a_{14}, a_{15} εκφράζουν τα σφάλματα στην επιπεδότητα του φιλμ

Τα μοντέλα αυτά τυγχάνουν εφαρμογής σε κάποια λογισμικά, που βασίζονται στο μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης με δέσμες.

➤ Επιπρόσθετες παράμετροι σε ένα γενικό πολυώνυμο

Μια άλλη μέθοδος εισαγωγής επιπρόσθετων παραμέτρων, είναι η χρήση γενικών πολυωνύμων ή και τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Με αυτό το σχήμα, γίνεται μια συνολική θεώρηση της επίδρασης των υπολοίπων των συστηματικών σφαλμάτων και δεν καταβάλλεται προσπάθεια για την θεώρηση ή εξήγηση των πολλαπλών πηγών των σφαλμάτων αυτών (Zhizhuo, 1990). Τα πολυωνυμικά μοντέλα, αναπτύχθηκαν κύρια για την περίπτωση του αεροτριγωνισμού και λαμβάνοντας υπ' όψη τις ιδιαίτερες συνθήκες αεροφωτογράφισης (Stallmann, 2008), ενώ η γενική μορφή των πολυωνύμων έχει το σχήμα των εξισώσεων (3.7-1). Προσοχή πρέπει να δοθεί όμως στη πιθανή συσχέτιση και εξάρτηση των επιπρόσθετων παραμέτρων με τις υπόλοιπες παραμέτρους των μαθηματικών μοντέλων της φωτογραμμετρίας, όπως επίσης και στην μη ελεγχόμενη συμπεριφορά των πολυωνύμων υψηλού βαθμού. Για το σκοπό αυτό στατιστικά τεστ σημαντικότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κρίνουν το κατά πόσο κάθε συντελεστής του πολυωνύμου συμβάλλει ή όχι στην επιθυμητή διόρθωση, ώστε να απαλειφθεί εάν τελικά δεν συνεισφέρει. Κατά καιρούς βέβαια από διάφορους ερευνητές προτάθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σύνολα παραμέτρων σε τέτοια πολυώνυμα. Ένα από αυτά είναι και το σετ 12 παραμέτρων του *Ebner* ήδη από το 1976. Με την επιλογή επιπρόσθετων παραμέτρων στη μέθοδο των δεσμών, σκοπός ήταν η αποκατάσταση των συστηματικών σφαλμάτων, που εμφανίζονταν σε 9 σημεία κανονικά διατεταγμένα στην εικόνα, όπως στο Σχήμα 3-26 που ακολουθεί:



Σχήμα 3-26: Εννέα σημεία της εικόνας στα οποία αποκαθίστανται οι συντεταγμένες με το μοντέλο του Ebner

$$\Delta x = \begin{bmatrix} 1 & \bar{y} & \bar{y}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \bar{x} \\ \bar{x}^2 \end{bmatrix} \quad (3.7-11)$$

$$\Delta y = \begin{bmatrix} 1 & \bar{y} & \bar{y}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \bar{x} \\ \bar{x}^2 \end{bmatrix}$$

Για τις x και y εικονοσυντεταγμένες αποκτήθηκαν αρχικά 18 συνολικά παράμετροι, όμως 6 από αυτές αντισταθμίζονταν από τις παραμέτρους προσανατολισμού των μεμονωμένων εικόνων. Οι υπόλοιπες 12 επιπρόσθετες παράμετροι επιλέγονται να είναι σε μεγάλο βαθμό ορθογώνιοι μεταξύ τους και προς τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, για να εξασφαλίζονται σωστές συνθήκες των κανονικών εξισώσεων και προκειμένου οι τιμές που προκύπτουν για αυτές, να μπορούν να διαχωριστούν από τα σχετικά στατιστικά τεστ (Zhizhuo, 1990). Υπάρχει όμως το μειονέκτημα ότι οι υπολογισμένες εν τέλει παράμετροι είναι δύσκολο να αναλυθούν και το μοντέλο αποδίδει αποτελέσματα αποκατάστασης των σφαλμάτων, μόνο εάν τα σημεία αναφοράς ακολουθούν την τυπική κατανομή 3×3 σημείων Gruber σε μια εικόνα (Dun, 2007).

Παρουσιάζοντας το μοντέλο του Ebner, όπου ο όρος b , αφορά τη βάση των εικόνων, για ένα τυπικό φορμάτ μηχανής των $23 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$ και επικάλυψη 60% (Stallmann, 2008), τελικά:

$$\begin{aligned} \Delta x = & g_1 \bar{x} + g_2 \bar{y} - g_3 (2\bar{x}^2 - 4\bar{b}^2 / 3) + g_4 \bar{x}\bar{y} + g_5 (\bar{y}^2 - 2b^2 / 3) + \\ & g_7 \bar{x}(\bar{x}^2 - 2b^2 / 3) + g_9 (\bar{x}^2 - 2b^2 / 3)\bar{y} + g_{11} (\bar{x}^2 - 2b^2 / 3)(\bar{y}^2 - 2b^2 / 3) \end{aligned} \quad (3.7-12)$$

$$\begin{aligned} \Delta x = & -g_1 \bar{y} + g_2 \bar{x} + g_3 \bar{x}\bar{y} - g_4 (2\bar{y}^2 - 4\bar{b}^2 / 3) + g_6 (\bar{x}^2 - 2b^2 / 3) + \\ & g_8 \bar{y}(\bar{x}^2 - 2b^2 / 3) + g_{10} (\bar{y}^2 - 2b^2 / 3)\bar{x} + g_{12} (\bar{x}^2 - 2b^2 / 3)(\bar{y}^2 - 2b^2 / 3) \end{aligned}$$

Το συναρτησιακό μοντέλο για τη συνόρθωση με τη μέθοδο των ανεξαρτήτων μοντέλων διαμορφώνεται αντίστοιχα, με 14 όμως παραμέτρους (Ebner, 1976).

Το σετ όμως των 12 επιπρόσθετων παραμέτρων, όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος των δεσμών, εφαρμόζεται ομοίμορφα σε μια ομάδα αεροφωτογραφιών που:

- Έχουν ληφθεί με την ίδια μηχανή, την ίδια κασέτα φιλμ και στις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Έχουν εμφανιστεί, αντιγραφεί και αποθηκευτεί με τον ίδιο τρόπο και
- Έχουν μετρημένες εικονοσυντεταγμένες από το ίδιο όργανο.

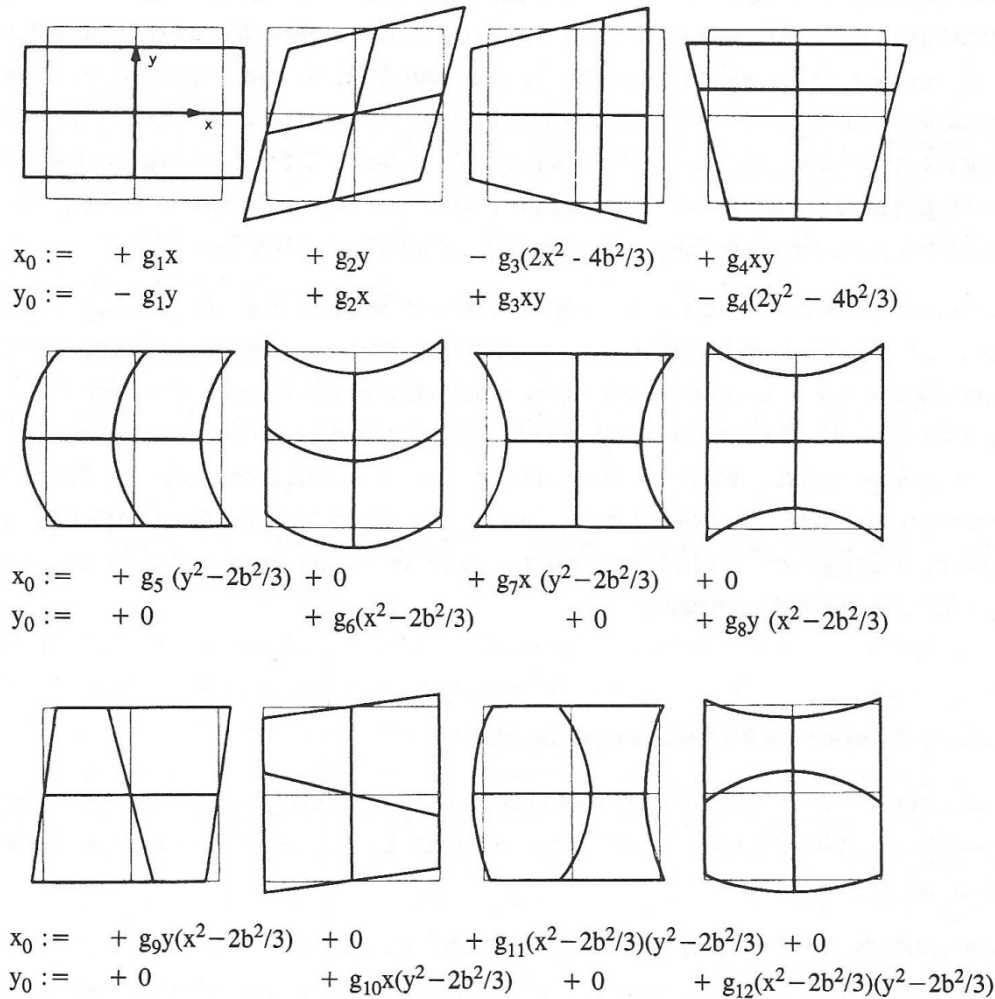
Δεν μοντελοποιούνται όμως κατάλληλα τα υπόλοιπα της ακτινικής διαστρόφης και καθόλου η συνολική ακτινική διαστρόφη (Kraus, 1997).

Οι ακόλουθες επιπρόσθετες παράμετροι, κατάλληλοι για αυτή τη μοντελοποίηση, που προτάθηκαν από τον Torlegard (1989) για τη συμπλήρωση του μοντέλου, έχουν ως εξής:

$$\Delta x = g_{13} \bar{x}(r^2 - r_o^2), \Delta y = g_{13} \bar{y}(r^2 - r_o^2) \quad \text{ή} \quad (3.7-13)$$

$$\Delta x = g_{14} \bar{x}(r^4 - r_o^4), \Delta y = g_{14} \bar{y}(r^4 - r_o^4)$$

και πρέπει να προστεθούν στα πολυώνυμα των (3.7-12), όπου ο όρος r_o , αφορά την ακτίνα μηδενισμού της ακτινικής διαστρόφης (Kraus, 1997).



Σχήμα 3-27: Παράμετροι Ebner και η επίδρασή τους στην φωτογραφία

Πηγή: Kraus, 1997

Τέλος ένα παράδειγμα επιπρόσθετων παραμέτρων, που εκφράζονται από σφαιρικές αρμονικές συναρτήσεις ενσωματώνονται σε ένα μοντέλο των *El-Hakim & Faig* (1977), που έχει ως εξής:

$$\Delta x = a_1x + a_2y + q \frac{x}{r}$$

$$\Delta y = -a_1y + a_2x + q \frac{y}{r}$$

$$q = \alpha_3 \cos \lambda + \alpha_4 \sin \lambda + \alpha_5 r^2 + \alpha_6 r^2 \cos 2\lambda + \alpha_7 r^2 \sin 2\lambda + \alpha_8 r^3 \cos \lambda \quad (3.7-14)$$

$$+ \alpha_9 r^3 \sin \lambda + \alpha_{10} r^3 \cos 3\lambda + \alpha_{11} r^3 \sin 3\lambda$$

$$\lambda = \arctg \frac{y}{x}$$

3.7.3 Παραμορφώσεις ψηφιακών μηχανών

Η βαθμονόμηση των **ψηφιακών μηχανών**, δεν διαφέρει εν γένει από την βαθμονόμηση των συμβατικών αναλογικών μηχανών, δεδομένου ότι οι μηχανές αυτές συμπεριφέρονται, εν πολλοίς, όπως οι αναλογικές και ειδικότερα στον τομέα των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τα οπτικά μέρη και αφορούν τις διαστροφές. Η βασική διαφορά τους είναι η απουσία της φωτοευαίσθητης επιφάνειας, το ρόλο της οποίας αναλαμβάνει το σύστημα *CCD* (ή αντίστοιχα το *CMOS*). Οπότε εκτός των άλλων παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού, οι ψηφιακές μηχανές πρέπει να ελέγχονται επιπλέον και για το μέγεθος και το σχήμα του εικονοστοιχείου, καθώς και για ενδεχόμενες γεωμετρικές αλλοιώσεις, οι

οποίες οφείλονται στην ηλεκτρονική μεταφορά του σήματος, από το CCD στη μνήμη του υπολογιστή.

Οι **κυριότερες παραμορφώσεις** της εικόνας, που προκαλούνται εξαιτίας του CCD, είναι η διαφορετική κλίμακα κατά x και y και η μη καθετότητα των αξόνων (*in-plane distortion*). Ακόμα, μπορεί η επιφάνεια του αισθητήρα να αποκλίνει από την επιπεδότητα (*out-of-plane distortion*) (Fraser, Shortis, & Ganci, 1995).

➤ *In-plane distortion*

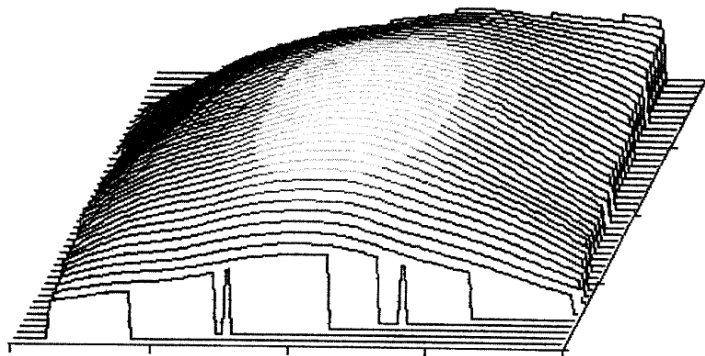
Η διαστροφή αυτής της κατηγορίας οφείλεται σε ηλεκτρονικά φαινόμενα του CCD. Μία πηγή σφάλματος είναι οι διαφορές μεταξύ της συχνότητας του «αναλογικού» ρολογιού μετατόπισης του εικονοστοιχείου του CCD (*CCD pixel shift clock*) και της συχνότητας δειγματοληψίας του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, που βρίσκεται στον εικονοσυλλέκτη. Αποτέλεσμα αυτού του σφάλματος, είναι η διαφορετική κλίμακα των εικονοσυντεταγμένων κατά x και y . Άλλο ένα συστηματικό σφάλμα των CCD είναι το «τρεμόπαιγμα της γραμμής» (*line jitter*), που έχει ως επίπτωση την απόκλιση των αξόνων από την ορθογωνικότητα. Η διαφορετική κλίμακα των αξόνων και η μη ορθογωνικότητα ονομάζονται αφινικές παραμορφώσεις και αποτελούν στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού μιας μηχανής CCD. Ένας προτεινόμενος τρόπος μοντελοποίησης των παραμορφώσεων αυτών, αποτελεί μια απλοποιημένη έκδοση των εξισώσεων (3.7-10) και έχει ως εξής (Fraser, Shortis, & Ganci, 1995):

$$\begin{aligned} \Delta x_f &= B_1 \bar{x} + B_2 \bar{y} \\ \Delta y_f &= 0 \end{aligned} \quad (3.7-15)$$

Σημαντικό είναι βέβαια το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις αυτές, μοντελοποιούνται μόνο κατά την x διεύθυνση κατά τους παραπάνω συγγραφείς.

➤ *Out-of-plane distortion*

Στην περίπτωση που το εστιακό επίπεδο είναι ο αισθητήρας CCD, είναι αβέβαιη η εφαρμογή, για το σφάλμα αυτό, του ίδιου τρόπου μοντελοποίησης με εκείνου των αναλογικών μηχανών. Ακόμα, τις περισσότερες φορές, μετά την τοποθέτηση του αισθητήρα στην μηχανή, δεν είναι εφικτή η μέτρηση της τοπογραφίας του, κάτι που θα έδινε μια σαφή εικόνα της αποχής από την επιπεδότητα. Έτσι αυτό το σφάλμα δεν συμπεριλαμβάνεται με κάποιο βέβαιο τρόπο μοντελοποίησης στη διαδικασία της βαθμονόμησης των μηχανών CCD, παρ' όλες τις προσπάθειες που έχουν γίνει, αν και επιρροή του μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων στο χώρο του αντικειμένου (Fraser, Shortis, & Ganci, 1995).



Εικόνα 3-2: Μέτρηση τοπογραφίας αισθητήρα CCD επίγειας ψηφιακής μηχανής – Συνολική «υπομετρική» διαφορά $1.7\mu\text{m}$ και RMS αποχής από την επιπεδότητα $0.3\mu\text{m}$

Πηγή: Fraser, 1997

Διάφορα μαθηματικά μοντέλα διορθώσεων του συνόλου των παραμορφώσεων, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς, αναλόγως την ψηφιακή μηχανή και αναλόγως της μεθόδου βαθμονόμησης, που υιοθετείται.

Έτσι για παράδειγμα, όταν η βαθμονόμηση της αερομηχανής **DMC**, βασίζεται στη μέθοδο της αυτοβαθμονόμησης με δέσμες (παράγραφος 4.6.5), ένα σετ επιπρόσθετων παραμέτρων προσαρμόζεται στο μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου, για τις διορθώσεις αυτές. Το σύνολο των παραμέτρων αυτών, αποτελεί ένα υποσύνολο των εμπειρικών και αναλυτικών παραμέτρων μοντελοποίησης, που είχαν προταθεί από τον *Brown* και ομαδοποιούνται ως εξής κατ' αντιστοιχία με την παράγραφο 3.7.2 (Dörstel, Jacobsen, & Stallmann):

$$\begin{aligned}\Delta x &= \Delta x_i + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_f + \Delta x_u \\ \Delta y &= \Delta y_i + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_f + \Delta y_u\end{aligned}\quad (3.7-16)$$

Όπου ο δείκτης i αφορά τον εσωτερικό προσανατολισμό, ο r την ακτινική διαστρόφη, ο d την εφαπτομενική διαστρόφη, ο f τις αφινικές παραμορφώσεις και ο u την απόκλιση από την επιπεδότητα.

Το πλήρες σετ παραμέτρων του *Brown* αποτελείται όπως είδαμε από 29 παραμέτρους, όμως μόνο 10 από αυτές χρησιμοποιούνται για τις ψηφιακές εναέριες φωτομηχανές. Το πλήρες σετ χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές επίγειας φωτογραμμετρίας, τόσο για αναλογικές όσο και για ψηφιακές μηχανές και για εφαρμογές αεροτριγωνισμού.

Οι παράμετροι καθώς και το προτεινόμενο μοντέλο, που χρησιμοποιείται για την εργαστηριακή βαθμονόμηση της μηχανής **DMC**, έχουν ως εξής (Dörstel, Jacobsen, & Stallmann; Cramer M., 2004):

- Εσωτερικός προσανατολισμός (*interior orientation*)- Ακτινική διαστρόφη (*radial distortion*) και Εφαπτομενική διαστρόφη (*decentring distortion*)

Τα στοιχεία αυτά έχουν όπως και στις εξισώσεις (3.7-4), (3.7-5) και (3.7-6) παραπάνω.

- Διαφορετική κλίμακα και μη ορθογωνικότητα αξόνων (*in plane distortion*)

$$\begin{aligned}\Delta x_f &= B_1 \bar{x} + B_2 \bar{y} \\ \Delta y_f &= 0\end{aligned}\quad (3.7-17)$$

- Μη επιπεδότητα επιφάνειας (*Out-of-plane distortion*)

Το σφάλμα αυτό δεν προσδιορίζεται με φωτογραμμετρικές διαδικασίες για την ψηφιακή μηχανή **DMC**, καθώς δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί ικανοποιητικά. Λαμβάνεται ως πολύ μικρό, θεωρώντας τις μετρήσεις του *Fraser* (Εικόνα 3-2).

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= 0 \\ \Delta y_u &= 0\end{aligned}\quad (3.7-18)$$

Οπότε το συνολικό μοντέλο διορθώσεων έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \Delta x_0 + \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + \bar{x}B_1 + \bar{y}B_2 \\ \Delta y &= \Delta y_0 + \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_2\end{aligned}\quad (3.7-19)$$

Επίσης επειδή οι παράμετροι του μοντέλου *Ebner*, δεν λαμβάνουν υπ' όψη τη γεωμετρία των τεσσάρων κεφαλών της μηχανής **DMC**, έχει προταθεί (και υλοποιείται από διάφορα λογισμικά βαθμονόμησης για τη συγκεκριμένη μηχανή) το σετ παραμέτρων *Jacobsen*, που περιγράφουν απευθείας την επίδραση αυτή και σε σχέση με τις παραμέτρους του *Ebner* παρουσιάζουν μικρότερη συσχέτιση, αν τα σημεία είναι τυχαία κατανομημένα, χωρίς να ακολουθούν υποχρεωτικά κάποια συγκεκριμένη κατανομή επί της εικόνας (Dun, 2007).

Ο *Madani* (2010) σε μια εργασία του για τη βαθμονόμηση της ψηφιακής μηχανής **RMK D**,

προτείνει μια παραλλαγή του μοντέλου του *Brown*, με τα διορθωτικά πολυώνυμα να έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \Delta x_0 - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + a_1\bar{x} + a_2\bar{y} + \\ & a_3\bar{x}\bar{y} + a_4\bar{x}^2\bar{y} + a_5\bar{x}\bar{y}^2 + a_6\bar{x}^2\bar{y}^2 + \frac{\bar{x}}{c} [a_{11}(\bar{x}^2 - \bar{y}^2) + a_{12}\bar{x}^2\bar{y}^2 + a_{13}(\bar{x}^4 - \bar{y}^4)] \\ \Delta y &= \Delta y_0 - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_2 + a_7\bar{x}\bar{y} + \\ & a_8\bar{x}^2\bar{y} + a_9\bar{x}\bar{y}^2 + a_{10}\bar{x}^2\bar{y}^2 + \frac{\bar{y}}{c} [a_{11}(\bar{x}^2 - \bar{y}^2) + a_{12}\bar{x}^2\bar{y}^2 + a_{13}(\bar{x}^4 - \bar{y}^4)]\end{aligned}\quad (3.7-20)$$

Η ενασχόληση με το θέμα βαθμονόμησης πολλών ερευνητών από επιστημονικά πεδία και πέραν της φωτογραμμετρίας, οδήγησε στην ανάπτυξη αρκετών μοντέλων βαθμονόμησης, που εφαρμόζονται και στις μη μετρητικές ψηφιακές μηχανές.

Ένα άλλο συχνά χρησιμοποιούμενο μαθηματικό μοντέλο για την βαθμονόμηση ψηφιακών μηχανών (*CCD*, βιντεοκάμερες κ.τ.λ.) είναι (Georgopoulos, Tournas 1995):

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_p + \bar{x}(r^2 - 1)a_1 + \bar{x}(r^4 - 1)a_2 + (r^2 - 2\bar{x}^2)a_3 + 2\bar{x}\bar{y}a_4 + \bar{x}a_5 + \bar{y}a_6 \\ \Delta y &= y_p + \bar{y}(r^2 - 1)a_1 + \bar{y}(r^4 - 1)a_2 + (r^2 - 2\bar{y}^2)a_3 + 2\bar{x}\bar{y}a_4 + \bar{y}a_5\end{aligned}\quad (3.7-21)$$

όπου: x_p, y_p οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

\bar{x}, \bar{y} οι εικονοσυντεταγμένες ως προς το πρωτεύον σημείο

r η ακτινική απόσταση του μετρούμενου σημείου από το πρωτεύον σημείο

a_1, a_2 παράμετροι ακτινικής διαστρόφης

a_3, a_4 παράμετροι έκκεντρης διαστρόφης

a_5, a_6 παράμετροι αφινικού μετασχηματισμού

Τέλος ένα άλλο προτεινόμενο μοντέλο είναι (Gruen, 1997):

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\Delta x_0 + \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + \bar{x}s_x + \bar{y}a \\ \Delta y &= -\Delta y_0 + \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}(r^2 K_1 + r^4 K_2 + r^6 K_3) + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_2 + \bar{x}a\end{aligned}\quad (3.7-22)$$

Όπου s_x η διαφορετική κλίμακα κατά x και y και a η μη ορθογωνικότητα των αξόνων.

4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις μεθόδους βαθμονόμησης των φωτογραφικών μηχανών, εναέριων και επίγειων. Αναφέρεται ο σκοπός της βαθμονόμησης, ταξινομούνται σε κατηγορίες οι μέθοδοι και περιγράφονται συνοπτικά. Πρέπει εδώ να επισημανθεί μια διαπίστωση που προέκυψε από τη μελέτη της βιβλιογραφίας και αφορά μια «σύγχυση» σχετικά με τη κατηγοριοποίηση και ονομασία των μεθόδων, καθώς ανάλογα με τον συγγραφέα η ίδια κατ' όνομα μέθοδος προσεγγίζεται διαφορετικά. Παρουσιάζεται επίσης η ανάγκη βαθμονόμησης των μηχανών όπως αυτή εξελίσσεται ιστορικά, καθώς και των φορέων διαπίστευσης αυτού του είδους των εργασιών.

4.1 Έννοια Βαθμονόμησης

Είναι αναμφισβήτητο το γεγονός, ότι ο εντοπισμός και η εκτίμηση των συστηματικών σφαλμάτων που προέρχονται από ένα όργανο μέτρησης εξαιτίας της κακής ρύθμισής του, αποτελεί μια αναγκαία διαδικασία. Η αναγκαιότητα αυτής της διαδικασίας, σε τακτά χρονικά διαστήματα, εξαιτίας των μεταβολών των σταθερών του οργάνου με την πάροδο του χρόνου, ή εξαιτίας της κακής χρησιμοποίησής του, τονίζεται τόσο στα εγχειρίδια χρήσης του οργάνου, που δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία, όσο και στις προδιαγραφές που υπάρχουν και τίθενται από πολλά κράτη. Η βαρύτητα δε που δίνουν οι κατασκευαστές στο πρόβλημα του ελέγχου και της βαθμονόμησης φαίνεται και από το πλήθος των δημοσιευμάτων τους σε διάφορα περιοδικά ή σε δικά τους εγχειρίδια.

Με τον όρο γενικά, **βαθμονόμηση ή διακρίβωση ενός οργάνου μέτρησης**, θεωρούμε το σύνολο των δραστηριοτήτων, οι οποίες σκοπό έχουν τον εντοπισμό και την εκτίμηση των τιμών των σφαλμάτων του.

Ο όρος βαθμονόμηση, αποδίδει τον αγγλικό όρο *calibration*. Η έννοια της βαθμονόμησης έρχεται από τις αρχές του δεκάτου ογδόου αιώνα, όπου οι λέξεις "*calibre*" και "*calliper*" περιέγραφαν ένα όργανο μέτρησης ή σύγκρισης διαμετρημάτων. Η ελληνική απόδοση του όρου *calibre* είναι "διάμετρος όπλου" και το ρήμα *calibrate* σημαίνει "μέτρηση διαμετρημάτων όπλων", η οποία γινόταν με ειδικό βαθμολογημένο κανόνα, του οποίου το διάστημα μεταξύ της k-χαραγής και της μηδενικής ήταν ίσο με τη διάμετρο μπάλας κανονιού βάρους k-pounds. Ο όρος *calibrate* σχετιζόταν λοιπόν με μετρήσεις και κανόνες μέτρησης. Το δέκατο ένατο αιώνα, ο όρος αυτός σχετίζεται με τη διαίρεση της μετρητικής κλίμακας θερμόμετρων, βαρομέτρων και άλλων οργάνων μέτρησης πίεσης, καθώς και με τον έλεγχο ήδη "βαθμονομημένων" οργάνων. Αρχίζει επίσης να αναφέρεται σε μετρητικά όργανα και η διαδικασία "*calibration*", που σκοπό έχει τη δημιουργία πίνακα διορθώσεων, που θα πρέπει να εφαρμοσθούν στις μετρήσεις οργάνου, ώστε να απαλειφθούν ή ελαχιστοποιηθούν τα εσωτερικά του σφάλματα.

Στη σύγχρονη ορολογία ο όρος "*calibration*" και η κοντινότερη ελληνική απόδοσή του "βαθμονόμηση", δηλώνει τη διαδικασία που ακολουθείται για τον έλεγχο και τη διόρθωση ενός οργάνου, ώστε οι μετρήσεις του να συμφωνούν με τα εθνικά πρότυπα.

Ως βαθμονόμηση μπορούν να θεωρηθούν οι διαδικασίες, οι οποίες θα αξιολογούν τα χαρακτηριστικά των μερών ενός συστήματος μέτρησης (μέθοδος των συστατικών μερών-*component method*) ή οι διαδικασίες οι οποίες θα αξιολογούν το πλήρες επιχειρησιακό σύστημα (μέθοδος του συστήματος- *system method*), ορισμοί που ισχύουν και αναφερόμενοι στις φωτογραφικές μηχανές (ASPRS, 2000). Η έννοια της προσέγγισης όλου του συστήματος για τη βαθμονόμηση είναι γνωστή με την ορολογία *in situ* (επί τόπου), καθώς πραγματοποιείται συνήθως σε πραγματικές συνθήκες φωτογράφισης στο πεδίο. Οι μέθοδοι των συστατικών μερών ήταν ιδιαίτερα χρήσιμες για τους κατασκευαστές των μετρητικών μηχανών, για σκοπούς ελέγχου της ποιότητας των προϊόντων. Οι χρήστες, από την άλλη πλευρά, αν και παραδοσιακά ικανοποιημένοι με τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των

συστατικών μερών, δείχνουν όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον στις μεθόδους βαθμονόμησης ολόκληρου του συστήματος, ώστε να εξασφαλίζεται ότι αξιοποιείται πλήρως η συνεισφορά των πρόσθετων αισθητήρων, όπως το *GPS* και *INS* (ASPRS, 2000). Η πρόοδος στην τεχνολογία και κατασκευή των δεκτών αεροφωτογράφισης, με την είσοδο των ψηφιακών δεκτών, οδηγεί σε τρία είδη βαθμονόμησης με τη βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένου πεδίου ελέγχου: Γεωμετρική βαθμονόμηση (*geometric calibration*), ραδιομετρική βαθμονόμηση (*radiometric calibration*) και βαθμονόμηση χωρικής διαχωριστικής ικανότητας (*spatial resolution calibration*).

Η διακρίβωση ή έλεγχος ή βαθμονόμηση φωτογραφικών μηχανών, είναι το σύνολο των μετρητικών και υπολογιστικών διαδικασιών που προσδιορίζουν τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού τους (Γεωργόπουλος, 1998).

Είναι προφανές ότι θεωρητικώς είναι αδιάφορο το πόσο κάθε σύστημα φακός-μηχανή-φιλμ παραμορφώνει γεωμετρικά την απεικόνιση, αρκεί να είναι με ακρίβεια γνωστή η παραμόρφωση αυτή, ώστε οι μετρήσεις να ανάγονται κατάλληλα κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Η ζητούμενη αυτή αναγωγή, είναι ουσιαστικώς η προσαρμογή του γεωμετρικού μοντέλου της συγκεκριμένης κεντρικής προβολής, η οποία περιγράφει κατά τον καλύτερο τρόπο τη γεωμετρία της συγκεκριμένης μηχανής και αυτός είναι ουσιαστικά ο σκοπός της βαθμονόμησης.

Έτσι η διακρίβωση-βαθμονόμηση ολοκληρώνεται όταν:

- Έχει οριστεί πάνω στο εστιακό επίπεδο του αρνητικού (προβολής) ένα ικανοποιητικό σημείο αναφοράς, δηλαδή ένα σημείο αρχής των συντεταγμένων. Αυτό τις περισσότερες φορές είναι η προβολή του κέντρου συμμετρίας του φακού πάνω στην εικόνα (πρωτεύον σημείο με εικονοσυντεταγμένες x_0, y_0).
- Για όλα τα σημεία του επιπέδου του αρνητικού έχει υπολογιστεί η τιμή της σταθεράς c της μηχανής (τοπική διαφοροποίηση κλίμακας) και από αυτήν οι τιμές της ακτινικής διαστρόφης Δr (Γεωργόπουλος, 1998).

4.2 Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτες χρήσεις της φωτογραμμετρίας αφορούσαν αποκλειστικά τη χαρτογράφηση. Οι χρησιμοποιούμενες διαδικασίες ήταν περισσότερο ποσοτικές παρά ποιοτικές και ο εξοπλισμός έπαιρνε λίγο από το μερίδιο των προβλημάτων που συνδέονταν με τα γεωμετρικά λάθη που εισάγονταν στις εικόνες από τη φωτογραφική μηχανή. Η εναέρια φωτογραμμετρική χαρτογράφηση έπρεπε να περιμένει την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων αεροσκαφών, την εποχή του Πρώτου Παγκόσμιου Πολέμου. Πριν από αυτήν την περίοδο, οι επίγειες φωτογραφικές μηχανές χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για να φέρουν εις πέρας μερικές αποστολές χαρτογράφησης. Αξίζει εδώ να αναφερθεί η πρωτοποριακή εργασία βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών στο *Deville* του Καναδά από τον *Field*, όπου το 1910 είχε δημιουργήσει ένα εργαστήριο με ευθυγραμμιστές (*collimators*) για να βαθμονομήσει τα στοιχεία της φωτογραφικής του μηχανής, μαζί και με άλλο εξοπλισμό, όπως επίπεδα και φορείς. Στη συνέχεια, η εμπειρία κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκόσμιου Πολέμου είχε καταδείξει τα οφέλη της εναέριας έρευνας και απεικόνισης και σε συνδυασμό με τις εξελίξεις στα πρώτα στερεοσκοπικά όργανα απόδοσης, έγινε σύντομα προφανές ότι για να επιτευχθούν υψηλότερες ακρίβειες στις στερεοσκοπικές φωτογραμμετρικές μετρήσεις, ήταν απαραίτητη η γνώση ή η διακρίβωση του συστήματος των φακών.

Η πρώτη εναέρια φωτογραφική μηχανή που βαθμονομείται, είναι στον Καναδά το 1920 και οι σταθερές που προσδιορίστηκαν ήταν: η εστιακή απόσταση και η θέση του πρωτεύοντος σημείου. Το πρωτεύον σημείο βρέθηκε με τη μέθοδο της αυτοευθυγράμμισης (*autocollimation*). Με την εξέταση έπειτα του εύρους των εστιακών αποστάσεων που υπολογίστηκαν κατά μήκος ενός ή περισσότερων ακτινικών αποστάσεων, επιλεγόταν μια βαθμονομημένη τιμή, για να ελαχιστοποιήσει τη μέση διαστρόφη. Με την αλλαγή βέβαια αυτής της τιμής της εστιακής απόστασης, τα σφάλματα της διαστρόφης θα μπορούσαν να

μειωθούν σε ένα ποσό κάτω από $\pm 20 \mu\text{m}$. Αυτή η νέα τιμή για την εστιακή απόσταση ονομάστηκε «βαθμονομημένη εστιακή απόσταση» και ήταν εκείνη η τιμή που ισορροπούσε καλύτερα την ακτινική διαστροφή σε ίσα ποσά θετικής και αρνητικής διαστροφής. Για τα επόμενα τριάντα έτη, οι τεχνικές που υιοθετήθηκαν στον Καναδά ήταν βασικά οι ίδιες. Στις τεχνικές αυτές έχει δοθεί ο γενικός τίτλος των *οπτικών βαθμονομήσεων*, σε αντιδιαστολή των *φωτογραφικών βαθμονομήσεων*, που η υπεροχή τους άρχισε να φαίνεται από τη δεκαετία του '50 και μετά.

Όσον αφορά τα προβλήματα της εφαπτόμενης επίδρασης, δεν υπήρξε καμία μέθοδος που να διορθώνει αυτές τις ασύμμετρες ή εφαπτομενικές διαστροφές (μη ευθυγράμμιση των τμημάτων των φακών σε σχέση με τον οπτικό άξονα) ή αλλιώς την επίδραση των πρισμάτων (η επίδραση που προκύπτει όταν ένα λεπτό πρίσμα τοποθετείται μπροστά από έναν φακό, Odle, 1951). Ο *Pestrecov* (1951) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εφαπτομενική διαστροφή πρέπει να κρατηθεί κάτω από περίπου $30 \mu\text{m}$, ενώ ο *Washer* (1957a) πρότεινε τα $15 \mu\text{m}$ ως αποδεκτή "ανοχή" για την εφαπτομενική διαστροφή.

Στις ΗΠΑ, αμέσως μετά από το Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο οι φωτογραφικές μηχανές άρχισαν να υποβάλλονται σε βαθμονόμηση από το Εθνικό Γραφείο Προτύπων. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ακριβή για τις απαιτήσεις της εναέριας φωτογραμμετρίας εκείνη την περίοδο (*Washer*, 1957b). Τη δεκαετία επίσης του '30, μια φωτογραφική μηχανή δοκιμής των φακών ακρίβειας αναπτύχθηκε στο αμερικανικό γραφείο των προτύπων και χρησιμοποιήθηκε στη βαθμονόμηση των μηχανών (*Gardner και Case*, 1937). Μέχρι την δεκαετία του '40 ο όγκος της εργασίας είχε αυξηθεί πάρα πολύ και υπήρξε ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια και ευκολότερο, στη χρήση, εξοπλισμό.

Για τις εφαρμογές χαρτογράφησης οι πιο πρόωρες λύσεις στα προβλήματα που συνδέονταν με τις μεγάλες ακτινικές διαστροφές των φακών, αφορούσαν την άμεση οπτική διόρθωση, με την οποία η εικόνα επαναπροβαλλόταν μέσω της φωτογραφικής μηχανής και το σύστημα των φακών που την είχε συλλάβει. Αυτό το σύστημα ορίστηκε ως, η "Αρχή (*Principle*) των *Porro-Koppe*", από τους επιστήμονες που το τελειοποίησαν στο τελευταίο μέρος του 19^{ου} αιώνα. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφθηκαν οι γεωμετρικές διαστρεβλώσεις στην εικόνα. Ομοίως, στο αναλογικό όργανο *Multiplex*, η αρχική αεροφωτογραφία η οποία είχε παρθεί με ένα φακό *Metrogon*, επαναπροβαλλόταν μέσω ενός αρνητικού συστήματος φακών που αντιστοιχούσε σε τιμές διαστροφής ενός ονομαστικού φακού *Metrogon*. Αυτό παρείχε μια μικρή (50mm^2) διαφάνεια, που κατόπιν χρησιμοποιείτο στο σύστημα των προβολέων για τη στερεοσκοπική εξέταση και απόδοση (*Baker*, 1980). Άλλοι μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν περιελάμβαναν, τη χρήση ενός εκκέντρου - διορθώσεων διαστροφής στο *plotter* του *Kelsh* και τη χρήση φορέων αντιστάθμισης των διαστροφών, στα *stereoplotters*, όπως στο *Wild Autograph*. Στη συνέχεια ωστόσο, οι πολυάριθμες ποικιλίες των καμπυλών και των γραφικών παραστάσεων που συντάχθηκαν για να διορθώσουν τις τιμές της παράλλαξης ή τα υψόμετρα σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο στα στερεομοντέλα, οδήγησαν στη διαπίστωση ότι η εφαρμογή όλων αυτών των μεθόδων ήταν πολύ κουραστική.

Ο Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος προκάλεσε μια δραματική αύξηση στη χρήση της αεροφωτογραφίας για αναγνώριση και χαρτογράφηση, έτσι ώστε μέχρι την πρόσφατη δεκαετία του '40 να υπάρχει διεθνής αναγνώριση, ότι η τυποποίηση των τεχνικών για τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών θα ήταν αναγκαία. Η χαρτογράφηση για στρατιωτικούς σκοπούς ήταν η κατευθυντήρια δύναμη σε αυτό (*Corten*, 1951) και μερικώς το αποτέλεσμα του συνεδρίου *ISPRS*, μια συνεδρίαση του 1948 στο Παρίσι, μεταξύ αντιπροσώπων των αρχών βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών, διάφορων ευρωπαϊκών χωρών. Τα αποτελέσματα του συνεδρίου αυτού συζητήθηκαν αργότερα στην Ουάσιγκτον, τον Ιανουάριο του 1951, από την *American Society of Photogrammetry*, όπου παρουσιάστηκαν απόψεις σχετικά με τη βαθμονόμηση από κατασκευαστές φωτογραφικών μηχανών, εθνικές αρχές και ακαδημαϊκούς φωτογραμμέτρες. Αυτή η συνεδρίαση ήταν πιθανώς μια πρώτη σοβαρή προσπάθεια για τη κατανόηση των μεθοδολογιών διακρίβωσης των φωτογραφικών μηχανών που υιοθετούνται από τις διάφορες χώρες.

Το έβδομο διεθνές συνέδριο της φωτογραμμετρίας το 1952, ενέκρινε τη πρόταση μιας

επιτροπής, που τόνιζε ότι η βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών με τη φωτογραφική διαδικασία ήταν προτιμητέα σε σχέση με τις οπτικές μεθόδους, αν και οι τελευταίες θα μπορούσαν ακόμα να χρησιμοποιηθούν, εάν έδιναν τα ίδια αποτελέσματα με την απαιτούμενη ακρίβεια. Οι οπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν το γωνιόμετρο είχαν εφαρμοστεί συχνότερα στην Ευρώπη, ενώ η μεγαλύτερη χρήση των πεδίων και των ευθυγραμμιστών είχε γίνει στον Καναδά και τις ΗΠΑ. Οι *Carman* και *Brown* (1956), έβρισκαν διαφορές στη χρησιμοποίηση των φωτογραφικών τεχνικών, σε σχέση με τα στοιχεία της οπτικής βαθμονόμησης που παρέχονταν από τους κατασκευαστές. Οι βαθμονομημένες εστιακές αποστάσεις υπερέβησαν συνήθως τις τιμές του κατασκευαστή κατά 10 ή 20 μm και οι ακτινικές τιμές διαστρωφής ήταν υψηλότερες κατά μέσο όρο 6 μm , με τις μέγιστες τιμές να φτάνουν τα 17 μm . Κατέληξαν έτσι στο συμπέρασμα, ότι οι διαφορές αυτές θα μπορούσαν να αποδοθούν στις χρωματικές διαφορές της διαστρωφής, όπως παρουσιάζονται από δύο διαφορετικούς, φασματικά, δέκτες. Τα αποτελέσματά τους υπογράμμισαν επίσης την ανάγκη, οι φωτογραφικές αερομηχανές να βαθμονομούνται από μια διαδικασία που μιμείται πολύ τις συνθήκες χρήσης τους.

Οι ιδιαίτερες επίσης διαφορές στα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για τον ίδιο τύπο μιας φωτογραφικής μηχανής, μελετήθηκαν από τον *Hothmer* το 1958. Θεώρησε ότι οφείλονταν στους περιορισμούς της κατασκευής, ειδικά όσον αφορά τους ελαφρά διαφορετικούς διαθλαστικούς δείκτες των φακών, από μια σειρά παραγωγής στην επόμενη. Μια δοκιμή 276 φακών *Metrogon* παρουσίασε ακτινικές διαφορές διαστρωφής μέχρι και 50 μm .

Ο *Hothmer* (1958) συζήτησε ακόμα και τα αποτελέσματα των διαφορών στη θερμοκρασία, από τη βαθμονόμηση στο εργαστήριο, σε εκείνες που αναμένονται κατά την πτήση. Μια διαφορά 50° C τόνισε ότι ήταν πιθανή (από 20°C σε -30°C). Φακοί λοιπόν *Topar* και *Pleogon* είχαν τοποθετηθεί σε ένα μεγάλο ψυγείο (-20°C) για τρεις ώρες και όταν εξετάστηκαν οι προκύπτουσες καμπύλες διαστρωφής, είχαν μια ποικιλία της τάξεως των +/-5 μm .

Ο *Thompson* (1957) μελέτησε τη γεωμετρική θεωρία της φωτογραφικής μηχανής και κατά συνέπεια ενδιαφέρθηκε για το μοντέλο και τις ατέλειες των φωτογραφικών μηχανών στην κατασκευή, δηλώνοντας ότι «...οποιαδήποτε επεξεργασία δεν λαμβάνει υπόψη τις κατασκευαστικές ατέλειες, βασισμένη στη θεωρία της προοπτικής απεικόνισης με την αξονική συμμετρία ως ουσιαστικό συνακόλουθο, δεν είναι πιθανό να είναι ελεύθερη από ασάφειες».

Ο *Hallert* (1963) μελέτησε τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων που εφαρμόστηκε στη βαθμονόμηση μιας φωτογραφικής μηχανής με τη χρήση πολύ-ευθυγραμμιστών (*multi-collimator*). Επέτυχε έτσι το καλιμπράρισμα της μηχανής και επανέλαβε τις δοκιμές του με τη χρήση φιλμ, αλλά και γυάλινης πλάκας. Εκτός από την παροχή κάποιας στατιστικής σημασίας στις καμπύλες ακτινικής διαστρωφής και στις άλλες παραμέτρους της βαθμονόμησης που υπολόγισε, ο *Hallert* επισήμανε και μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες αυτές που υπολογίζονται από το φιλμ και τις γυάλινες πλάκες. Κατέληξε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι πρέπει να υπάρχουν πρόσθετες πηγές σφαλμάτων στα αρνητικά των φιλμ, που προκαλούνται πιθανώς από την έλλειψη της επιπεδότητας.

Ο *Ziemann* (1986) εισήγαγε τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών και στους μη-φωτογραμμέτρους, μέσα από τους τομείς της ρομποτικής και της όρασης μηχανής, όπου άρχιζαν να εφαρμόζουν τις φωτογραμμετρικές αρχές σε νέα *close-range* πεδία, χρησιμοποιώντας φωτογραφικές μηχανές με αισθητήρες *CCD*.

4.3 Φορείς Διαπίστευσης

4.3.1 Γενικές έννοιες

Χρήσιμο στο σημείο αυτό, και πριν αναλυθούν οι μέθοδοι και η διαδικασία της βαθμονόμησης των φωτογραφικών αερομηχανών, είναι να εξεταστούν κάποιες βασικές έννοιες που αφορούν το ερευνητικό αυτό πεδίο και επίσης οι υπηρεσίες διεθνώς που έχουν αναλάβει τη τυποποίηση και σύνταξη προδιαγραφών για τη διακρίβωση. Συγκεκριμένα:

Πιστοποίηση είναι η διαδικασία με την οποία ένα τρίτο μέρος παρέχει γραπτή διαβεβαίωση

ότι ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια υπηρεσία, συμμορφώνεται με τις προδιαγεγραμμένες απαιτήσεις (ISO/IEC, Οδηγία: 1996).

Διαπίστευση είναι η διαδικασία με την οποία ένας αρμόδιος φορέας παρέχει επίσημη αναγνώριση ότι ένας άλλος φορέας ή πρόσωπο είναι ικανός να πραγματοποιεί ειδικά έργα.

Πιστοποιητικό βαθμονόμησης παρέχεται από διαπιστευμένο εργαστήριο και περιέχει τα αποτελέσματα της διακρίβωσης.

Πρότυπο είναι ένα κείμενο που έχει συνταχθεί και εγκαθιδρυθεί με ομοφωνία από ένα αναγνωρισμένο σώμα και που παρέχει για κοινή και επαναλαμβανόμενη χρήση κανόνες, οδηγίες ή χαρακτηριστικά για δραστηριότητες ή τα αποτελέσματά τους, στοχεύοντας στην επίτευξη σε βέλτιστο βαθμό της **τυποποίησης** στο πλαίσιο ενός δεδομένου περιεχομένου.

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται από ένα διαπιστευμένο εργαστήριο για την διενέργεια των ελέγχων και όλων των μετρήσεων κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, ονομάζονται **πρότυπα όργανα**. Τα πρότυπα όργανα πρέπει και αυτά να συνοδεύονται από πιστοποιητικό βαθμονόμησης και να υπόκεινται στη διαδικασία της βαθμονόμησης σε τακτά χρονικά διαστήματα. Με τον νόμο 2231/94 ιδρύθηκε το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ), προκειμένου να αναπτύξει το Εθνικό Σύστημα Μετρολογίας και να χορηγεί πιστοποιητικά διακρίβωσης πρότυπων οργάνων και υλικών αναφοράς, καθώς και να ελέγχει την τήρηση των σωστών και αντικειμενικών διαδικασιών βαθμονόμησης. Η λειτουργία του έχει ανατεθεί στο Υπουργείο Ανάπτυξης. Τα πρότυπα όργανα και οι σωστές διαδικασίες βαθμονόμησης αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα για τη διαπίστευση ενός εργαστηρίου βαθμονόμησης. Σχηματικά η ιεραρχία των πρότυπων αυτών οργάνων απεικονίζεται στην Εικόνα 4-1 παρακάτω:



Εικόνα 4-1: Η πυραμίδα συσχετισμού των προτύπων οργάνων

Πηγή: Γεωργόπουλος, 2000

4.3.2 Η ανάγκη για πρότυπα και προδιαγραφές

Η ανάγκη για βαθμονόμηση των φωτογραφικών αερομηχανών είναι θεμελιώδης απαίτηση από την απαρχή κιόλας της φωτογραμμετρίας. Δεδομένου τώρα ότι η επιστήμη εξελίσσεται και η τεχνολογία προοδεύει, ο στόχος της βαθμονόμησης γίνεται πιο σύνθετος. Είναι σαφές δηλαδή, ότι η ποιότητα των συστημάτων αυτών έχει βελτιωθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Επίσης, η ανάπτυξη νέων ψηφιακών αισθητήρων και η ολοκλήρωση αυτών με άλλα συστήματα, καθιστούν την ανάγκη για τη βαθμονόμηση τόσο σημαντική όπως πριν, αλλά διαφορετική και πιθανώς πιο δύσκολη στην εκτέλεση.

Ειδικότερα, με την εισαγωγή του *GPS* στις αρχές της δεκαετίας του '90, έγινε εφικτό για πρώτη φορά να μετρηθεί άμεσα το προοπτικό κέντρο του συστήματος φωτογράφισης. Χρησιμοποιώντας λοιπόν ένα διαφορετικό κινηματικό *GPS*, οι συντεταγμένες θέσης των φωτογραφικών μηχανών μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια εκατοστού. Τα συστήματα ακόμα αδρανειακής πλοήγησης (*INS*), μπορούν να παρέχουν μια πλήρη λύση πλοήγησης και ταυτόχρονα να παράσχουν δεδομένα για τη θέση και τη τοποθέτηση της πλατφόρμας φωτογράφισης.

Η πιστοποίηση λοιπόν των συστημάτων αυτών θα αυξήσει την ευελιξία των χρηστών και θα

εξασφαλίζει τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε εθνικά ή διεθνή προγράμματα. Δεδομένης ακόμα της ταχείας ανάπτυξης των φωτογραφικών μηχανών, θα αποφευχθεί η τυχόν πιθανή καθυστέρηση από τις αντιπροσωπείες των οργάνων αυτών και επιπλέον η βαθμονόμηση θα είναι διαθέσιμη για όλους τους τύπους των μηχανών (δηλ. αυτές με υψηλές, αλλά και λιγότερο υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας). Τέλος, η πιστοποίηση αυτή θα είναι σύμφωνη και με όλες τις αποδεκτές διαδικασίες τυποποίησης. Η φωτογραμμετρία λοιπόν και η τηλεπισκόπηση πρέπει να καθορίσουν τα αναγκαία πρότυπα για τη διακρίβωση των φωτογραφικών μηχανών και των αισθητήρων, χρησιμοποιώντας την πείρα και τη γνώση από όλους τους εξειδικευμένους επιστήμονες.

Η ανάγκη αυτή τα τελευταία χρόνια, αφιερώνεται στην ίδρυση και καθιέρωση πεδίων ελέγχου για τη ραδιομετρική και γεωμετρική βαθμονόμηση, τα οποία και θα καλύπτουν διεθνείς προδιαγραφές (έκταση και χαρακτηριστικά, διατήρηση και συντήρησή τους από αναγνωρισμένες επιστημονικές οργανώσεις κ.α.) (Boland, 1999).

Οργανισμοί ή Ιδρύματα, εκτός από τις ίδιες τις κατασκευάστριες εταιρείες, που αυτή τη στιγμή ασχολούνται με τη δημιουργία διαδικασιών βαθμονόμησης, αλλά και τη μελέτη των μεθόδων διακρίβωσης μηχανών αεροφωτογράφισης είναι τα ακόλουθα :

4.3.3 Οργανισμοί παραγωγής προτύπων (*Standards organizations*)

Οι οργανισμοί αυτοί (π.χ., *ANSI, ASTM, ISO, DIN*) έχουν έναν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό και την αποδοχή προτύπων, για τη βαθμονόμηση φωτογραφικών μηχανών και αισθητήρων, για ολόκληρη την επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο, σε μερικούς από αυτούς τους οργανισμούς μπορεί να μην χρειάζεται να περιληφθεί η βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών και αισθητήρων στις αρμοδιότητές τους, ενώ άλλοι ακόμα τυποποιημένοι οργανισμοί δεν μπορούν να ασχοληθούν, λόγω του σχετικά μικρού αριθμού των ενδιαφερομένων. Σε αυτό βέβαια το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί, ότι οι οργανισμοί αυτοί έως και σήμερα, δεν έχουν μελετήσει λεπτομερώς και επακριβώς όσο θα έπρεπε το θέμα, ούτε έχουν καθορίσει κατάλληλες επιτροπές ή διαδικασίες για την δημιουργία συγκεκριμένων προτύπων/προδιαγραφών διακρίβωσης (Boland, 1999). Μέχρι το 1980 ο διεθνής οργανισμός για την τυποποίηση (*ISO*), είχε ενσωματώσει στις Τεχνικές Επιτροπές του, τα πεδία της φωτογραφίας, της οπτικής και των οπτικών οργάνων, ώστε να φροντίσουν για τις απαιτήσεις βαθμονόμησης των φακών στις φωτογραφικές μηχανές. Ακόμα κι έτσι όμως, μέχρι το 1986, υπήρχαν ακόμα διαφορές στο είδος και την έκταση των παραμέτρων που οι διάφορες αρχές βαθμονόμησης ανά τον κόσμο, ανέμεναν να προσδιορίσουν. Έτσι, στις ηπειρωτικές ευρωπαϊκές χώρες, μόνο οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού συνήθως προσδιορίζονταν, ενώ στη Βόρεια Αμερική κάποιο μέτρο της ποιότητας της εικόνας και της επιπεδότητας του εστιακού επιπέδου, καθοριζόταν επίσης στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης.

Τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται σήμερα στο πεδίο της φωτογραμμετρίας είναι τα ακόλουθα:

- *ISO standard 19130: Sensor and data models for imagery and gridded data (restart 2007)*
- *Standard series DIN 18740: Photogrammetric Products (Part 1 – 4).*

Συγκεκριμένα, το τελευταίο είναι ένα Γερμανικό πρότυπο που εστιάζει στα παρακάτω αντικείμενα-μέρη:

- i)** Απαιτήσεις για εναέρια φωτογραμμετρία και αναλογικές μηχανές (*Requirements for aerial survey flight and analogue photograph*), (11-2001).
- ii)** Απαιτήσεις για τη ψηφιοποίηση αεροφωτογραφιών (*Requirements for the scanned aerial photograph*), (02-2005).
- iii)** Απαιτήσεις για τις ορθοφωτογραφίες (*Requirements for the orthophoto*), (10-2003).
- iv)** Απαιτήσεις για τις ψηφιακές αερομηχανές και αεροφωτογραφίες (*Requirements for digital*

aerial cameras and digital aerial photographs), (02-2006). Το τελευταίο αυτό μέρος συνοπτικά αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- ▶ *Digital Aerial cameras*. Οι προδιαγραφές για τη ψηφιακή αερομηχανή αναφέρονται σε:
 - Γενικές απαιτήσεις για τη μηχανή και τα στοιχεία της (*General requirements on camera and its components*).
 - Βαθμονόμηση των μηχανών (*Camera calibration - geometry and radiometry*).
 - Αισθητήρες για το προσδιορισμό της θέσης (*Sensors for positioning and attitude determination*).
- ▶ *Aerial survey flight*.
- ▶ *Digital aerial photograph*.

Οι προδιαγραφές που αναφέρει το παραπάνω πρότυπο και συγκεκριμένα το τέταρτο μέρος του, παρουσιάζονται και συνοψίζονται στο παρακάτω άρθρο (www.beuth.de): «Η βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής πρέπει να τεκμηριωθεί από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης του κατασκευαστή. Η ισχύς τώρα της γεωμετρικής βαθμονόμησης κατά την διάρκεια της πτήσης πρέπει να αποδειχθεί από μια επιπλέον δοκιμή ελέγχου (σε λιγότερο από ένα έτος) ή μια νέα βαθμονόμηση (σε λιγότερο από δύο έτη). Η δοκιμή αυτή πρέπει να γίνει σε ένα ειδικά σημασμένο πεδίο. Η οριζόντια και κάθετη ακρίβεια που λαμβάνεται από την δοκιμή πρέπει να ταυτίζεται με τις προδιαγραφές που δίνονται από τον κατασκευαστή και οι οποίες χρησιμεύουν ως δεδομένα αναφοράς. Η μέγιστη ανοχή μεταξύ του ελέγχου κατά τη πτήση και της βαθμονόμησης πρέπει να είναι κάτω από 25%». Βέβαια στο άρθρο αυτό, δεν γίνεται κανένας λόγος για τον τρόπο σχεδίασης του πεδίου, ούτε και για την διαδικασία ελέγχου συνολικά. Επιπλέον, η μέγιστη επιτρεπόμενη ανοχή του 25% δεν εξηγείται, ούτε καθορίζεται με λεπτομέρεια.

4.3.4 Εθνικές υπηρεσίες (*Federal agencies*)

Οι χαρτογραφικές υπηρεσίες των διαφόρων χωρών, έχουν βεβαίως και αυτές την ανάγκη, αλλά και την ευθύνη, εκτός των ιδιωτικών εταιρειών, για τη βαθμονόμηση αεροφωτογραφικών μηχανών και αισθητήρων. Οι εθνικές υπηρεσίες (π.χ., *USGS, NASA, DOD, GIDEP, IGN, FGI, Swisstopo, ICC, Itacyl, OrdSurv*) λοιπόν, εκτελούν και αυτές την εξασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων τους, μέσω κυρίως του ελέγχου και των προδιαγραφών της διαδικασίας βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών.

▶ Η αμερικάνικη υπηρεσία *USGS*

Η Αμερικάνικη Γεωλογική Υπηρεσία (*USGS*) είναι αρμόδια για τη βαθμονόμηση των αναλογικών αεροφωτογραφικών μηχανών μόνο στις ΗΠΑ. Ειδικότερα από το 1973, την ευθύνη αυτή την έχει το εργαστήριο οπτικής επιστήμης της *USGS* (*OSL*) στο *Reston* της Βιρτζίνια. Ιστορικά, οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν προσεγγίσει τον προσδιορισμό των σταθερών των φακών των φωτογραφικών μηχανών μέσα από μια λειτουργική φωτογραφική μέθοδο, χρησιμοποιώντας πολυευθυγραμμιστές (*multicollimators*), με το πρόγραμμα «*Simultaneous Multiframe Analytical Calibration (SMAC)*», παρά γωνιόμετρα (οπτική μέθοδο). Κατά τη διάρκεια των ετών, το εργαστήριο αυτό έχει κερδίσει την εθνική αναγνώριση για την παροχή αυτής της ουσιαστικής υπηρεσίας. Δεδομένης τώρα της ανάπτυξης της ψηφιακής τεχνολογίας και της επιθυμίας για την ολοένα και περισσότερο χρησιμοποίηση ψηφιακών μηχανών/αισθητήρων, η *USGS* συνεχίζει να βαθμονομεί τις αναλογικές φωτογραφικές μηχανές, αλλά ερευνά και αναπτύσσει διαδικασίες και για τους ψηφιακούς αισθητήρες.

Το 2000 η *USGS* και η *ASPRS* (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) δημιούργησαν μια ομάδα εμπειρογνομόνων από τους τομείς της βιομηχανίας, της κυβέρνησης και της ακαδημαϊκής εκπαίδευσης, για να εξετάσει τα θέματα διακρίβωσης των ψηφιακών μηχανών. Επίσης, το 2005 μια ακόμα ομάδα με την επωνυμία «*Inter-Agency*

Digital Imagery Working Group (IADIWG)», σχηματίστηκε από τη *USGS* και άλλες κυβερνητικές υπηρεσίες. Ο σκοπός αυτής της ομάδας ήταν να προσδιορίσει τις απαιτήσεις και τα ζητήματα σχετικά με τη ψηφιακή απεικόνιση, τις οδηγίες και τις πολιτικές που είναι κοινές για όλες τις υπηρεσίες. Έχοντας λοιπόν αρκετές διαφορές σε σχέση με τη εργαστηριακή βαθμονόμηση των αναλογικών φωτογραφικών μηχανών, η πιστοποίηση μετατοπίζεται από τη μεμονωμένη πιστοποίηση των μηχανών, στη πιστοποίηση ολόκληρης της γραμμής παραγωγής του εκάστοτε αισθητήρα (πιστοποίηση τύπων – *Type Certification*). Σύμφωνα με τη *USGS*, η μεμονωμένη πιστοποίηση των συστημάτων, δεν είναι πλέον αντικείμενο των προμηθευτών τους, αλλά μετατοπίζεται δηλαδή και στους προμηθευτές των δεδομένων (δηλ. στις επιχειρήσεις που πετούν με ένα μεμονωμένο σύστημα φωτογραφικών μηχανών και επεξεργάζονται τα δεδομένα του για να λάβουν το τελικό προϊόν).

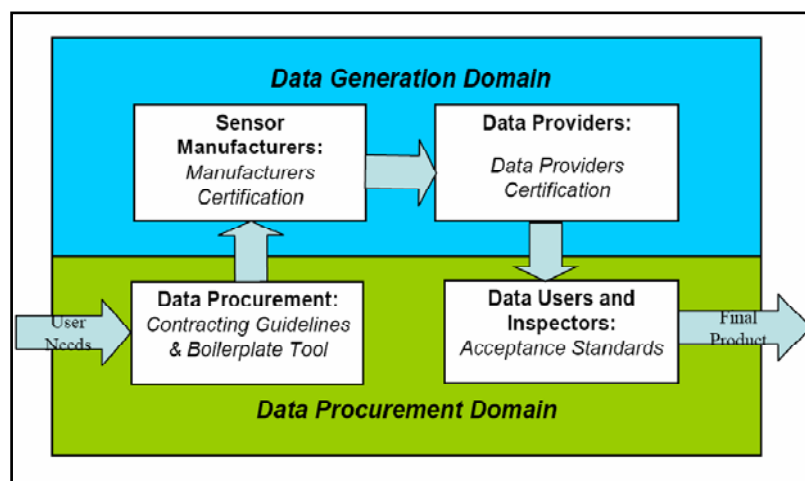
Η *USGS* λοιπόν, από κοινού με τους συνεργάτες της, έχει προχωρήσει στη καθιέρωση μιας διαδικασίας εξασφάλισης της ποιότητας για τα ψηφιακά εναέρια συστήματα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, ώστε να εκπληρώσει τη μακροπρόθεσμη ανάγκη και απαίτηση της πλειοψηφίας των εφαρμογών και του κοινού. Αυτή η διαδικασία (*USGS Quality Assurance Plan for Digital Aerial Imagery*) (Σχήμα 4-1) που περιλαμβάνει τέσσερα σημαντικά συστατικά, το σπουδαιότερο εκ των οποίων είναι η πιστοποίηση τύπων αισθητήρων (*Sensor Type Certification*), είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και αποτελείται από:

α) Ομοσπονδιακές γενικές οδηγίες συμβάσεων για τις ψηφιακές μηχανές (*Federal Digital Imagery General Contracting Guidelines*).

β) Πιστοποίηση τύπων ψηφιακών εναέριων αισθητήρων (*Digital Aerial Sensor Type Certification*).

γ) Πιστοποίηση προμηθευτών δεδομένων (*Data Provider Certification*).

δ) Πρότυπα και οδηγίες αποδοχής δεδομένων (*Data Acceptance Standards and Guidelines*).



Σχήμα 4-1: Διαδικασία εξασφάλισης ποιότητας για τα ψηφιακά εναέρια συστήματα από την *USGS*

Πηγή: *Cramer, 2007*

Η πιστοποίηση αυτή των τύπων (*Sensor Type Certification*) της *USGS* αποβάλλει το φόρτο της βαθμονόμησης κάθε μιας ξεχωριστής μηχανής και επίσης επικυρώνει ότι όλο το σύστημα, όταν χρησιμοποιείται σύμφωνα με τις παραμέτρους του κατασκευαστή, έχει μια μεγάλη πιθανότητα να παράγει αξιόπιστα προϊόντα που καλύπτουν τις αξιώσεις του κατασκευαστή για αυτό το σύστημα (Stensaas, 2007). Μέχρι το Μάιο του 2007, η *USGS* είχε πιστοποιήσει τρεις εμπορικές ψηφιακές αερομηχανές. Την ψηφιακή φωτογραφική μηχανή *DMC* της *Intergraph/ZI-Imaging*, το ψηφιακό σύστημα *DSS-322* της *Applanix* και την *UltracamD* από τη *Microsoft /Vexcel*. Πρόσθετες επίσης πιστοποιήσεις, οι οποίες έχουν προγραμματιστεί ή ολοκληρωθεί, αφορούν τις: *ADS40* (*Leica Geosystems*, Ελβετία) και τη ψηφιακή αερομεταφερόμενη φωτογραφική μηχανή *DiMAC* (*Dimac Systems*, Λουξεμβούργο).

Κατά συνέπεια, στη σημερινή κατάσταση η *USGS* έχει πιστοποιήσει όλα σχεδόν τα γνωστά

συστήματα που είναι σε χρήση και ανταγωνίζονται το ένα το άλλο. Τα μη πιστοποιημένα συστήματα, γίνονται αποδεκτά ακόμα για εφαρμογές χαρτογράφησης στις ΗΠΑ, αν και η πιστοποίηση της USGS φαίνεται ότι τελικά θα γίνει μια υποχρεωτική απαίτηση για όλα τα μελλοντικά προγράμματα στις ΗΠΑ.

► Διεθνώς

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εθνικών υπηρεσιών που δραστηριοποιούνται στον έλεγχο και πιστοποίηση των αναλογικών ή ψηφιακών αερομηχανών, αποτελούν η *Landmateriat (Swedish Land Survey)* και η *ICC (Catalonian Land Survey)*, οι οποίες έχουν ελέγξει τη μηχανή *DMC* σε δύο ερευνητικά προγράμματα. Ο Καναδάς επίσης, μέσω του *National Research Council (NRC)* στην Οττάβα, έχει ασχοληθεί με τον γεωμετρικό έλεγχο των αερομηχανών. Η Φινλανδία με το *Finnish Geodetic Institute (FGI)* και την εθνική Τοπογραφική Υπηρεσία (*NLS*) έχει βαθμονομήσει αρκετές μηχανές, αναλογικές ή ψηφιακές στο πεδίο ελέγχου *Sjökulla*. Από την άλλη πλευρά, η *GSI* στην Ιαπωνία χρησιμοποιεί για αυτό το σκοπό ένα γωνιόμετρο (*Wild AKG Autocollimating*), αν και αυτό το όργανο είναι πραγματικά κατάλληλο μόνο για τις φωτογραφικές μηχανές με παλαιότερες γενεές φακών. Επίσης, η Αυστραλία, η Κίνα, η Νότια Αφρική, η Σουηδία και το *UK* διαθέτουν αυτό το όργανο, παρόλο που δεν γνωρίζουμε αν αυτά τα όργανα είναι ακόμα σε χρήση από αυτές τις χώρες. Ειδικά για το Ηνωμένο Βασίλειο, η *Ordnance Survey* έχει εκτελέσει δοκιμές και με τις τρεις, μεγάλου *format*, ψηφιακές μηχανές, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον στην ακρίβεια του αεροτριγωνισμού, των *DTM* και του προσδιορισμού της θέσης ενός σημείου. Η Αυστρία έχει ερευνήσει την απόδοση της *UltraCamD* και της *ADS40*, μέσω της υπηρεσίας *BEV*, δίνοντας έμφαση στην ακρίβεια των σημείων και στην ανάλυση της λειτουργικότητας τους. Η Ελβετία τέλος, με το *Swiss Federal Office of Topography (swisstopo)*, έχει ελέγξει την γεωμετρική και ραδιομετρική απόδοση της *ADS40* και κυρίως τις απαιτήσεις της στην αποθήκευση των δεδομένων και την ανάγκη *online* διάθεσης τους.

4.3.5 Κατασκευαστές

Η παραδοσιακή εργαστηριακή βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών γίνεται από τους κατασκευαστές τους (π.χ. η σειρά *RMK* της *Zeiss* στο *Oberkochen* και η σειρά *RC* της *Wild/Leica* στο *Herrbrugg*). Το υλικό αυτό, καθώς και οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα εκεί, πιστοποιούνται σύμφωνα με κάποιους εθνικούς κανονισμούς/οργανισμούς, όπως το *Deutscher Kalibrierdienst* στη Γερμανία. Είναι σαφές τα πλεονεκτήματα από την κατοχή, από τους κατασκευαστές, εξοπλισμού που να παρέχουν την απαραίτητη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών ή αισθητήρων. Οι κατασκευαστές αυτοί (Πίνακας 4-1) έχουν πλήρη κατανόηση για το πώς ο εκάστοτε εξοπλισμός σχεδιάστηκε, αλλά και τα χαρακτηριστικά απόδοσής του. Έχουν επίσης το ιδιαίτερα εκπαιδευμένο και πεπειραμένο προσωπικό και τον απαραίτητο εξοπλισμό δοκιμής τους. Εξάλλου γνωρίζουμε καλά, ότι οι αεροφωτογραφικές μηχανές που πωλούνται σε όλο τον κόσμο, είτε δεν καλιμπράρονται ποτέ ξανά, είτε επιστρέφονται στους αντίστοιχους κατασκευαστές τους για την επαναδιακρίβωσή τους.

#	Organization	Camera system (concept)	
1	Leica Geosystems	ADS 40 (line)	Private companies
2	ZI-Imaging	DMC (frame, multi-head)	
3	Vexcel	UltraCam (frame, multi-head)	
4	Applanix/Emerge	DSS (frame)	
5	Cicade	DIMAC (frame)	
6	Ohio State University	AIMS (frame)	Academic sector
7	ETH Zurich	TLS (line)	
8	IGN	IGN (frame)	

Πίνακας 4-1: Κατασκευαστικοί οίκοι αερομηχανών

Πηγή: Cramer, 2004

4.3.6 Ανεξάρτητοι οργανισμοί πιστοποίησης

Όπως κάθε προϊόν, έτσι και οι αερομηχανές με τα παρελκόμενά τους, μπορεί να ελεγχθούν και από έναν ανεξάρτητο οργανισμό-εταιρεία όπως π.χ. τα *Underwriters Laboratories, Inc, Vito, Geosys, OMC, Stereocarto*, για τις τεχνικές προδιαγραφές τους, τη λειτουργία τους, την ανάλυση των αστοχιών τους, ή για οτιδήποτε άλλο. Για παράδειγμα στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι εργαστηριακές βαθμονομήσεις εκτελούνταν έως το 2006 από την εμπορική επιχείρηση *BLOM Simmons Aerofilms*. Ας μην ξεχνάμε ακόμα, ότι ο ανεξάρτητος έλεγχος είναι γενικά επιθυμητός και από τους κατασκευαστές, αλλά και από τους καταναλωτές, λόγω της ύπαρξης του στοιχείου της αντικειμενικότητας. Αποτελεί επίσης και μια ορθή επιχειρηματική πρακτική.

4.3.7 Επιστημονικές κοινότητες

Μέσα από τις πολλές επιστημονικές κοινότητες που υπάρχουν ανά τον κόσμο, εξασφαλίζεται η ακεραιότητα και η ανάπτυξη της έρευνας, μέσω των δοκιμών, της χορήγησης αδειών, της συμμετοχής σε αυτές διαφόρων εκπαιδευτικών ιδρυμάτων, των προγραμμάτων πιστοποίησης, της επιθεώρησης, της κατάρτισης, και της ανάπτυξης προτύπων. Η *ASPRS*, όσον αφορά την αντιπροσώπευση της αμερικάνικης θέσης στη βαθμονόμηση των αισθητήρων και η *ISPRS* στο διεθνές μέτωπο, μπορούν να διαδραματίσουν έναν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό προτύπων για τη διακρίβωση και την επιτήρηση της όλης υποδομής. Ο ρόλος βέβαια του *ISPRS*, για πάνω από δύο δεκαετίες, περιοριζόταν μόνο στην υποβολή προτάσεων για αυτές τις διαδικασίες, χωρίς να καθορίζονται τελικά πρότυπα. Από το 2003, επιτροπή της *ISPRS* έχει οργανώσει ένα Διεθνές Εργαστήριο για τη ραδιομετρική και γεωμετρική βαθμονόμηση μηχανών στο *Gulfport* του Μισισιπή, στις ΗΠΑ. Επίσης, το *Ohio State University (OSU)* άρχισε ένα πρώτο πρόγραμμα μαζί με τη *USGS* για να καλύψει τους νέους τομείς της βαθμονόμησης των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών. Υπάρχουν λοιπόν δραστηριότητες που καθιερώνουν διάφορα κέντρα βαθμονόμησης στις ΗΠΑ. Το *OSU* χρησιμοποιεί ήδη ως περιοχή δοκιμής, το αεροδρόμιο του *Columbus* για το καλιμπράρισμα των φωτογραφικών μηχανών. Μερικά από τα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα που συμμετέχουν σε προγράμματα διακρίβωσης αερομηχανών είναι (Πίνακας 4-2):

HfT	University of Applied Science, Stuttgart, Germany
IPI	IPI, University of Hannover, Germany
ETH	ETH Zürich, Switzerland
UoP	University of Pavia, Italy
UoN	University of Nottingham, England

Πίνακας 4-2: Εκπαιδευτικά ιδρύματα

Πηγή: *Cramer, 2005*

4.3.8 Ο ευρωπαϊκός οργανισμός European Spatial Data Research (EuroSDR)

Οι λόγοι αρχικά που επιβάλλουν μια πανευρωπαϊκή προσέγγιση για τη πιστοποίηση των μηχανών είναι κυρίως:

- Οι διαφορετικές παράμετροι των απαιτήσεων κατά τη πτήση, αλλά και στο μέγεθος των *project*.
- Οι πιο αυστηρές απαιτήσεις στην ανάλυση και την ακρίβεια.
- Οι διαφορετικές κατηγορίες ακρίβειας, που απαιτούνται για τους διάφορους ευρωπαϊκούς χρήστες.
- Η πιστοποίηση τύπων, σε αντίθεση με τη μεμονωμένη πιστοποίηση των αισθητήρων (σε σχέση με τον αύξων αριθμό της μηχανής).

- Η νέα τεχνολογία της ψηφιακής αερομεταφερόμενης απεικόνισης που δημιουργείται κυρίως στην Ευρώπη, π.χ. *ADS40 (SW)*, *DMC (D)*, *UC-D/X (A)*, *DiMAC (L)*, *JAS-150 (D)*, *HRSC (D)*, *AIC-Rolleimetric (D)*, *DigiCAM (D)*, *IGN-Camera (F)*.
- Η αποδεκτή χρήση των συστημάτων αυτών σε όλη την Ευρώπη πρέπει να βασιστεί σε μια πανευρωπαϊκή πιστοποίησή τους.
- Υπάρχει η τάση να καθιερωθούν μόνιμες περιοχές ελέγχου, για την αξιολόγηση των μηχανών (όπως αντίστοιχα το πεδίο δοκιμής-πιστοποίησης «*Stennis*» της *NASA*).
- Η Ευρώπη έχει καθορίσει ήδη τις ενέργειές της και σε άλλα προγράμματα (π.χ. *GALILEO*, *GNSS*).
- Όχι μόνο ο ανταγωνισμός, αλλά και η υποστήριξη / συμπλήρωση των μεθόδων μεταξύ τους.

Η αποστολή λοιπόν του *EuroSDR* συνίσταται:

- Στην ανάπτυξη και βελτίωση μεθόδων, συστημάτων και προτύπων για την επεξεργασία, την παραγωγή, τη συντήρηση και τη διάδοση χωρικών πληροφοριών, αλλά και στην προώθηση των εφαρμογών αυτών των δεδομένων.
- Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη περαιτέρω ανάπτυξη αερομεταφερόμενων και διαστημικών μεθόδων για την απόκτηση στοιχείων, στις μεθόδους για την εξαγωγή πληροφοριών από αυτές τις πηγές και στην ολοκλήρωση αυτών των πληροφοριών με τις πληροφορίες από άλλες πηγές.
- Ενθάρρυνση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ερευνητικών οργανώσεων, του δημοσίου και του ιδιωτικού τομέα, με σκοπό, την ανταλλαγή ιδεών για όλα τα σχετικά ερευνητικά προβλήματα και τη μετάδοση των ερευνητικών αποτελεσμάτων που επιτυγχάνονται από τους διάφορους οργανισμούς παραγωγής χωρικών δεδομένων.

Οι δραστηριότητες του *EuroSDR*, πρώην *OEEPE (European Organization for Experimental Photogrammetric Research)* που ιδρύθηκε το 1953, και στις οποίες μετέχουν 17 χώρες, όσον αφορά τη βαθμονόμηση και πιστοποίηση των φωτογραφικών μηχανών περιλαμβάνει σήμερα:

- **Ένα δίκτυο βαθμονόμησης ψηφιακών μηχανών (*Digital Camera Calibration Network*).** Από το φθινόπωρο του 2003, έως την άνοιξη του 2007 έχουν λάβει χώρα δύο φάσεις, η θεωρητική (*PHASE 1*), η οποία αφορούσε τη συλλογή όλου του δημόσια διαθέσιμου υλικού και τη σύνταξη μια εκτενούς έκθεσης για τις χρησιμοποιούμενες πρακτικές και μεθόδους βαθμονόμησης και η εμπειρική (*PHASE 2*), η οποία αφορούσε την ανάλυση των πτήσεων δοκιμής και τη σύσταση των καλύτερων μεθόδων για τη βαθμονόμηση/διακρίβωση των φωτογραφικών μηχανών.
- **Τη δημιουργία του *EuroDAC² (European Digital Airborne Camera Certification)*.** Το πρόγραμμα αυτό, το οποίο έχει 5 στάδια (Πίνακας 4-3), ξεκίνησε από το φθινόπωρο του 2006 και συνεχίζεται έως σήμερα. Αφορά την εφαρμογή μιας πανευρωπαϊκής διαδικασίας πιστοποίησης ψηφιακών μηχανών. Ο οργανισμός αυτός, ο οποίος συνεργάζεται με τις Εθνικές Υπηρεσίες Χαρτογράφησης και Κτηματολογίου (*NMCA*), αλλά και με τους προμηθευτές των αερομηχανών, έχει ως στόχο τη δημιουργία άμεσα, μιας κοινά αποδεκτής διαδικασίας πιστοποίησης, η οποία θα υιοθετείται αυτόματα από όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες και δεν θα χρησιμοποιούνται έτσι μεμονωμένες εθνικές λύσεις.
- **Το πρόγραμμα “*geometric and radiometric performance of digital medium format cameras*”.** Το πρόγραμμα αυτό έχει αρχίσει ήδη από το χειμώνα του 2007, υπό την εποπτεία του Πανεπιστημίου του *Rostock*. Παρόμοια με το δίκτυο βαθμονόμησης ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, μια πρώτη θεωρητική φάση που επικεντρώνεται στη σημερινή κατάσταση των μεσαίου *format* ψηφιακών μηχανών, θα συνεχιστεί με την πρακτική έρευνα πάνω στις γεωμετρικές και ραδιομετρικές πτυχές της διακρίβωσής τους. Η πρώτη φάση έχει τελειώσει και τα συμπεράσματα παρουσιάζονται ήδη από τον *Grenzdörffer (2008)*.

#	Process step
(1)	Evaluation of users needs / expectations <i>Action: (mainly) NMCAs and others</i>
(2)	Input from camera manufacturers <i>Action: (mainly) system suppliers and others</i>
(3)	Definition of EuroDAC ² process <i>Action: (mainly) EuroDAC² core group</i>
(4)	Acceptance of EuroDAC ² process <i>Action: (mainly) NMCAs, system suppliers and others</i>
(5)	Implementation of EuroDAC ² process

Πίνακας 4-3: Στάδια προγράμματος EuroDAC²

Πηγή: Cramer, 2007

4.4 Ταξινόμηση Μεθόδων Διακρίβωσης Φωτογραφικών Μηχανών

Οι διάφορες μέθοδοι για τη διακρίβωση και βαθμονόμηση των μηχανών διακρίνονται γενικά σε (Γεωργόπουλος, 2000):

- Εργαστηριακές ή πεδίου, ανάλογα με τον τόπο διεξαγωγής τους.
- Οπτικές ή φωτογραφικές, ανάλογα με το αν συμμετέχει ή όχι η φωτογραφική διαδικασία.
- Άπειρης ή κοντινής εστίασης, ανάλογα με την απόσταση εστίασης του φακού.



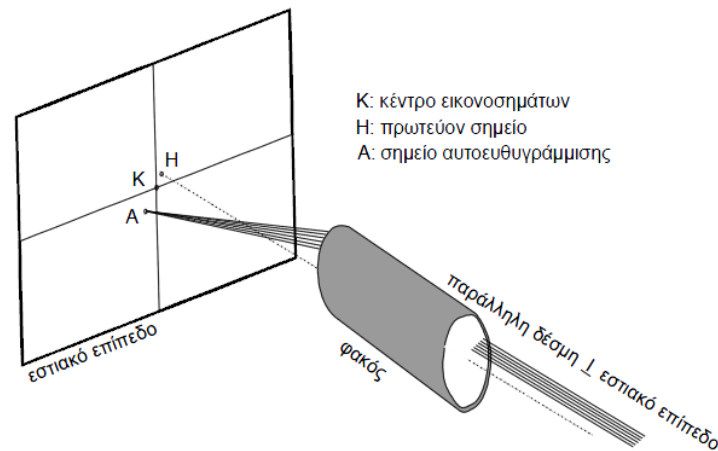
Σχήμα 4-2: Μέθοδοι βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών

Πηγή: Γεωργόπουλος, 2000

4.5 Οπτική Μέθοδος Βαθμονόμησης

Η **οπτική μέθοδος** (Γεωργόπουλος, 2000) συναντάται μόνο σε ειδικά εξοπλισμένα για το σκοπό αυτό εργαστήρια, που συνήθως διαθέτουν μόνο οι φωτογραμμετρικοί οίκοι και για το λόγο αυτό συναντάται και στη διεθνή βιβλιογραφία μόνο σαν **εργαστηριακή μέθοδος (laboratory method)** (Zhizhuo, 1990). Απευθύνεται δε κυρίως σε εναέριες φωτομηχανές που εστιάζουν στο άπειρο, αλλά και σε κάθε άλλη μηχανή αυτής της κατηγορίας. Η απόσταση εστίασης είναι δηλαδή ένας παράγων κατηγοριοποίησης των μεθόδων, καθώς υπαγορεύει κάποιους περιορισμούς ή και πλεονεκτήματα. Και αυτό γιατί, οι παράλληλες φωτεινές δέσμες που προσπίπτουν στο φακό εστιάζονται (συγκλίνουν σε σημείο) πάνω στο εστιακό επίπεδο (αρνητικό). Από αυτό συνάγεται ότι μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα το *Σημείο Αυτοευθυγράμμισης (Autocollimation)*, δηλαδή εκείνο το σημείο του εστιακού επιπέδου πάνω στο οποίο εστιάζεται από το φακό μια παράλληλη δέσμη με αρχική διεύθυνση κάθετη στο εστιακό επίπεδο (Σχήμα 4-3). Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί με τον καθαρά οπτικό αυτό

τρόπο, είναι δυνατό να ορίζεται πάντοτε το ίδιο σημείο ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων, στο οποίο θα αναφερθούν οι παραπέρα μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει ακόμα το βασικό πλεονέκτημα ότι είναι ανεξάρτητη από κάθε φωτογραφική διαδικασία, που ενδεχομένως θα ήταν πηγή και άλλων σφαλμάτων.



Σχήμα 4-3: Ορισμός σημείου αυτοευθυγράμμισης
Πηγή: Γεωργόπουλος, 2000

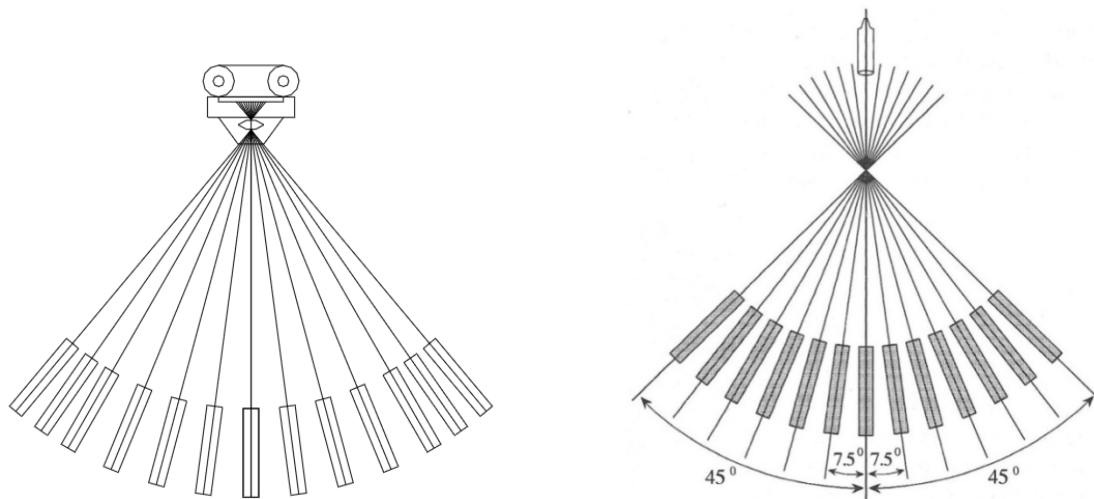
Τα όργανα και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, βασίζονται στη λογική προσδιορισμού της σταθεράς c του συστήματος των φακών, με παρατηρήσεις στις ποσότητες γωνιών και ακτινικών αποστάσεων, στη βάση των εκφράσεων της συνάρτησης της εικόνας (3.5-3). Η μέθοδος αυτή, περιλαμβάνει τη **μέθοδο των ευθυγραμμιστών** και τη **μέθοδο του γωνιομέτρου** (Πατιάς, 1994) και στηρίζεται στην αρχή της συμφωνίας της δέσμης των οπτικών ακτίνων στο χώρο του αντικειμένου και στο χώρο της εικόνας, οπότε αν είναι επακριβώς γνωστή η δέσμη στο χώρο του αντικειμένου, από τη συμφωνία αυτή μπορούν να εξαχθούν τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού (Kraus, 1997). Οι δύο αυτές μέθοδοι, εντάσσονται στη βαθμονόμηση των χαρακτηριστικών μερών του συστήματος (*component method*) (ASPRS, 2000).

4.5.1 Βαθμονόμηση με τη χρήση ευθυγραμμιστών

Οι ευθυγραμμιστές (*collimators*) είναι όργανα (δίοπτρα σκόπευσης και κατεύθυνσης ακτίνων), τα οποία είναι εστιασμένα στο άπειρο, εξοπλισμένα με σταυρόνημα που αποτελείται από ένα κεντρικό σταυρό και ένα διάγραμμα ελέγχου διαχωριστικής ικανότητας και εκπέμπουν μια δέσμη παράλληλων φωτεινών ακτίνων αυτών των στοιχείων.

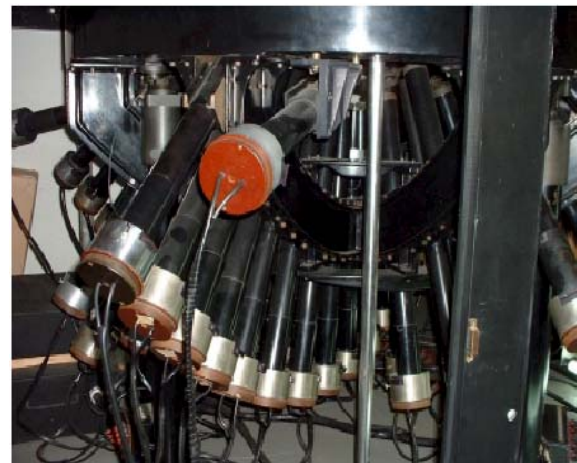
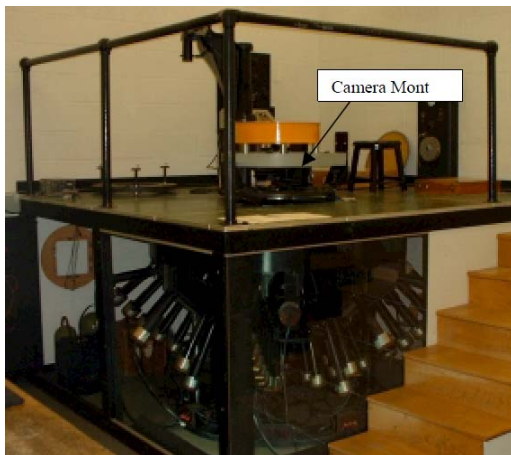
Η βαθμονόμηση της μηχανής επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας ομάδας ευθυγραμμιστών (**multi-collimators**) (Σχήμα 4-4), οι οποίοι τοποθετούνται σε ένα επίπεδο και εκπέμπουν φωτεινές ακτίνες με ορισμένη κλίση στη φωτομηχανή, που αποτυπώνονται στο αρνητικό.

Οι ευθυγραμμιστές, είναι διατεταγμένοι σε δυο επίπεδα και βλέπουν προς μια βάση υποδοχής της μηχανής, διαφορετικής ανά κατασκευαστή (Εικόνα 4-2). Είναι εστιασμένοι στο άπειρο, με τον κεντρικό ευθυγραμμιστή να έχει διεύθυνση που πρέπει να ταυτίζεται με τον θεωρούμενο «οπτικό άξονα» της μηχανής (Zhizhuo, 1990) και τους λοιπούς, να είναι τοποθετημένοι σε γωνιακά διαστήματα περίπου των $7,5^\circ$ συνήθως (DeMumbum, 2002; Washer & Case, 1950). Η ακριβής γωνιακή σχέση ανάμεσα στα σταυρονήματα των ευθυγραμμιστών, υπολογίζεται με μετρήσεις ακριβείας με θεοδόλιχο με τη βοήθεια ενός τηλεσκοπίου και ενός πρίσματος αντανάκλασης, που προσαρμόζεται κατάλληλα στο όργανο.



Σχήμα 4-4: Ομάδα ευθυγραμμιστών (multicollimator system)-1

Πηγή: DeMumbrum, 2002 (αριστερά)- Πατιάς, 1994 (δεξιά)



Εικόνα 4-2: Ομάδα ευθυγραμμιστών (multicollimator system)-2

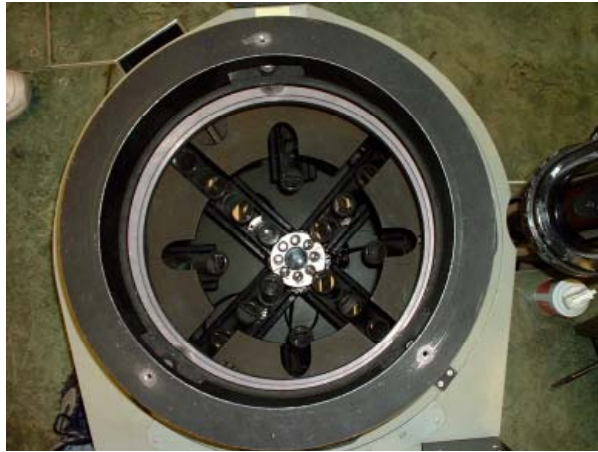
Πηγή: DeMumbrum, 2002

Αναλόγως βέβαια με την κατασκευή της όλης εγκατάστασης, μπορεί να υπάρξουν διαφοροποιήσεις, ως προς την τοποθέτηση της ομάδας των ευθυγραμμιστών.

Σκοπός καθενός από αυτούς, είναι να προβάλλουν την εικόνα του σταυρονήματός τους, χρησιμοποιώντας μια δέσμη παραλλήλων ακτίνων και τότε η εικόνα που προκύπτει συμπίπτει με μια εικόνα **άπειρης εστίασης**, εξομοιώνοντας έτσι τις εικόνες που λαμβάνονται από την **εναέρια φωτομηχανή**. Το όλο σύστημα χρησιμοποιεί δυο ομάδες ευθυγραμμιστών, τοποθετημένων σε κάθετα επίπεδα, όπως στην Εικόνα 4-2, έτσι ώστε να προβάλλονται οι εικόνες τους σε ολόκληρο το φορμάτ της μηχανής. Η μηχανή τοποθετείται έτσι ώστε οι εικόνες των ευθυγραμμιστών, να διατρέχουν τις διαγώνιους της λαμβανομένης εικόνας (Σχήμα 4-5), με μια διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

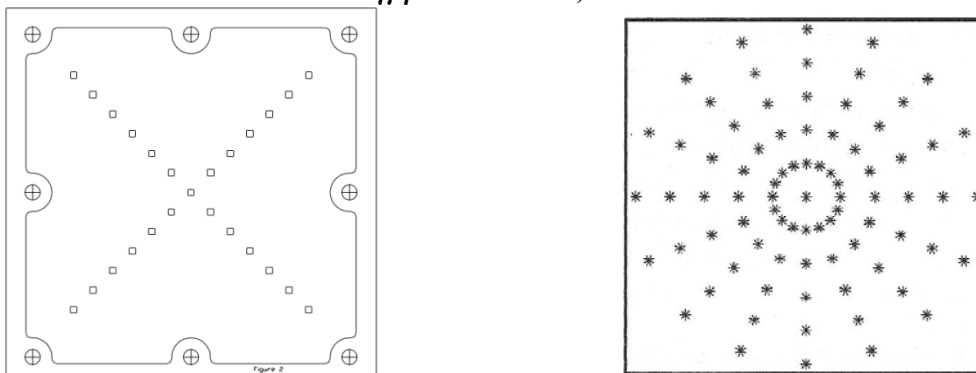
Η ορθή τοποθέτηση της μηχανής, παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία. Ο χειριστής του οργάνου με μικρομετακινήσεις του τηλεσκοπίου παρατήρησης, που διαθέτει το όργανο φροντίζει ώστε το σταυρόνημα αυτού του τηλεσκοπίου να ταυτιστεί με το σταυρόνημα του κεντρικού ευθυγραμμιστή.

Τότε τοποθετείται η μηχανή στη βάση του οργάνου (*camera mount*) (Εικόνα 4-3), αρχικά λίγο πλάγια και στη συνέχεια έρχεται κάθετα με μικρομετακινήσεις, ταυτίζοντας τον κεντρικό ευθυγραμμιστή με τον άξονα του φακού της. Με τις μικρομετακινήσεις αυτές, που περιλαμβάνουν και στροφές, οι εικόνες των κάθετα τοποθετημένων ευθυγραμμιστών συμπίπτουν τελικά με τις διαγώνιους του εστιακού επιπέδου (Σχήμα 4-5).



Εικόνα 4-3: Εικόνα (από πάνω) της βάσης τοποθέτησης της μηχανής

Πηγή: DeMumbrum, 2002

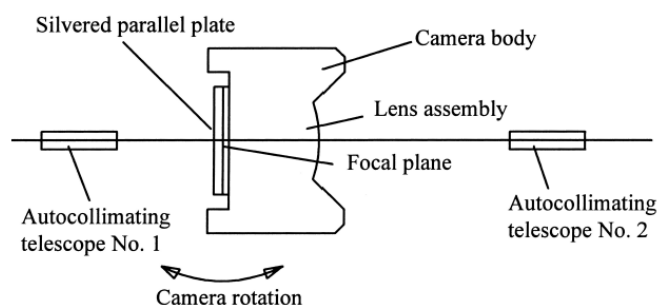


Σχήμα 4-5: Αποτύπωση εικόνας ευθυγραμμιστών χωρίς περιστροφή (αριστερά) και με περιστροφή (δεξιά) της μηχανής

Πηγή: DeMumbrum, 2002 (αριστερά)- Πατιάς, 1994 (δεξιά)

Η μηχανή δηλαδή τοποθετείται κατακόρυφα, έτσι ώστε η τομή των προβολών των ευθυγραμμιστών να είναι το εξωτερικό προβολικό κέντρο και περιστρέφοντας την, οι προβολές των ευθυγραμμιστών να μην βρίσκονται μόνο κατά μήκος των διαγωνίων του φορμάτ της μηχανής, αλλά σε ολόκληρη την εικόνα (Σχήμα 4-5). Μετά από αυτή τη διαδικασία η μηχανή σταθεροποιείται στη θέση της, προκειμένου να αποφευχθούν περαιτέρω μετακινήσεις.

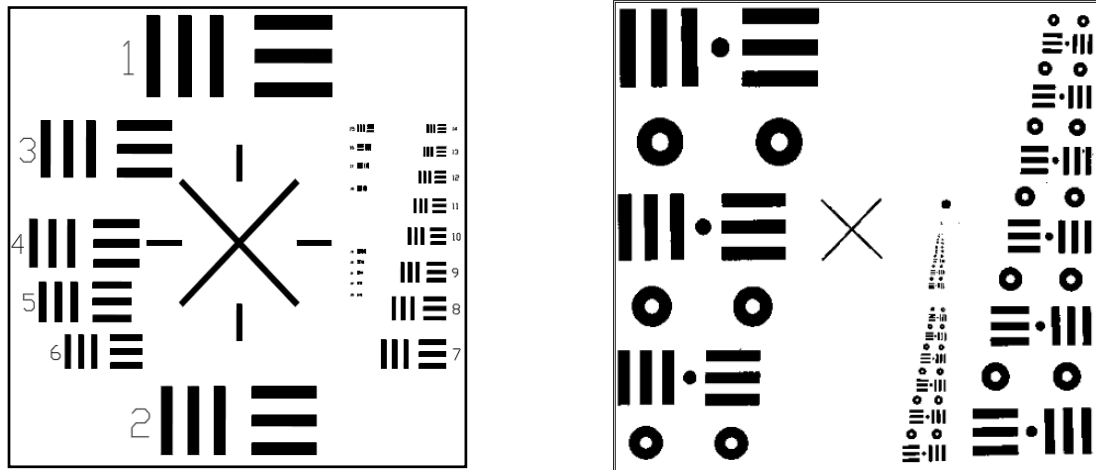
Στη συνέχεια μια οπτικά επίπεδη γυάλινη πλάκα, που είναι επαργυρωμένη από τη μια της πλευρά και φέρει σταυρόνημα στο κέντρο της, προσαρμόζεται στο εστιακό επίπεδο της μηχανής. Κοιτώντας από το τηλεσκόπιο παρατήρησης (το σταυρόνημα του οποίου έχει από πριν ευθυγραμμιστεί με το σταυρόνημα του κεντρικού ευθυγραμμιστή των 0°) ρυθμίζεται με μικρομετακινήσεις το εστιακό επίπεδο της μηχανής (χαλαρώνοντας τις αντίστοιχες βίδες), ώστε να ταυτιστεί το σταυρόνημα του τηλεσκοπίου με εκείνο της γυάλινης πλάκας (Washer & Case, 1950).



Σχήμα 4-6: Ευθυγράμμιση μηχανής στο σύστημα multicollimator

Πηγή: Clarke, Wang, & Fryer, 1998

Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία απομακρύνεται η γυάλινη πλάκα και τη θέση της παίρνει ένα ειδικό φωτογραφικό επίπεδο, που προσαρμόζεται στο εστιακό επίπεδο της μηχανής και υποβάλλεται στην έκθεση των εικόνων των ευθυγραμμιστών. Στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζεται μια αναπαραγωγή του «αποτύπωματος», που δημιουργείται από τον κάθε έναν ευθυγραμμιστή επί του φωτογραφικού επιπέδου και όπου αναλόγως της κατασκευής παρατηρούνται κάποιες διαφοροποιήσεις.



Σχήμα 4-7: «Αποτύπωμα» εικόνας καθ' ενός ευθυγραμμιστή στο φωτογραφικό επίπεδο (αναφερόμενα αντίστοιχα στις διατάξεις που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-2:).

Πηγή: DeMumbrum, 2002 (αριστερά)- Washer & Case, 1950 (δεξιά)

Η εικόνα που δημιουργείται από τον κάθε έναν ευθυγραμμιστή παρέχει δυο τύπους μετρήσιμης πληροφορίας: Της ακρίβειας θέσης και της διαχωριστικής ικανότητας.

Η ακρίβεια θέσης αξιολογείται μετρώντας την ακτινική μετατόπιση του κεντρικού σταυρονήματος που αποτυπώνεται στη γυάλινη πλάκα, σε σχέση με τη γνωστή του θέση από τις μετρήσεις ακριβείας της θέσης των ευθυγραμμιστών.

Το «αποτύπωμα» της εικόνας των ευθυγραμμιστών, περιλαμβάνει επίσης στόχους-πρότυπα ελέγχου (διαφόρων μορφών, μεγεθών και προσανατολισμού) της ικανότητας του συστήματος να αναπαράγει πολύ κοντινές ξεχωριστές γραμμές ή άλλα στοιχεία, ικανότητα που είναι γνωστή ως *resolving power (RP)* (Read & Graham, 2002) ή *resolution* (Spriggs, 1966) ή διαχωριστική ικανότητα (Γεωργόπουλος & Χλιβερού, 2003). Προσδιορίζεται υπολογίζοντας πόσες γραμμές ή ζεύγη γραμμών, μπορούν να μετρηθούν ανά χιλιοστό. Η μέτρηση της ικανότητας αυτής, πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας συσκευής μεγέθυνσης που τοποθετείται σε μια καθορισμένη απόσταση από το ειδικό φωτογραφικό επίπεδο, προκειμένου να προσδιοριστεί ο μέγιστος αριθμός των γραμμών, που μπορούν να διακριθούν με κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης (DeMumbrum, 2002).

Η χρήση των προτύπων αξιολόγησης της διαχωριστικής ικανότητας γίνεται παρόλο που το περιορισμένο μέγεθος των αντίστοιχων στόχων, που είναι ενσωματωμένοι στους ευθυγραμμιστές, απαγορεύουν την αξιολόγηση της *RP* του φακού της μηχανής στο μέγιστο άνοιγμα του διαφράγματος. Ωστόσο η συμπερίληψή τους, επιτρέπει την αξιολόγηση σε μικρότερα ανοίγματα διαφράγματος (Washer & Case, 1950), όπου απομονώνονται οι ακραίες οπτικές ακτίνες, στις οποίες η επίδραση των σφαλμάτων των φακών είναι εντονότερη.

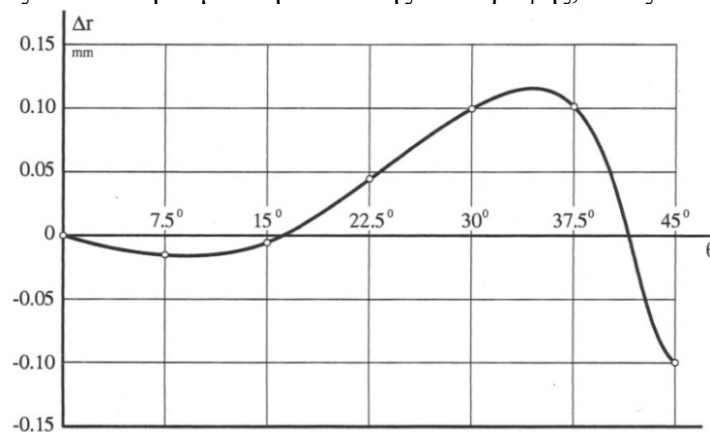
Στη συνέχεια, μετρούνται οι συντεταγμένες των σημείων που αποτυπώνονται και έτσι αφενός προσδιορίζονται οι συντεταγμένες x_0, y_0 , του πρωτεύοντος σημείου (το οποίο υλοποιείται από την εικόνα του κεντρικού ευθυγραμμιστή, αποτελεί το σημείο αυτοευθυγράμμισης και δίνει τη δυνατότητα της απευθείας παρατήρησης της αρχής του συστήματος μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων) και αφετέρου οι ακτινικές αποστάσεις r' των υπολοίπων σημείων.

Ανατρέχοντας στις ισοδύναμες μορφές της συνάρτησης της εικόνας, που επαναλαμβάνονται και εδώ:

$$\begin{aligned} r' &= c \cdot \tan \tau + \Delta r \\ r' &= c \cdot \tan(\tau + \Delta \tau) \quad (4.5-1) \\ r' &= (c + \Delta c) \cdot \tan \tau \end{aligned}$$

παρατηρείται πως καθώς οι ποσότητες $(\tau + \Delta \tau)$ από τις γνωστές γωνίες μεταξύ των ευθυγραμμιστών και r' είναι γνωστές, μπορεί να προσδιοριστεί και η ανηγμένη τιμή της εστιακής απόστασης, δηλαδή η σταθερά c της μηχανής (Πατιάς, 1994).

Η διαδικασία προσδιορισμού της c , βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, ελαχιστοποιώντας το άθροισμα $\sum \Delta r_i^2 = \min$. Στη συνέχεια με γνωστή τη c προσδιορίζονται οι τιμές Δr_i , οι οποίες δίνουν τη καμπύλη ακτινικής διαστρόφης, όπως στο Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-8: Καμπύλη ακτινικής διαστρόφης

Πηγή: Πατιάς, 1994

Αναλυτικά η πλήρης διαδικασία βαθμονόμησης της μηχανής με αυτή τη μέθοδο, περιγράφεται στην εργασία των Washer & Case (1950) για το U.S Department of Commerce-National Bureau of Standards.

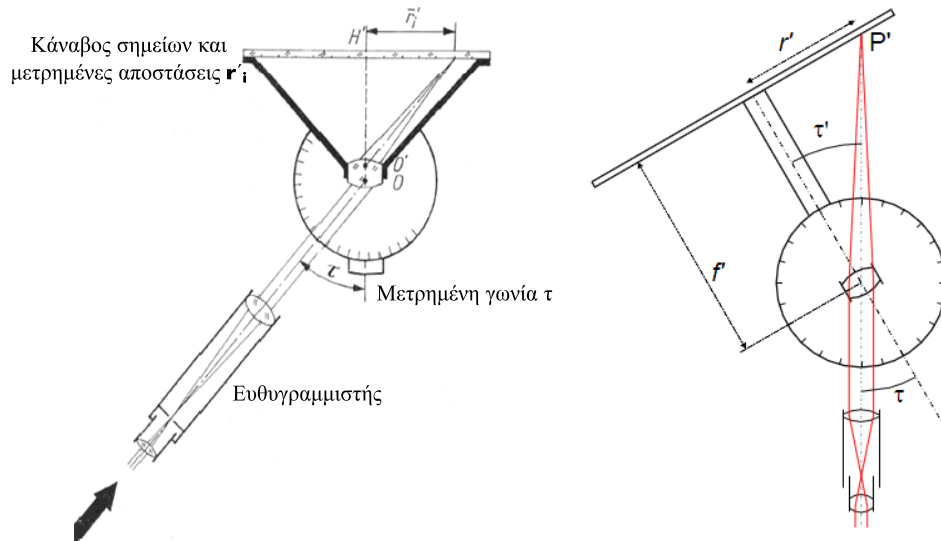
4.5.2 Βαθμονόμηση με τη χρήση γωνιομέτρων

Το γωνιόμετρο, όπως φανερώνει και ο όρος, είναι ένα όργανο μέτρησης γωνιών. Συγκεκριμένα μετρούνται οι γωνίες πρόσπτωσης τ_i των φωτεινών ακτίνων, οι οποίες αντιστοιχούν στους κόμβους ενός κανάβου σημείων, που είναι τοποθετημένος στο εστιακό επίπεδο της μηχανής. Καθώς οι αποστάσεις ανάμεσα στις κορυφές του κανάβου είναι γνωστές, οι ακτινικές αποστάσεις r_i' είναι επίσης γνωστές.

Επομένως από τις σχέσεις (3.5-3) προσδιορίζεται η βαθμονομημένη τιμή της f (δηλαδή η σταθερά της μηχανής c) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ελαχιστοποιώντας το άθροισμα $\sum \Delta \tau_i^2 = \min$. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η καμπύλη ακτινικής παραμόρφωσης, ενώ ένας ευθυγραμμιστής χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πρωτεύοντος σημείου (Πατιάς, 1994).

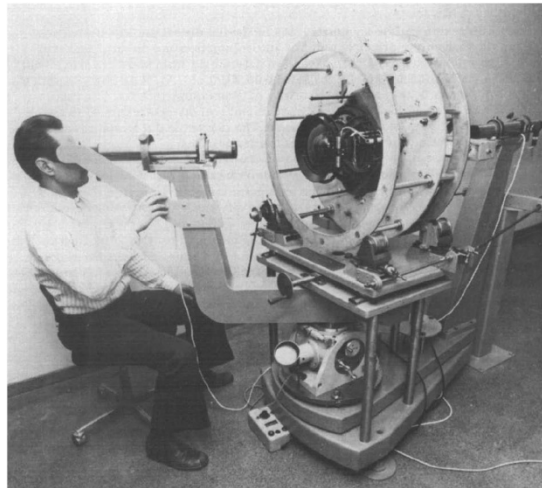
Η βαθμονόμηση με τη χρήση γωνιομέτρου είναι η **μόνη** απόλυτα οπτική μέθοδος βαθμονόμησης (ASPRS, 2000), καθώς δεν συμμετέχει καθόλου η φωτογραφική διαδικασία, κάτι που γίνεται στη φωτογραφική έκθεση της εικόνας των ευθυγραμμιστών, που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 4.5.1 και έτσι αντιμετωπίζεται από κάποιους συγγραφείς (Γεωργόπουλος, 2000; Kraus, 2003), ενώ κάποιοι άλλοι συμπεριλαμβάνουν στην οπτική μέθοδο βαθμονόμησης και τη βαθμονόμηση με το σύστημα *multi-collimator*. Η οπτική μέθοδος βαθμονόμησης μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά μεγέθη διαστρόφης, από εκείνα

της φωτογραφικής διαδικασίας, γι' αυτό σημαντικό ρόλο στην τελευταία παίζει η κατάλληλη εκλογή πηγών φωτός και φίλτρων, έτσι ώστε η φασματική ευαισθησία του ματιού να ταιριάζει με εκείνη των φιλμ (Spriggs, 1966).



Σχήμα 4-9: Γωνιόμετρο

Πηγή: Cramer, 2004 (αριστερά) - Luhmann, 2010 (δεξιά)

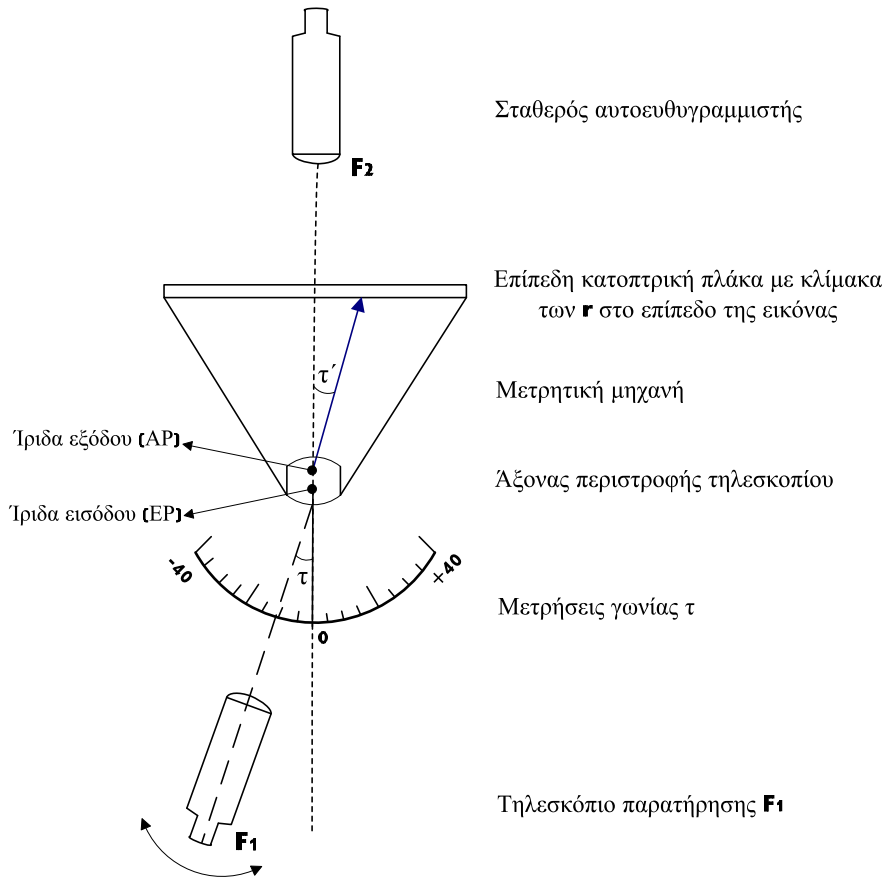


Εικόνα 4-4: Γωνιόμετρο του πανεπιστημίου Helsinki

Πηγή: Hakkarainen, 1978

Η διαδικασία αυτή με τη χρήση του γωνιομέτρου, αναπαρίσταται στο Σχήμα 4-10 και περιγράφεται αναλυτικά ως εξής (Kraus, 2003):

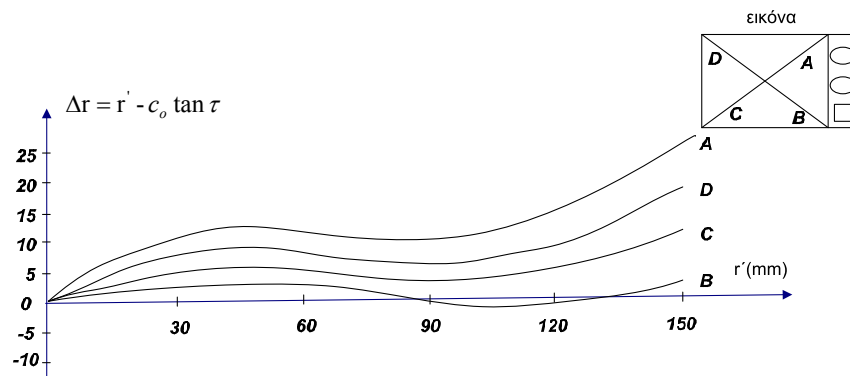
Αρχικά και χωρίς μηχανή, φέρεται το τηλεσκόπιο παρατήρησης F_1 στη μηδενική θέση, η οποία ορίζεται μέσω της αυτοευθυγράμμισης με το τηλεσκόπιο F_2 . Στη συνέχεια τοποθετείται η μηχανή έτσι ώστε το κέντρο της ίριδας εισόδου EP , δηλαδή το εξωτερικό προβολικό κέντρο O (βλέπε παράγραφο 3.3.2), να κείται πάνω στον άξονα περιστροφής. Ακολούθως η μηχανή περιστρέφεται γύρω από το σημείο EP μέχρι να παρατηρηθεί και να σκοπευθεί το είδωλο του σταυρονήματος του F_2 από το F_2 (αυτοευθυγράμμιση).



Σχήμα 4-10: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του γωνιομέτρου

Πηγή: Kraus, 2003

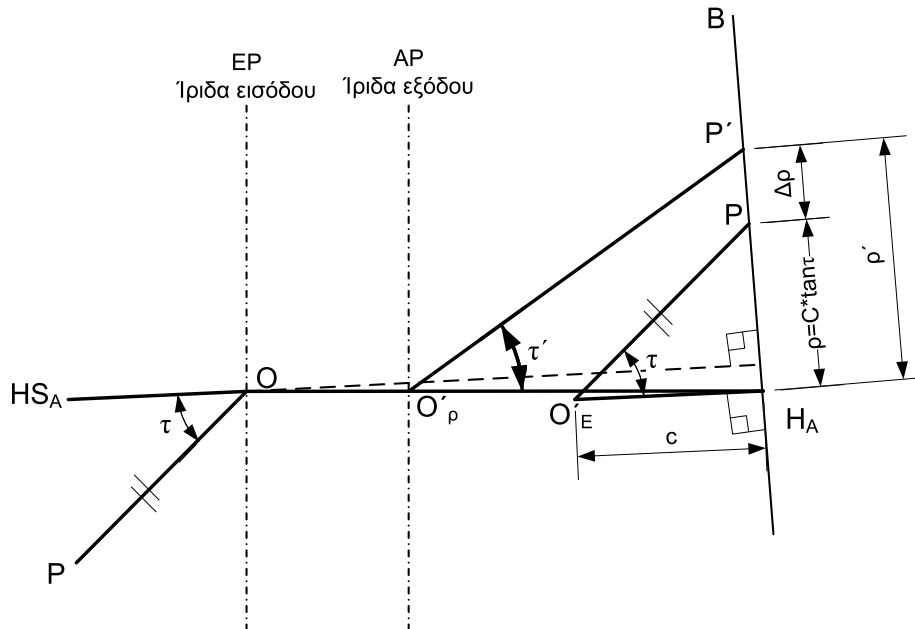
Για το σκοπό αυτό τοποθετείται στο εστιακό επίπεδο της μηχανής μια αυστηρά επίπεδη και κατοπτρική γυάλινη πλάκα ελέγχου, που από την πλευρά του αντικειμένου φέρνει διαιρέσεις ακριβείας. Από το τηλεσκόπιο F_1 παρατηρείται τώρα το κύριο σημείο αυτοευθυγράμμισης H_A (Principal Point of Autocollimation-PPA), που από εδώ και στο εξής αποτελεί την αρχή μέτρησης των αποστάσεων. Με την παρατήρηση διαφόρων μεγεθών r' πάνω στις τομές του κανάβου της πλάκας και επί των διαγωνίων της, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί κάθε φορά η αντίστοιχη γωνία τ , με την ανάγνωση από το δείκτη του οργάνου. Με τη βοήθεια της εκάστοτε καλύτερα γνωστής τιμής c_o για τη σταθερά της μηχανής, υπολογίζεται η τιμή $c_o \tan \tau$ που αντιστοιχεί στην γωνία τ και αντιπροσωπεύει την απόσταση από το PPA στο κάθε μετρούμενο σημείο, οπότε προσδιορίζεται η ακτινική οπτική διαστροφή $\Delta r = r' - c_o \tan \tau$ για τις τέσσερις ημιδιαγωνίους και απεικονίζονται γραφικά σε σχέση με τις αποστάσεις (Σχήμα 4-11).



Σχήμα 4-11: Ακτινική διαστροφή των ημιδιαγωνίων A έως D με αρχή το H_A

Πηγή: Kraus, 2003

Το αποτέλεσμα όμως είναι μη συμμετρικό, οι καμπύλες δηλαδή για την κάθε διαγώνιο δεν συμπίπτουν, λόγω των σφαλμάτων των φακών, μη εκκεντρότητας των στοιχείων τους, μη καθετότητας του εστιακού επιπέδου κτλ. Έτσι επιλέγεται κάποιος άλλος άξονας αναφοράς, που θα απέχει ελάχιστα από τον κύριο άξονα αυτοευθυγράμμισης HS_A , εξαλείφοντας την ασυμμετρία κατά το μεγαλύτερο μέρος της και προκύπτει μια «μέση» καμπύλη διαστροφής, ανεξαρτήτως διεύθυνσης διαγωνίου (Σχήμα 4-13). Αυτός είναι ο άξονας βέλτιστης συμμετρίας HS_S , που διέρχεται και αυτός από το κέντρο της ίριδας εισόδου EP και η προέκτασή του συναντά το εστιακό επίπεδο στο κύριο σημείο συμμετρίας H_S (*Principal Point of Symmetry - PPS*).

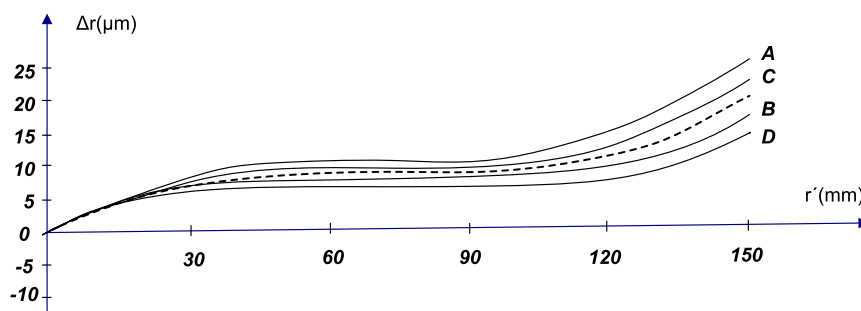


Σχήμα 4-12: Ορισμός μαθηματικού κέντρου προβολής

Πηγή: Kraus, 2003

Η αλλαγή αυτή του άξονα αναφοράς σημαίνει ότι:

- Οι συντεταγμένες τώρα του H_S , είναι x_o, y_o .
- Το νέο μαθηματικό προβολικό κέντρο είναι σε απόσταση c από το H_S .
- Η διαστροφή υπολογίζεται εκ νέου και αναφέρεται στο H_S (*PPS*).

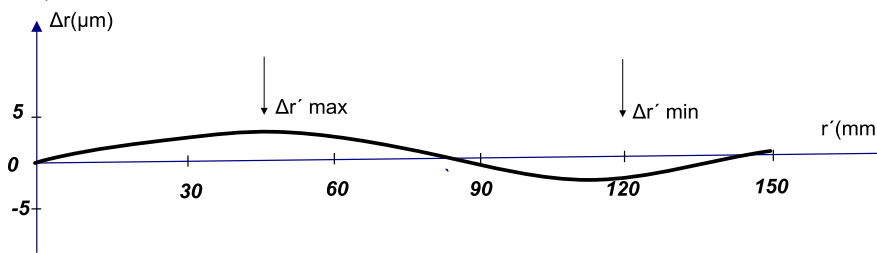


Σχήμα 4-13: Ακτινική διαστροφή των ημιδιαγωνίων του Σχήματος 4-11 με αναφορά το H_S και η ακτινική διαστροφή που προκύπτει από αυτές

Πηγή: Kraus, 2003

Η μέση καμπύλη όμως εξακολουθεί να μην είναι συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα. Το επόμενο βήμα είναι μια στροφή της, έτσι ώστε να είναι: $|\Delta r_{\max}| = |\Delta r_{\min}|$. Μια κατάλληλη αλλαγή-διόρθωση της εστιακής απόστασης, θα περιστρέψει την καμπύλη. Η διόρθωση δηλαδή Δc της σταθεράς της μηχανής, επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η συνισταμένη

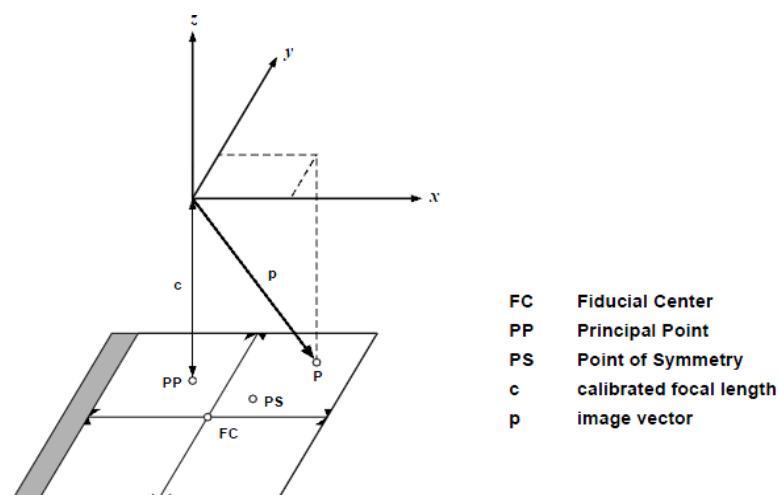
καμπύλη να απέχει το λιγότερο δυνατό από τον άξονα r' (Σχήμα 4-14). Η εστιακή απόσταση με αυτή την ιδιότητα καλείται βαθμονομημένη εστιακή απόσταση ή σταθερά της μηχανής c (Schenk, 2005).



Σχήμα 4-14: Μέση ακτινική οπτική διαστροφή με $|\Delta r_{\max}| = |\Delta r_{\min}|$

Πηγή: Kraus, 2003

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων η γυάλινη πλάκα αντικαθίσταται από μια φωτοευαίσθητη επίπεδη επιφάνεια. Το τηλεσκόπιο του γωνιομέτρου προσανατολίζεται στη μηδενική διεύθυνση και το σταυρόνημά του προβάλλεται μέσω του συστήματος των φακών της μηχανής πάνω στην επιφάνεια, ορίζοντας το πρωτεύον σημείο αυτοευθυγράμμισης (*PPA*). Ταυτόχρονα γίνεται και η φωτογραφική έκθεση των εικονοσημάτων και η μετέπειτα διαδικασία μετρήσεων προσδιορίζει τη θέση του *PPA* σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων των εικονοσημάτων (*FC*) (Schenk, 2005).



Σχήμα 4-15: Ορισμός σημείων στο φωτογραφικό επίπεδο

Πηγή: Schenk, 2005

4.6 Φωτογραφική Μέθοδος

Όπως μαρτυρά και η ονομασία της, στη κατηγορία αυτών των μεθόδων βαθμονόμησης, απαραίτητη είναι η φωτογραφική διαδικασία. Χρησιμοποιείται κύρια για τις μηχανές κοντινής εστίασης, στις οποίες δεν ορίζεται το σημείο αυτοευθυγράμμισης, το οποίο στην οπτική μέθοδο είναι πάντα το ίδιο. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον έλεγχο όλου του συστήματος: φακός – μηχανή – φιλμ, εν αντιθέσει με την οπτική μέθοδο, στην οποία εξετάζεται αποκλειστικά η συμπεριφορά του φακού. Οι μέθοδοι διαφοροποιούνται ανάλογα με το αν πρόκειται για επίγειες ή εναέριας φωτομηχανές.

4.6.1 Βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με σημεία γνωστών συντεταγμένων

Η βαθμονόμηση μιας φωτογραφικής μηχανής μπορεί να εκτελεστεί με τη **φωτογράφιση ενός πεδίου ελέγχου** με ομοιόμορφα κατανομημένα σημεία στο χώρο, των οποίων οι

συντεταγμένες X, Y, Z στο χώρο του αντικειμένου, έχουν προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια (Kraus, 1997). Οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων αυτών μπορούν να μετρηθούν και με τη βοήθεια των εξισώσεων της συγγραμμικότητας, μπορούν να προσδιοριστούν τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού της μηχανής, καθώς οι εξισώσεις αυτές (4.6-1) μπορούν να επεκταθούν, ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς και η διαστροφή του φακού ή και άλλες πρόσθετες παράμετροι π.χ. η μη επιπεδότητα και η συρρίκνωση του φιλμ (Kraus, 2004).

$$\begin{aligned} x &= x_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta x \\ y &= y_o - c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta y \end{aligned} \quad (4.6-1)$$

Μια αναλυτική προσέγγιση δηλαδή βασισμένη στην επίλυση της (4.6-1), μπορεί να δώσει τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και η αναλυτική μέθοδος της αυτοβαθμονόμησης καθώς και η ταυτόχρονη βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με σημεία γνωστών συντεταγμένων, **ενσωματώνουν** αυτή τη προσέγγιση (Gruen & Huang, 2001). Από μαθηματική πλευρά δηλαδή οι δυο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούν την ίδια συνθήκη (Kraus, 2004). Οι επιμέρους διαφορές τους θα συζητηθούν στη παράγραφο 4.6.5.

Η μέθοδος βαθμονόμησης με τη χρήση πεδίου είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη στις περιπτώσεις των αεροφωτομηχανών, οι οποίες λαμβάνουν φωτογραφίες σε συνθήκες πτήσης (διαφορετική πυκνότητα αέρα, θερμοκρασιακές διαφορές στα επιμέρους τμήματα της μηχανής, ατμοσφαιρική πίεση κ.τ.λ.), όπου πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν στους φωτογραμμετρικούς υπολογισμούς, καθώς μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρές αποκλίσεις από τα αναμενόμενα θεωρητικά εργαστηριακά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, οι πυκνώσεις και αραιώσεις του αέρα, που δημιουργούνται από την πτήση ενός αεροσκάφους, προκαλούν αλλαγές στους συντελεστές διάθλασης και θεωρώντας την πτήση ενός υπερηχητικού αεροσκάφους, τα αποτελέσματα των αλλαγών αυτών μεταφράζονται σε αποκλίσεις κατά 2 mm στην εστιακή απόσταση της μηχανής και κατά 0.5 mm στη διαστροφή του φακού (Zhizhuo, 1990).

Για τις ανάγκες της βαθμονόμησης των εναέριων μηχανών ωστόσο, η ίδρυση και η συντήρηση ενός πεδίου είναι μια χρονοβόρα και κοστοβόρα διαδικασία. Παραδείγματα τέτοιων πεδίων, παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 5**.

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες παραλλαγές αυτής της γενικής μεθοδολογίας και παράλληλα έχουν προκύψει και άλλες ονομασίες από τους ερευνητές. Έτσι συναντάται στη βιβλιογραφία και η «**Μέθοδος των Μικτών Υψομέτρων (Method of mixed ranges-MMR)**» (Merchant, 1974), που είναι γνωστή και ως «**Δυναμική Μέθοδος Βαθμονόμησης (Dynamic Method of Calibration)**» (Rampal, 1999), καθώς συγκρίνεται με την «στατική» εργαστηριακή μέθοδο. Σύμφωνα με αυτή, φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις φωτοσταθερών σημείων ενός επίπεδου πεδίου ελέγχου, συνδυάζονται με παρατηρήσεις φωτοσταθερών σε έδαφος με έντονο ανάγλυφο σε μια ενιαία συνόρθωση με αγνώστους τη σταθερά της μηχανής, το πρωτεύον σημείο και την ακτινική παραμόρφωση των φακών, υλοποιώντας ουσιαστικά ένα είδος αυτοβαθμονόμησης (Πατιάς, 1994).

Μια ακόμη παραλλαγή της μεθοδολογίας αυτής που συναντάται στη βιβλιογραφία, (**Field Method**-Rampal, 1999) αν και απλή στη σύλληψη και εφαρμογή της, δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα, καθώς θεωρεί μηδενικές τις διαστροφές του φακού και προσδιορίζει μόνο τα στοιχεία x_o, y_o, c . Περιγράφεται δε ως εξής:

Η μηχανή κεντρώνεται (με τη βοήθεια μιας βάσης ή μιας κατασκευής κτλ) πάνω από ένα πεδίο ελέγχου, σε θέση γνωστών συντεταγμένων X_o, Y_o, Z_o . Λαμβάνονται φωτογραφίες του πεδίου, στο οποίο υπάρχουν 4 με 5 σημεία (για να εξασφαλιστεί ότι θα φαίνονται τουλάχιστον τρία), των οποίων οι συντεταγμένες είναι γνωστές στο ίδιο σύστημα με αυτό της θέσης της μηχανής.

Αν είναι $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων 1,2,3 των οποίων οι συντεταγμένες στο χώρο του αντικειμένου είναι $X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2$ και X_3, Y_3, Z_3 αντίστοιχα, τότε η απόσταση στο έδαφος μεταξύ των σημείων 1 και 2 δίνεται από τη σχέση:

$$D_1 = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$

Τότε η αντίστοιχη απόσταση στην εικόνα θα είναι (από τις εικονοσυντεταγμένες):

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

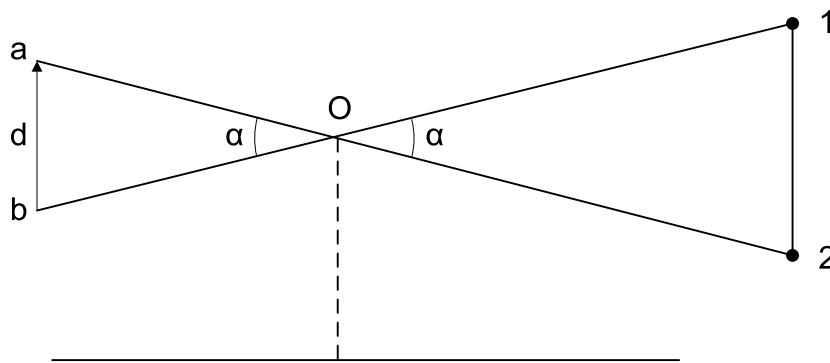
Όμοια η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ της θέσης της μηχανής O και του σημείου 1, δίνεται από τη σχέση:

$$O1 = \sqrt{(X_o - X_1)^2 + (Y_o - Y_1)^2 + (Z_o - Z_1)^2}$$

Ενώ η αντίστοιχη απόσταση στην εικόνα είναι:

$$Oa = \sqrt{(x_o - x_1)^2 + (y_o - y_1)^2 + c^2}$$

Ομοίως υπολογίζονται και οι αποστάσεις $O2$ και Ob (Σχήμα 4-16).



Σχήμα 4-16: Γεωμετρία υπολογισμών (Field method)

Πηγή: Rampal, 1999

Τότε η γωνία α με την οποία φαίνεται η απόσταση D_1 , δίνεται από τη σχέση:

$$\cos \alpha = \frac{(O1)^2 + (O2)^2 - D_1^2}{2(O1)(O2)}$$

Υποθέτοντας συγγραμμικότητα και έλλειψη διαστρωφής, θα ισχύει επίσης:

$$\cos \alpha = \frac{(O_a)^2 + (O_b)^2 - d_1^2}{2(O_a)(O_b)}$$

Από όπου προκύπτει η εξίσωση, που εμπλέκει τους τρεις αγνώστους x_o, y_o, c :

$$\frac{(O1)^2 + (O2)^2 - D_1^2}{2(O1)(O2)} = \frac{(O_a)^2 + (O_b)^2 - d_1^2}{2(O_a)(O_b)} \quad (4.6-2)$$

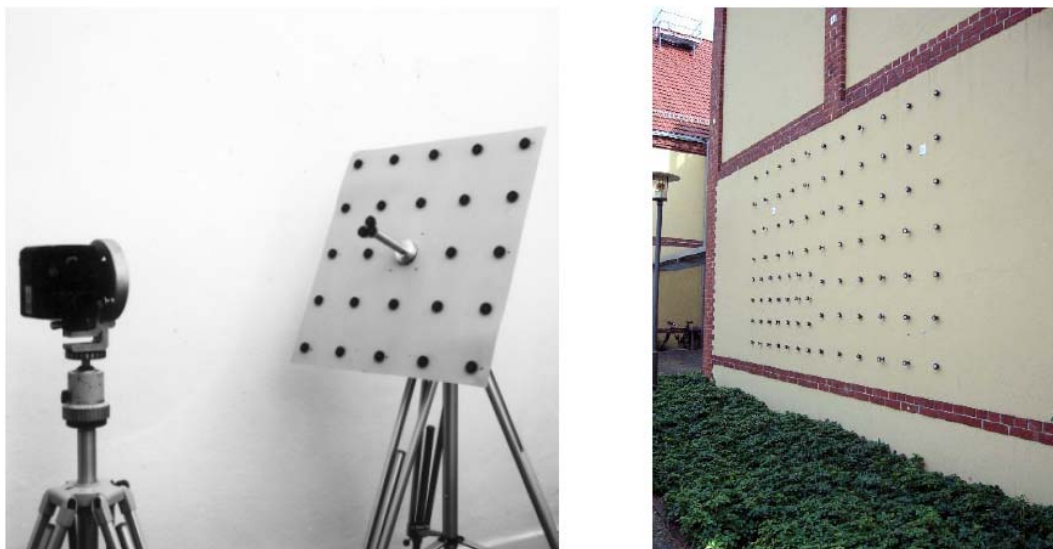
Απαιτούνται λοιπόν άλλες δυο εξισώσεις για την επίλυση και επιπλέον γραμμικοποίηση των εξισώσεων, καθώς και αρχικές τιμές για τους αγνώστους, προκειμένου να αρχίσει μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης. Οι εξισώσεις αυτές, αντίστοιχες της (4.6-2), θα σχηματιστούν χρησιμοποιώντας αντίστοιχα τα σημεία 2 και 3 (Rampal, 1999).

Πολύ συνηθισμένα, από την άλλη, για ερευνητικούς αλλά και πρακτικούς σκοπούς, είναι η χρήση **εργαστηριακών πεδίων ελέγχου** στην επίγεια φωτογραμμετρία, για τη βαθμονόμηση των αντίστοιχων μηχανών όλων των κατηγοριών. Τέτοια πεδία χρησιμοποιούνται και στο ΕΜΠ και βρίσκονται το μεν ένα στο σύμπλεγμα των κτηρίων Λαμπαδαρίου και νέου κτηρίου Α και το δεύτερο εντός της αίθουσας των σταθερών στο υπόγειο του κτηρίου Λαμπαδαρίου (Εικόνα 4-5).

Οι στόχοι δύναται να τοποθετηθούν και εξωτερικά, π.χ. σε ένα κτίριο, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη κατανομή τους, η οποία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευρεία και στις τρεις διαστάσεις. Αυτό αποτελεί και ένα από τα προβλήματα της χρήσης των πεδίων, ότι δηλαδή εάν το πεδίο έχει μικρό βάθος ή η γωνία λήψης είναι πολύ μικρή, τα στοιχεία εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, έχουν μεγάλη συσχέτιση και δεν μπορεί εύκολα να προκύψει μοναδικότητα στη λύση (Kraus, 1997). Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε ένα μη ορθά εκλεγμένο πεδίο για αερομηχανές, όπου οι υψομετρικές διαφορές είναι πολύ μικρές σε σχέση με το ύψος πτήσης.



Εικόνα 4-5: Εργαστηριακό πεδίο ελέγχου βαθμονόμησης μηχανών ΕΜΠ



Εικόνα 4-6: Μεταφερόμενα και μόνιμα πεδία επίγειων μηχανών

Πηγή: Luhmann, 2010

Η ενασχόληση με το αντικείμενο της βαθμονόμησης, λόγω εφαρμογής της σε πολλά αντικείμενα ενδιαφέροντος (όραση υπολογιστών, αυτόματη πλοήγηση κλπ.), έχει οδηγήσει στην κατασκευή πολλών ειδών πεδίων ελέγχου κυρίως για επίγειες μηχανές.

4.6.2 Βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με χαρακτηριστικά από το χώρο του αντικειμένου

Εκτός από τη γνώση των συντεταγμένων ενός δικτύου ομοιόμορφα κατανεμημένων σημείων

στο χώρο του αντικειμένου και άλλου είδους πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτόν τον χώρο, για τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών, βρίσκοντας πεδίο εφαρμογής στην επίγεια κυρίως φωτογραμμετρία (Kraus, 1997). Αναφέρονται στη συνέχεια δύο τέτοια παραδείγματα:

► **Βαθμονόμηση με χρήση γραμμικών στοιχείων (*plumb-line calibration*)**

Αυτό το ενδιαφέρον θέμα εξετάζεται κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

- Τα γραμμικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι ευκολότερο να εξαχθούν, από ότι τα μεμονωμένα σημεία, ειδικά σε ένα ψηφιακό περιβάλλον.
- Είναι δύσκολο να παραχθεί υψηλότερου επιπέδου, συμβολική αναπαράσταση του περιβάλλοντος από τα μεμονωμένα σημεία.
- Τα γραμμικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα μπορούν να εξαχθούν αυτόματα με υποψηφιακή ακρίβεια.
- Όσον αφορά τη βαθμονόμηση των φωτογραφικών μηχανών, είναι πολύ ευκολότερο να κατασκευαστεί ένα πεδίο ελέγχου που αποτελείται από ευθείες γραμμές, παρά ένα παραδοσιακό πεδίο με πολυάριθμα σημεία επίγειου ελέγχου.
- Ακόμα και οι μη-φωτογραμμέτρες μπορούν να πραγματοποιήσουν μια τέτοια ανάλογη διαδικασία βαθμονόμησης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, δεδομένου ότι θα επιτρέψει στους χρήστες να παράγουν ποιοτικά φωτογραμμετρικά προϊόντα από τις φωτογραφικές τους μηχανές.
- Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού που προέρχονται από την προτεινόμενη προσέγγιση, είναι στοχαστικά ίδιες με αυτές που υπολογίζονται από την παραδοσιακή, βασισμένη στα σημεία, βαθμονόμηση (Habib et al. 2002).

Ο *Brown* (1971) εισήγαγε τη μέθοδο *plumb-line* που χρησιμοποιεί ευθείες γραμμές, για να παράγει τις ακτινικές και εφαπτομενικές διαστροφές των φακών. Η αρχή πίσω από αυτήν την μέθοδο είναι ότι, οι ευθείες γραμμές στο χώρο του αντικειμένου πρέπει να προβάλλονται, μέσω ενός τέλει φακού, ως εικόνα ευθειών γραμμών. Οποιοσδήποτε διαφορές από την ευθύτητα αυτή μέσα στο χώρο της εικόνας, αποδίδονται σε ακτινικές και εφαπτομενικές διαστροφές. Αυτή η μέθοδος προσφέρει λοιπόν μια γρήγορη και πρακτική διαδικασία για τον υπολογισμό των παραμέτρων διαστροφής. Χρήστες αυτής της τεχνικής είχαν φωτογραφίσει ευθείες γραμμές, όπως η 10km ευθεία σιδηροδρομική γραμμή στην Αυστραλία, με σκοπό την επίτεια βαθμονόμηση μιας εναέριας φωτογραφικής μηχανής. Στην ανακοίνωση αυτή του 1971, ο *Brown* διατυπώνει επίσης τύπους που θα μπορούσαν ακριβώς να μοντελοποιήσουν την ακτινική διαστροφή σε μια σειρά διαφορετικών εστιακών αποστάσεων. Το 1986 δημοσιεύθηκαν μερικές μικρές τροποποιήσεις στους τύπους για την περίπτωση της εφαπτομενικής διαστροφής (Fryer & Brown, 1986).

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής *plumb line* είναι επίσης άξια λόγου επειδή:

- Οι τύποι είναι απλοί στο προγραμματισμό τους σε έναν υπολογιστή
- Είναι μια πρακτική μέθοδος που δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό εργαστηρίου ή πεδίου ελέγχου. Για παράδειγμα, εάν απαιτείται η βαθμονόμηση ενός φακού μιας φωτογραφικής μηχανής σε εστίαση απείρου, τα πολλά κτήρια που υπάρχουν στις περισσότερες σύγχρονες πόλεις με τις μεγάλες κάθετες γυάλινες πλάκες τους, μπορούν να παρέχουν ένα σύνολο από κάθετες γραμμές. Με τη μετακίνηση της φωτογραφικής μηχανής κατά 90°, μπορεί να ληφθεί μια άλλη εικόνα "οριζόντιων" τώρα γραμμών από το ίδιο αντικείμενο. Ο υπολογισμός της θέσης των γραμμών μπορεί να εκτελεσθεί σε οποιοδήποτε διάστημα, αλλά περίπου 30 έως 50 σημεία θεωρούνται ικανοποιητικά. Συνήθως ψηφιοποιούνται έξι έως δέκα οριζόντιες και κάθετες γραμμές με αυτόν τον τρόπο, αν και η επιτυχία έχει αναφερθεί ότι επιτυγχάνεται με μόνο δύο γραμμές σε κάθε προσανατολισμό της φωτογραφικής μηχανής, υπό τον όρο ότι αυτές οι γραμμές είναι πλησίον της άκρης της περιοχής της εικόνας, όπου η ακτινική και εφαπτομενική διαστροφή γίνονται μέγιστες.

Ένα μειονέκτημα της τεχνικής *plumb line* είναι ότι οι αποχές του πρωτεύοντος σημείου από το κέντρο των εικονοσημάτων δεν μπορούν εύκολα να καθοριστούν, ενώ η απουσία αυτών των πληροφοριών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη στην εκτίμηση των εφαπτομενικών συντελεστών διαστροφής. Μια εξαίρεση είναι στην ασυνήθιστη περίπτωση του υπερευρυγώνιου φακού (*fish-eye*), όπου οι διαστροφές είναι πολύ μεγάλες. Για το προσδιορισμό των αποχών αυτών, οι οποίες, όπως έχει αποδειχθεί από διάφορους ερευνητές είναι ιδιαίτερα συσχετισμένες με τις παραμέτρους της εφαπτομενικής διαστροφής (π.χ. Fryer & Fraser, 1986), η εργαστηριακή τεχνική ή η χρήση της αυτοβαθμονόμησης με τη μέθοδο της δέσμης είναι απαραίτητη. Ο Heuvel (1999b) πρότεινε μια άλλη προσέγγιση για τη χρησιμοποίηση των ευθειών γραμμών, ώστε να αποκαταστήσει τον εσωτερικό προσανατολισμό (Clarke & Fryer, 1998). Παρόμοια με τη μέθοδο *plumb line*, υπολογίζεται πρώτα η ακτινική διαστροφή και κατόπιν, οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου και η εστιακή απόσταση.

Πριν όμως από την ενσωμάτωση των ευθειών γραμμών στην όλη διαδικασία, θα πρέπει να παρθεί μια απόφαση σχετικά με το πώς αυτές θα αναπαρίστανται στο χώρο της εικόνας και του αντικειμένου. Μέσα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, (Clarke & Fryer, 1998) μια ευθεία γραμμή στο χώρο του αντικειμένου ορίζεται ως μια άπειρη γραμμή με τέσσερις βαθμούς ελευθερίας. Ο Habib (1999) πρότεινε μια εναλλακτική προσέγγιση για την αναπαράσταση των ευθειών γραμμών χρησιμοποιώντας δύο σημεία. Η μοναδικότητα και η απλότητά της είναι οι κύριοι λόγοι για την επιλογή αυτής της αναπαράστασης. Η άπειρη γραμμή δεν θα αναπαριστούσε όλες τις τρισδιάστατες γραμμές στο χώρο του αντικειμένου και επιπλέον, μια τέτοια αναπαράσταση θα απαιτούσε περίπλοκους αλγόριθμους για το προοπτικό μετασχηματισμό μεταξύ του αντικειμένου και της εικόνας, οι οποίοι και θα το καθιστούσαν δύσκολο να ενσωματωθεί μέσα στα υπάρχοντα προγράμματα επίλυσης.

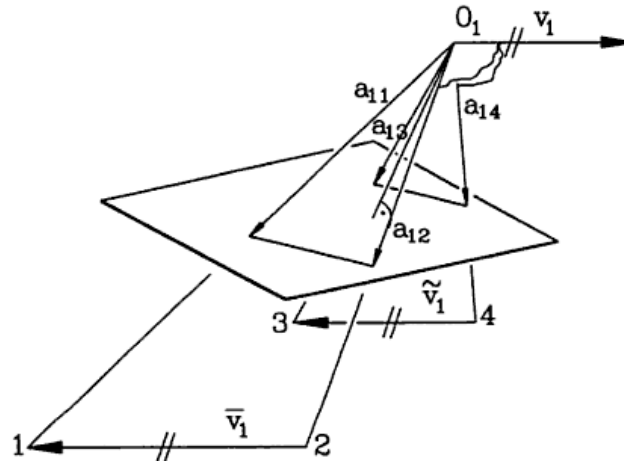
► Βαθμονόμηση με συνθήκες ορθογωνικότητας και συνεπιπεδότητας

Η λεπτομερής περιγραφή αυτής της μεθόδου έχει ως εξής (Kraus, 1997): Αρχικά προσδιορίζεται ένα ζεύγος παράλληλων διανυσμάτων \bar{v}_1, \tilde{v}_1 που μπορεί για παράδειγμα να είναι κάθετες ή οριζόντιες ακμές κτιρίων. Οι συντεταγμένες εικόνας αυτών των άκρων των διανυσμάτων \bar{v}_1 και \tilde{v}_1 μπορούν να μετρηθούν και μαζί με τα άγνωστα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού x_o, y_o, c μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν τα τέσσερα διανύσματα a_{1k} (4.6-3), που συνδέουν το προβολικό κέντρο και το κάθε ένα από αυτά τα σημεία.

$$a_{1k} = \begin{pmatrix} x_{1k} - x_o \\ y_{1k} - y_o \\ -c \end{pmatrix}, k = 1(1)4 \quad (4.6-3)$$

Τα διανύσματα $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \bar{v}_1$ όπως επίσης και τα διανύσματα $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \tilde{v}_1$ βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (Σχήμα 4-17). Αυτά τα επίπεδα τέμνονται κατά μια ευθεία, που διέρχεται από το προβολικό κέντρο O . Αυτή η ευθεία τομής είναι παράλληλη στα διανύσματα \bar{v}_1 και \tilde{v}_1 . Το διάνυσμα v_1 που βρίσκεται στην ευθεία τομής, υπολογίζεται από τα κανονικά διανύσματα των επιπέδων $(O,1,2)$ και $(O,3,4)$:

$$v_1 = (a_{11} \times a_{12}) \times (a_{14} \times a_{13}) \quad (4.6-4)$$



Σχήμα 4-17: Ζεύγος παράλληλων διανυσμάτων στο χώρο του αντικειμένου και το παράλληλο προς αυτά διάνυσμα μέσω του προβολικού κέντρου

Πηγή: Kraus, 1997

Στην ίδια εικόνα υπάρχει ένα δεύτερο ζεύγος διανυσμάτων \bar{v}_2, \tilde{v}_2 το οποίο είναι ορθογώνιο προς το πρώτο ζεύγος \bar{v}_1 και \tilde{v}_1 . Έτσι μπορεί να υπολογιστεί με ανάλογο τρόπο ένα διάνυσμα v_2 ορθογώνιο ως προς το πρώτο, συναρτήσει των τεσσάρων διανυσμάτων σύνδεσης a_{2k} :

$$a_{2k} = \begin{pmatrix} x_{2k} - x_o \\ y_{2k} - y_o \\ -c \end{pmatrix}, k = 1(1)4 \quad (4.6-5)$$

Δίνοντας το διάνυσμα:

$$v_2 = (a_{21} \times a_{22}) \times (a_{24} \times a_{23}) \quad (4.6-6)$$

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, τα δυο διανύσματα v_1 και v_2 είναι ορθογώνια, θα έχουν εσωτερικό γινόμενο μηδέν:

$$v_1 \cdot v_2 = 0 \quad (4.6-7)$$

Με αντικατάσταση κατά σειρά των (4.6-3),(4.6-4),(4.6-7) και (4.6-5),(4.6-6),(4.6-7) και μετά από σύνθετους μετασχηματισμούς (Novak, 1986), προκύπτει η ακόλουθη γραμμική σχέση μεταξύ των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου x_o, y_o και των συμπληρωματικών αγνώστων ($x_o^2 + y_o^2 + c^2$):

$$(l_{21}l_{12} + l_{11}l_{22})x_o + (l_{21}l_{13} + l_{11}l_{23})y_o + l_{11}l_{21}(x_o^2 + y_o^2 + c^2) + (l_{12}l_{22} + l_{13}l_{23}) = 0 \quad (4.6-8)$$

Οι ποσότητες l_{ik} είναι συναρτήσεις των εικονοσυντεταγμένων των οχτώ συνολικά σημείων, από τα οποία δυο μπορεί να είναι τα ίδια, ως εξής:

$$\begin{aligned} l_{i1} &= (x_{i2} - x_{i1})(y_{i3} - y_{i4}) - (x_{i3} - x_{i4})(y_{i2} - y_{i1}) \\ l_{i2} &= (x_{i2} - x_{i1})(x_{i4}y_{i3} - x_{i3}y_{i4}) - (x_{i3} - x_{i4})(x_{i1}y_{i2} - x_{i2}y_{i1}) \\ l_{i3} &= (y_{i4} - y_{i3})(x_{i1}y_{i2} - x_{i2}y_{i1}) - (y_{i1} - y_{i2})(x_{i4}y_{i3} - x_{i3}y_{i4}), \text{ όπου: } i = 1(1)2 \end{aligned} \quad (4.6-9)$$

Δυο ορθογώνια διανύσματα σχηματίζουν μια εξίσωση της μορφής (4.6-8). Αν για παράδειγμα είναι γνωστό το πρωτεύον σημείο, υπολογίζονται αρχικά οι συμπληρωματικοί άγνωστοι $x_o^2 + y_o^2 + c^2$ και στη συνέχεια η άγνωστη σταθερά της μηχανής c . Στην περίπτωση που είναι άγνωστα όλα τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, χρειάζονται τρεις εξισώσεις της μορφής (4.6-8). Τα έξι απαιτούμενα ζεύγη διανυσμάτων, από τα οποία δυο ζεύγη πρέπει να

είναι μεταξύ τους ορθογώνια, δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στην ίδια εικόνα. Με την προϋπόθεση ότι μεταξύ των λήψεων δεν μεταβάλλεται η εστιακή απόσταση και ότι οι εικονοσυντεταγμένες αναφέρονται πάντα στο ίδιο σύστημα, τα εκάστοτε ζεύγη ορθογωνίων διανυσμάτων, θα μπορούσαν να κατανεμηθούν σε περισσότερες εικόνες. Για την ακρίβεια της μεθόδου, πρέπει από τη μία, τα διανύσματα να είναι αρκετά μεγάλα και από την άλλη, τα ανεξάρτητα ζεύγη των διανυσμάτων να απεικονίζονται με έντονη σύγκλιση στις εικόνες. Ένα σημείο ακόμη στο οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή είναι καμία ευθεία του αντικειμένου να μην είναι παράλληλη στο επίπεδο της εικόνας.

4.6.3 Βαθμονόμηση με τη χρήση πεδίου ελέγχου με σημεία αγνώστων συντεταγμένων

Τα σημεία ενός τέτοιου πεδίου δεν χρειάζεται να είναι κατανεμημένα στο χώρο, ούτε επίσης χρειάζεται να έχουν γνωστές συντεταγμένες στο χώρο του αντικειμένου (Kraus, 1997). Η βαθμονόμηση εκτελείται φωτογραφίζοντας το πεδίο με αρκετές φωτογραφίες, όλες όμως χωρίς μεταβολή της εστίασης. Ο «χωροταξικός χαρακτήρας» του πεδίου, παίζει σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία μέσω των θέσεων τοποθέτησης της μηχανής και των διευθύνσεων φωτογράφισης. Κάθε επιλεγμένο σημείο από το χώρο του αντικειμένου, πρέπει να είναι ορατό σε τρεις τουλάχιστον φωτογραφίες. Ειδικοί αλγόριθμοι ή μια συνόρθωση με δέσμες μπορούν να εφαρμοστούν, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος της αυτοβαθμονόμησης, που παρουσιάζεται στη συνέχεια, χρησιμοποιεί τέτοια πεδία ελέγχου.

4.6.4 Ταυτόχρονη βαθμονόμηση

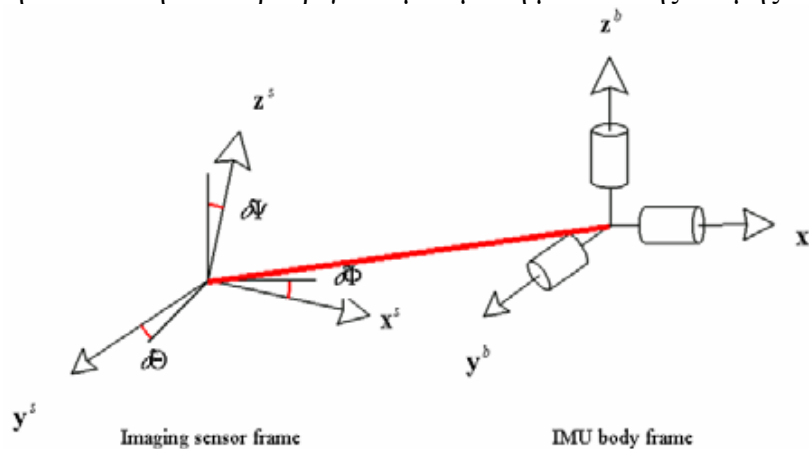
Η μέθοδος αυτή της βαθμονόμησης μηχανών, έχει κυρίως εφαρμογή όταν χρησιμοποιούνται ασταθείς μη μετρητικές κάμερες επίγειας φωτογραμμετρίας και σε μικρές σχετικά αποστάσεις αντικειμένου-μηχανής, όπου η φωτογράφιση του αντικειμένου και η βαθμονόμηση, πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο ταυτόχρονα, για να εξασφαλιστεί η ίδια γεωμετρία (βαθμονόμησης και φωτογράφισης), καθώς η μηχανή πρέπει να εστιάσει στο αντικείμενο και τότε οι παράμετροι της βαθμονόμησης είναι συνήθως άγνωστοι (Kraus, 1997). Πρόκειται τότε για βαθμονόμηση κατά τη διάρκεια της εργασίας: *on-the-job calibration* (Atkinson, 1996; Kraus, 1997; Clarke & Fryer, 1998) ή κατά τη διάρκεια ενός προγράμματος: *calibration during a project* (Kraus, 1997) ή για *ταυτόχρονη βαθμονόμηση* (Γεωργόπουλος, 2000). Ο όρος δηλαδή *on-the-job calibration*, αναφέρεται στην τεχνική του επί τόπου (*in situ*) προσδιορισμού των παραμέτρων της βαθμονόμησης του φακού και της μηχανής, την ίδια στιγμή που γίνεται και η φωτογράφιση, για τη μέτρηση του αντικειμένου ενδιαφέροντος (Atkinson, 1996; Torlegard). Εφαρμόζεται και για τη βαθμονόμηση των αερομηχανών, χρησιμοποιώντας πεδία ελέγχου με σημεία γνωστών συντεταγμένων (παράγραφος 4.6.1), χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της συνόρθωσης δέσμης με πρόσθετες παραμέτρους (Clarke & Fryer, 1998). Επειδή είναι στενά συνυφασμένη με τη βαθμονόμηση σε πραγματικές-επιχειρησιακές συνθήκες φωτογράφισης, όπως στην περίπτωση μιας αεροφωτογράφισης, συναντάται συχνά και ως *Test field calibration* καθώς διαχωρίζεται σαφώς από τις εργαστηριακές συνθήκες βαθμονόμησης, απαιτώντας πεδίο ελέγχου με βάθος και σύνολο σημείων με γνώση συντεταγμένων υψηλής ακρίβειας (Madani & Shkolnikov, 2008)

Στις περισσότερες περιπτώσεις ωστόσο, που εφαρμόζεται αυτό το είδος βαθμονόμησης, το αντικείμενο φωτογράφισης δεν είναι πολύ μεγάλο και πριν φωτογραφηθεί, τοποθετείται γύρω του ένα πλαίσιο με προσημασμένους στόχους γνωστών συντεταγμένων (Atkinson, 1996; Clarke & Fryer, 1998). Τότε, το πεδίο ελέγχου «έρχεται» στο αντικείμενο ή το αντικείμενο «έρχεται» στο πεδίο ελέγχου (Kraus, 1997). Μια απαραίτητη συνθήκη είναι οι φωτογραφίες να λαμβάνονται από διαφορετικές θέσεις και προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Εάν τέλος το πλαίσιο των προσημασμένων σημείων κρύβει σημαντική πληροφορία του αντικειμένου, οι φωτογραφίες για τη βαθμονόμηση μπορούν να διαχωριστούν από τις φωτογραφίες του αντικειμένου, αρκεί φυσικά να μην μεταβληθεί η εστίαση μεταξύ των λήψεων αυτών (Kraus, 1997).

Επίσης, η ταυτόχρονη βαθμονόμηση, όπως και η αυτοβαθμονόμηση, καλείται από άλλους και ως “*In-situ calibration*” ή επιτόπια βαθμονόμηση. Αναφέρεται έτσι σε τεχνικές που επιτρέπουν στον χρήστη να αντλήσει τις παραμέτρους της βαθμονόμησης σε πραγματικές συνθήκες, από τα δεδομένα που συλλέγονται και από άλλα συστήματα της μηχανής. Για παράδειγμα, ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων προσδιορίζεται από τον συνεχή υπολογισμό της θέσης, του υψομέτρου και των στροφών του αισθητήρα, με τη βοήθεια των συνδυασμένων μετρήσεων των *GPS* και *IMU*.

Προς τούτο έχουν γίνει σειρές δοκιμών και πιλοτικών έργων, που έχουν διαπιστώσει και παρουσιάσει τη δυνατότητα αυτής της νέας τεχνολογίας (Heipke et al, 2000). Σε ανεξάρτητα σημεία ελέγχου (*ICP*) στο έδαφος, παρατηρήθηκαν *RMS* κάτω από 0.1 έως 0.2 μ . Αυτά τα αποτελέσματα έχουν αποδείξει ότι ο προσδιορισμός του προσανατολισμού των εικόνων χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις των *GPS/IMU*, αποτελεί μια σοβαρή εναλλακτική λύση έναντι του συμβατικού αεροτριγωνισμού.

Δεδομένου όμως ότι η κεραία του *GPS*, το *IMU* και η μηχανή είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις στο αεροπλάνο, πρέπει να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια όλα τα διανύσματα θέσης, αλλά και οι στροφές μεταξύ των συσκευών αυτών. Έτσι λοιπόν πρέπει να είναι απόλυτα καθορισμένα τόσο οι γωνιακές αποκλίσεις μεταξύ του αισθητήρα και του σώματος του *IMU* (*boresight misalignment*) (Σχήμα 4-18), όσο και το διάνυσμα θέσης μεταξύ του αισθητήρα και της κεραίας του *GPS* (*GPS antenna offset*). Ενώ τώρα το διάνυσμα αυτό μπορεί να υπολογιστεί με συμβατικές τοπογραφικές μεθόδους η απόκλιση μεταξύ οπτικού άξονα και άξονα λήψης υπολογίζεται από τα σημεία επίγειου ελέγχου (*GCP*) που συλλέγονται σε έναν πεδίο ελέγχου. Συγκεκριμένα, η σχέση μεταξύ του *IMU* και του αισθητήρα απεικόνισης καθορίζεται από τη σύγκριση των παραγόμενων παραμέτρων του προσανατολισμού, που λαμβάνονται από το *GPS/IMU*, με τον προσανατολισμό που παίρνεται από την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού με τη μέθοδο της δέσμης.



Σχήμα 4-18: Σχέση μηχανής και *IMU*

Πηγή: Yastikli, 2004

4.6.5 Αυτοβαθμονόμηση

Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 4.6.1, το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου της αυτοβαθμονόμησης (*self-calibration*) με συνόρθωση δέσμης, ενσωματώνει την αναλυτική προσέγγιση της χρήσης της εξίσωσης της συγγραμμικότητας (4.6-1), όπου έχουν εισαχθεί πρόσθετες παράμετροι, προκειμένου να περιγράψουν τις αποκλίσεις από την ιδανική κεντρική προβολή, όπως η διαστροφή του φακού, η μη επιπεδότητα και συρρίκνωση του φιλμ ή του *CCD* αντίστοιχα κ.τ.λ. (Fraser, Shortis, & Ganci, 1995). Την ίδια προσέγγιση χρησιμοποιεί και η μέθοδος της επί τόπου βαθμονόμησης με τη χρήση πεδίου με σημεία γνωστών συντεταγμένων (Gruen & Huang, 2001).

Η ανάπτυξη και χρήση της μεθόδου συνόρθωσης με δέσμες, ήδη από το 1965 από τον *Brown*, σήμαινε ότι θεωρητικά αλλά και πρακτικά ήταν δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων βαθμονόμησης της μηχανής, **την ίδια στιγμή σε μια ενιαία λύση** με τον προσδιορισμό των

τρισδιάστατων συντεταγμένων των στόχων-σημείων του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική έγινε γνωστή ως αυτοβαθμονόμηση και είναι μια ιδιαίτερα «ισχυρή» μέθοδος επίλυσης, καθώς όλες οι παρατηρήσεις εικονοσυντεταγμένων κοινών σημείων επί εικόνων, από αρκετές θέσεις λήψης, συμβάλλουν στον προσδιορισμό των παραμέτρων του φακού (Clarke & Fryer, 1998). Κατά μερικούς άλλωστε (Gruen, 1997) αποτελεί την πιο καθολική και ευέλικτη προσέγγιση της βαθμονόμησης και οι λοιπές μέθοδοι αποτελούν μια υποπερίπτωσή της.

Μέσα από αυτή τη διαδικασία τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού μπορούν είτε να προσδιοριστούν ως άγνωστοι, είτε να προκύψουν βελτιωμένες τιμές για αυτά, αν υπάρχει εκ των προτέρων γνώση της τιμής τους και αφού επιλεγούν κατάλληλα βάρη στις σχετικές εξισώσεις (Kraus, 1997).

Κατά καιρούς αναπτύχθηκαν πολλά σετ επιπρόσθετων παραμέτρων (*additional parameters-AP*) με τον Fraser (1982) να προειδοποιεί ότι η απεριόριστη χρήση πρόσθετων παραμέτρων στην περίπτωση πολλαπλών λήψεων και κατά την επίλυση με τις ελάχιστες δεσμεύσεις, μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της τελικής ακρίβειας των συντεταγμένων των στόχων του αντικειμένου (Atkinson, 1996). Θεωρητικά πάντως, στο μαθηματικό μοντέλο της αυτοβαθμονόμησης μπορεί να εισαχθεί απεριόριστος αριθμός παραμέτρων (Madani & Shkolnikov, 2008).

Στη βαθμονόμηση όμως με τη χρήση πεδίου σημείων γνωστών συντεταγμένων X, Y, Z η όλη διαδικασία εκτελείται σε δυο φάσεις: Πρώτα προσδιορίζονται τα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και όλοι οι παράμετροι της βαθμονόμησης, στις ίδιες τιμές όπως και με την περίπτωση της αυτοβαθμονόμησης. Στη συνέχεια όμως, κάθε μεταγενέστερος τριγωνισμός σημείων στον χώρο του αντικειμένου, βασίζεται στην πληροφορία εξωτερικού προσανατολισμού που έχει ήδη εξαχθεί, αν και η φάση αυτή σπάνια πραγματοποιείται σε συνδυασμό με αυτήν την «*on-the-job*» διαδικασία βαθμονόμησης (Gruen & Huang, 2001).

Σχηματίζοντας την εξίσωση (4.6-1) όμως με τις πρόσθετες παραμέτρους, η αυτοβαθμονόμηση συνεπάγεται την ταυτόχρονη επίλυση όλων των παραμέτρων: εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, λοιπών συντελεστών βαθμονόμησης και συντεταγμένων σημείων-στόχων στον χώρο του αντικειμένου. Αυτός ο γενικευμένος σχετικός προσανατολισμός όλων των δεσμών των ακτίνων, μπορεί να εκτελεστεί χωρίς καμιά εκ των προτέρων γνώση τρισδιάστατων συντεταγμένων ή πληροφορίας κλίμακας από τον χώρο του αντικειμένου (Gruen & Huang, 2001). Το γεγονός αυτό, ότι δηλαδή η μέθοδος της αυτοβαθμονόμησης δεν απαιτεί κανένα έλεγχο από τον χώρο του αντικειμένου επισημαίνεται από πολλούς συγγραφείς (Atkinson, 1996; Brown D. C., 1989; Clarke & Fryer, 1998; Gruen & Huang, 2001) και είναι ένα στοιχείο διαχωρισμού των δυο μεθόδων: αυτοβαθμονόμησης και ταυτόχρονης βαθμονόμησης (Clarke & Fryer, 1998; Madani & Shkolnikov, 2008; Honkavaara, 2008).

Η επιτυχία της μεθόδου, που αντικατοπτρίζεται στη τελική ακρίβεια των συντεταγμένων των στόχων στο αντικείμενο καθώς και των παραμέτρων της βαθμονόμησης, εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- Την γεωμετρική θέση των σημείων λήψης, τις γωνίες τομής των ακτίνων από τα σημεία του αντικειμένου στις μηχανές, τον αριθμό και την κατανομή των στόχων στην επιφάνεια του αντικειμένου, που είναι ορατοί από τις διαφορετικές θέσεις της μηχανής (Atkinson, 1996).
- Την λήψη τουλάχιστον τριών φωτογραφιών του αντικειμένου (όταν χρησιμοποιείται μια μηχανή), την σταθερότητα τόσο στη γεωμετρία της μηχανής χωρίς μεταβολή της εστίασης όσο και του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, το ισχυρό δίκτυο σημείων με υψηλό βαθμό σύγκλισης, τη λήψη τουλάχιστον μιας εικόνας με διαφορετική γωνία από τις υπόλοιπες και σχετικά μεγάλο αριθμό καλά κατανεμημένων σημείων (Brown, 1989).

Η μέθοδος όμως της αυτοβαθμονόμησης, μπορεί να κάνει και χρήση αγνώστων σημείων από το χώρο του αντικειμένου που εμφανίζονται σε πολλαπλές λήψεις του αντικειμένου, αλλά και σημείων γνωστών συντεταγμένων από τον ίδιο χώρο (Kraus, 2004). Αν ενσωματωθούν τότε στην ενιαία λύση στόχοι ελέγχου με καθορισμένες συντεταγμένες, μπορεί να εξαχθεί ο απόλυτος προσανατολισμός των θέσεων της μηχανής και οι συντεταγμένες του αντικειμένου (Atkinson, 1996). Επειδή η αυτοβαθμονόμηση εμπλέκεται στη φωτογραμμετρική μέτρηση σημείων ή στον προσδιορισμό του προσανατολισμού, από αυτή την άποψη και μόνο μπορεί να θεωρηθεί ως μια ταυτόχρονη βαθμονόμηση (Kraus, 1997), καθώς είναι μια επέκταση της ιδέας της (Atkinson, 1996).

Το πρόβλημα της έλλειψης ενός συστήματος αναφοράς, που θα προκύψει κατά την εφαρμογή της μεθόδου, μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη συνόρθωση ελεύθερου δικτύου, όπως αναλυτικά περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία (Kraus, 1997). Ένας δεύτερος τρόπος για να οριστεί σύστημα αναφοράς, είναι να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος αριθμός σημείων με γνωστές συντεταγμένες, για παράδειγμα δυο οριζοντιογραφικά και τρία υψομετρικά (Torlegard). Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ανεξάρτητα του συνδυασμού επιλογής των σημείων. Ένας τρίτος τρόπος τέλος είναι να εισαχθούν εικονικές παρατηρήσεις σε όλα τα σημεία, δίνοντας εξαιρετικά μεγάλο βάρος στα γνωστά σημεία και μικρό στα άγνωστα, υποχρεώνοντάς τα όμως όλα να συμμετάσχουν στην επίλυση (Torlegard).

Επίσης αν είναι απαραίτητο για κάποιες λήψεις ενός δικτύου να μεταβληθεί η εστίαση της μηχανής, η μέθοδος της αυτοβαθμονόμησης μπορεί να εφαρμοστεί θεωρώντας ότι αυτές οι λήψεις έχουν προέλθει από διαφορετικές μηχανές. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος του «**μεταβλητού μπλοκ (block variant)**». Επίσης είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι οι παράμετροι της ακτινικής και εφαπτομενικής διαστροφής δεν έχουν μεταβληθεί, ακόμη και αν μεταβλήθηκε η εστίαση. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται ο όρος του «**αμετάβλητου μπλοκ (block invariant)**», παρά το γεγονός ότι η πρωτεύουσα απόσταση θα απαιτούσε διαφορετικές παραμέτρους για κάθε τιμή της εστίασης (Atkinson, 1996).

Κλείνοντας αυτή τη παράγραφο αναφέρεται, προς ενημέρωση του αναγνώστη, το γεγονός της εύρεσης στη βιβλιογραφία αναφορών μεθόδου βαθμονόμησης ως «*on-the-job self-calibration*» (Kraus, 1997; Brown, 1989), με την έννοια της βαθμονόμησης κατά τη διάρκεια μιας πτήσης, ενσωματώνοντας στη διαδικασία τα συστηματικά σφάλματα όλου του φωτογραφικού συστήματος (Kraus, 1997) και με την έννοια της βαθμονόμησης μιας φωτογραμμετρικής σύνθεσης από έκθεση πολλαπλών καμερών (*multi-camera on-the-job self-calibration*) (Brown, 1989).

4.6.6 Άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός (DLT)

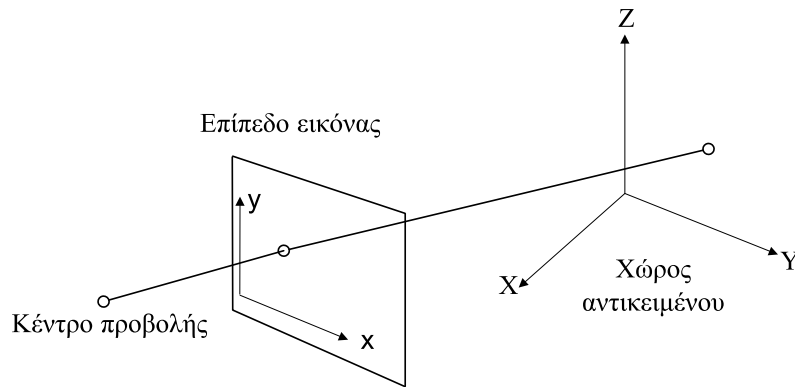
Ο άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός (**Direct Linear Transformation**) είναι ένας τρισδιάστατος μετασχηματισμός μόνο κατά το ένα σύστημα XYZ , στο χώρο του αντικειμένου. Το άλλο σύστημα xy στο χώρο της εικόνας, το οποίο μπορεί να ποικίλλει, όπως εξηγείται παρακάτω, είναι δισδιάστατο, πρόκειται δηλαδή για έναν μετασχηματισμό $2D-3D$ που περιγράφει την γραμμική απεικόνιση (προβολικότητα) ενός τρισδιάστατου σημειοσυνόλου στο επίπεδο (Καρράς, 1998).

Για την φωτογραμμετρία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού ακριβώς εκφράζει την προβολική σχέση εικόνας-τρειςδιάστατου χώρου μέσω 11 παραμέτρων b_{ij} ως εξής:

$$x = \frac{b_{11}X + b_{12}Y + b_{13}Z + b_{14}}{b_{31}X + b_{32}Y + b_{33}Z + 1} \quad y = \frac{b_{21}X + b_{22}Y + b_{23}Z + b_{24}}{b_{31}X + b_{32}Y + b_{33}Z + 1} \quad (4.6-10)$$

Οι σχέσεις αυτές δεν είναι αντιστρεπτές, δηλαδή ο άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός (όπως άλλωστε και οι εξισώσεις συγγραμμικότητας) είναι μονοσήμαντος: από τον χώρο στην εικόνα αλλά όχι και αντίστροφα. Ωστόσο σε αντιστοιχία με την αναγωγή, οι μετρημένες συντεταγμένες x, y των εικονοσημείων που εμπλέκονται στις εξισώσεις του DLT , δεν είναι απαραίτητο να αναφέρονται στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων: μπορούν κάλλιστα να είναι

συντεταγμένες συγκριτή, ψηφιοποιητή, *pixel* κλπ, χωρίς να απαιτείται να υποστούν προηγουμένως αφινικό μετασχηματισμό καθώς αυτός «ενσωματώνεται» στους 11 συντελεστές των σχέσεων (4.6-10).



Σχήμα 4-19: Μετασχηματισμός 2D-3D

Η προσέγγιση *DLT* προσφέρεται για αναλυτικές και ψηφιακές αποδόσεις από εικόνες ερασιτεχνικών μηχανών, των οποίων δηλαδή τόσο ο εσωτερικός προσανατολισμός είναι άγνωστος, όσο και ο ορισμός του συστήματος εικονοσυντεταγμένων πολύ αβέβαιος, εξαιτίας της απουσίας εικονοσημάτων ή σημείων *réseau*. Σε περίπτωση που θεωρηθεί ότι ο *DLT* περιγράφει αυστηρά μια κεντρική προβολή – δηλαδή οι συντεταγμένες *x,y* των εικονοσημάτων έχουν μετρηθεί σε σύστημα με ορθογωνικούς άξονες και ενιαία κλίμακα – οι εξισώσεις (4.6-10) είναι ισοδύναμες με εκείνες της συγγραμμικότητας. Οι 11 συντελεστές b_{ij} είναι επομένως συναρτήσεις των 9 στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού.

Εάν λοιπόν στην έκφραση των εξισώσεων συγγραμμικότητας (4.6-1), χωρίς να ληφθούν υπ’ όψη τα Δx και Δy , ομαδοποιηθούν οι όροι, προκύπτει τελικά (Καρράς, 1998):

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= \frac{(-cr_{11} + x_o r_{31})}{B} & b_{21} &= \frac{(-cr_{21} + y_o r_{31})}{B} & b_{31} &= \frac{r_{31}}{B} \\
 b_{12} &= \frac{(-cr_{12} + x_o r_{32})}{B} & b_{22} &= \frac{(-cr_{22} + y_o r_{32})}{B} & b_{32} &= \frac{r_{32}}{B} \\
 b_{13} &= \frac{(-cr_{13} + x_o r_{33})}{B} & b_{23} &= \frac{(-cr_{23} + y_o r_{33})}{B} & b_{33} &= \frac{r_{33}}{B} \\
 b_{14} &= -(b_{11} X_o + b_{12} Y_o + b_{13} Z_o) & b_{24} &= -(b_{21} X_o + b_{22} Y_o + b_{23} Z_o) \\
 & & B &= -(r_{31} X_o + r_{32} Y_o + r_{33} Z_o)
 \end{aligned} \tag{4.6-11}$$

Σε περίπτωση που θεωρηθεί κεντρική προβολή και εφόσον τα *xy* είναι εικονοσυντεταγμένες υπάρχει η δυνατότητα να βρεθούν οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού από τους προβολικούς συντελεστές b_{ij} .

Εάν υποθεθεί ότι όλες οι συντεταγμένες των σημείων στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου είναι γνωστές, οι εξισώσεις παρατήρησης για την επίλυση με την MET, ξεκινώντας από τις (4.6-10) έχουν τη γραμμικοποιημένη μορφή (Gruen, 1997; Luhmann, 2010):

$$\begin{aligned}
 b_{11} X + b_{12} Y + b_{13} Z + b_{14} - x X b_{31} - x Y b_{32} - x Z b_{33} &= x + v_x \\
 b_{21} X + b_{22} Y + b_{23} Z + b_{24} - y X b_{31} - y Y b_{32} - y Z b_{33} &= y + v_y
 \end{aligned} \tag{4.6-12}$$

$$L = (A^T A)^{-1} A^T X \tag{4.6-13}$$

$$A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_2 X_2 & -x_2 Y_2 & -x_2 Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -y_2 X_2 & -y_2 Y_2 & -y_2 Z_2 \\ \vdots & & & & & & & & & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_n X_n & -x_n Y_n & -x_n Z_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_n X_n & -y_n Y_n & -y_n Z_n \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} L = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ \vdots \\ b_{33} \end{bmatrix}$$

Οι σχετικές εξισώσεις εξαγονται από τις (4.6-11) και είναι με βάση τις λύσεις της (4.6-13):

$$\begin{aligned} x_o &= (b_{11}b_{31} + b_{12}b_{32} + b_{13}b_{33})B^2 \\ y_o &= (b_{21}b_{31} + b_{22}b_{32} + b_{23}b_{33})B^2 \\ c_x &= -x_o^2 + (b_{11}^2 + b_{12}^2 + b_{13}^2)B^2 \\ c_y &= -y_o^2 + (b_{21}^2 + b_{22}^2 + b_{23}^2)B^2 \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} x_o \\ y_o \\ c_x \\ c_y \end{aligned}} \right\} \Rightarrow c = \frac{c_x + c_y}{2} \quad (4.6-14)$$

Φαίνεται λοιπόν πως προκύπτουν δύο τιμές για την σταθερά της μηχανής, μία κατά x και μία κατά y . Εάν όντως ισχύει η κεντρική προβολή, οι τιμές αυτές πρακτικά συμπίπτουν και ως c λαμβάνεται ο μέσος όρος τους. Εάν, επιπλέον έχουν υιοθετηθεί και οι αυστηρές δεσμεύσεις της κεντρικής προβολής C_1 και C_2 :

$$\begin{aligned} C_1 &= (b_{11}b_{21} + b_{12}b_{22} + b_{13}b_{23})(b_{31}^2 + b_{32}^2 + b_{33}^2) - (b_{11}b_{31} + b_{12}b_{32} + b_{13}b_{33})(b_{21}b_{31} + b_{22}b_{32} + b_{23}b_{33}) = 0 \\ C_2 &= (b_{11}^2 + b_{12}^2 + b_{13}^2 - b_{21}^2 - b_{22}^2 - b_{23}^2)(b_{31}^2 + b_{32}^2 + b_{33}^2) - (b_{11}b_{31} + b_{12}b_{32} + b_{13}b_{33})(b_{21}b_{31} + b_{22}b_{32} + b_{23}b_{33}) = 0 \end{aligned}$$

τότε είναι ακριβώς $c_x = c_y = c$.

Η διαφορά των δύο βαθμών ελευθερίας – καθώς το γεωμετρικό πρόβλημα της κεντρικής προβολής έχει 9 παραμέτρους ενώ το μαθηματικό μοντέλο του άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού $9 + 2$ συντελεστές – αίρεται αν οι 11 συντελεστές b_{ij} , που επομένως στην περίπτωση της κεντρικής προβολής δεν είναι ανεξάρτητοι, πληρούν τις δύο παραπάνω δεσμεύσεις (Καρράς, 1998).

Τα άγνωστα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, όπως επίσης και η γραμμικοποίηση των σχέσεων, υπολογίζονται ανάλογα, με την κατάλληλη μορφοποίηση των εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{14} \\ b_{24} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6-15)$$

$$\omega = \tan^{-1} \left(-\frac{b_{32}}{b_{33}} \right) \quad \phi = \tan^{-1} \left(-\sin \omega \frac{b_{31}}{b_{32}} \right) \quad \kappa = \tan^{-1} \left(-\frac{c_x (y_o b_{31} - b_{21})}{c_y (x_o b_{31} - b_{11})} \right)$$

Οι εξισώσεις (4.6-10), μπορούν να συμπεριλάβουν και τα οπτικά σφάλματα και να γίνουν (Gruen & Huang 2001):

$$x + \Delta x = \frac{b_{11}X + b_{12}Y + b_{13}Z + b_{14}}{b_{31}X + b_{32}Y + b_{33}Z + 1} \quad y + \Delta y = \frac{b_{21}X + b_{22}Y + b_{23}Z + b_{24}}{b_{31}X + b_{32}Y + b_{33}Z + 1} \quad (4.6-16)$$

Όπου οι διορθώσεις είναι κατά x : $\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d$ και κατά y : $\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d$, ενώ r (*radial*) η αναφορά στην ακτινική διαστρόφη και d (*decentering*) η αναφορά στην εφαπτομενική διαστρόφη, όπως αναπτύχθηκαν με τους αντίστοιχους συντελεστές τους, στις παραγράφους 3.5.3 και 3.5.4.

Η προσέγγιση του *DLT*, είναι πολύ δημοφιλής στην αποκατάσταση των εικόνων που έχουν ληφθεί με μη μετρητικές μηχανές, καθώς δεν απαιτείται καμιά εκ των προτέρων γνώση των στοιχείων του εσωτερικού τους προσανατολισμού x_0, y_0, c . Η χρήση του στην περίπτωση των ψηφιακών μηχανών προσφέρει τα δυο πλεονεκτήματα:

- Της ταχύτητας, μη επαναληπτικής, αλλά άμεσης λύσης χωρίς την απαίτηση αρχικών προσεγγιστικών τιμών και
- Της ενσωμάτωσης στο μοντέλο της διόρθωσης του αφινικού μετασχηματισμού, καθιστώντας τον κατάλληλο για δέκτες τεχνολογίας *CCD*.

Διαφέρει ωστόσο από την αναλυτική προσέγγιση της χρήσης της εξίσωσης συγγραμμικότητας στη σταθερότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων, στη συμμεταβλητότητα των παραμέτρων, στη σύγκλιση της ελαχιστοτετραγωνικής προσέγγισης της λύσης και στο ότι απαιτεί περισσότερα σημεία γνωστών συντεταγμένων καλά κατανεμημένων στον τρισδιάστατο χώρο του αντικειμένου (Gruen & Huang, 2001).

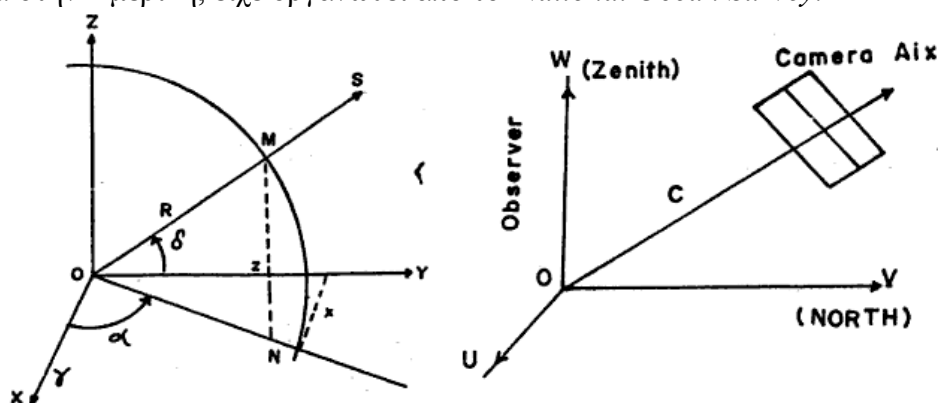
4.6.7 Βαθμονόμηση με την αστρική μέθοδο

Μια ακόμη μέθοδος που συναντάται στη βιβλιογραφία και είχε ευρεία εφαρμογή κατά το παρελθόν, αφορά στη βαθμονόμηση αναλογικών αερομηχανών και αναφέρεται ως «**αστρική μέθοδος** (*stellar method*)». Η βασική αρχή της μεθόδου, συνίσταται στην τοποθέτηση της μηχανής σε ειδική βάση με τον άξονα της προς το ζενίθ και την έκθεση ενός φασματοσκοπικού επιπέδου, που προσαρμόζεται στο εστιακό της επίπεδο, προς τα άστρα για ένα χρονικό διάστημα, με απώτερο σκοπό την καταγραφή επάνω σε αυτό του ίχνους τους (Rampal, 1999).

Τα άστρα αναγνωρίζονται στη συνέχεια και χρησιμοποιείται ο προσανατολισμός τους (*right ascension* (α) and *declination* (δ)), που λαμβάνεται από σχετικούς καταλόγους με ακρίβεια καλύτερη του 1'' (Zhizhuo, 1990).

Το ουράνιο αυτό σύστημα αναφοράς (Σχήμα 4-20) χρησιμοποιείται ως το σύστημα αναφοράς του αντικειμένου και με αυτές τις συντεταγμένες σχετίζονται οι μετρούμενες εικονοσυντεταγμένες των άστρων επί του φασματοσκοπικού επιπέδου, προκειμένου να υπολογιστούν οι επιθυμητές παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής.

Η βαθμονόμηση των αερομηχανών με αυτή τη μέθοδο, ήταν πολύ διαδεδομένη κατά το παρελθόν, στις δεκαετίες '70-'80. Διάφοροι οργανισμοί που αναλάμβαναν αυτή την εργασία, συντηρούσαν και τις ανάλογες εγκαταστάσεις. Ένα τέτοιο κέντρο, που υπήρχε για παράδειγμα στην Αμερική, είχε οργανωθεί από το *National Ocean Survey*.



Σχήμα 4-20: Σύστημα αναφοράς στην αστρική μέθοδο βαθμονόμησης

Πηγή: Rampal, 1999

Η όλη διαδικασία με αυτή τη μέθοδο, έχει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά (Fritz & Slama, 1977):

- Λήψη εικόνων των άστρων σε όλο το φασματικό φάσμα της μηχανής και όχι σε συγκεκριμένες διευθύνσεις (πχ στις ημι-διαγωνίους, όπως συνέβαινε κατά την εργαστηριακή μέθοδο βαθμονόμησης), μετά από έκθεση της πλάκας για δύομιση περίπου ώρες. Προϋπόθεση είναι η τοποθέτηση της μηχανής πάνω σε μια σταθερή βάση.

- Καταγραφή της θερμοκρασίας της μηχανής πριν και κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης, για τον περιορισμό των σφαλμάτων των οφειλομένων σε θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Μέτρηση πέντε ιχνών άστρων σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό της εικόνας. Αυτό σημαίνει για το τυπικό φορμάτ των αερομηχανών (23cm x 23cm) καταγραφή 2400 περίπου άστρων, παρέχοντας τόσο πλεονασμό παρατηρήσεων όσο και ιδεατή γεωμετρία, επιτρέποντας αυστηρό προσδιορισμό των συντελεστών της βαθμονόμησης και περιορισμό των σφαλμάτων λόγω μη επιπεδότητας και χρησιμοποιούμενων υλικών καθώς και λόγω ατμόσφαιρας.
- Χρησιμοποίηση κλείστρου χρονισμένου ακριβώς στο ένα *millisecond* και καταγραφή του χρονοδιαγράμματός του, για να χρησιμοποιηθεί η πληροφορία των εικόνων όλων των άστρων που εμφανίζονται ακόμη και εκτός καταλόγου.
- Λήψη πολλαπλών εκθέσεων του πεδίου των άστρων, από τέσσερις διαφορετικές κατά 90 μοίρες διευθύνσεις, για τον περιορισμό της συσχέτισης μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής γεωμετρίας της βαθμονόμησης και την απόκτηση πλεονάζουσας πληροφορίας, για πιο ακριβή αποτελέσματα.
- Όλα τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ορίζονται φυσικά και προσδιορίζονται μαθηματικά σε ένα τυποποιημένο σύστημα συντεταγμένων επί του εστιακού επιπέδου, για να καταστεί δυνατή η σωστή εφαρμογή των διορθωτικών παραμέτρων, καθώς επίσης και για να καταστεί δυνατή η ανίχνευση παραμορφώσεων οφειλομένων στο υλικό της μηχανής.
- Ορίζεται το πρωτεύον σημείο συμμετρίας, παρέχοντας την αρχή των μετρήσεων και επιπλέον εκτελείται μια στατιστική ανάλυση των παραμέτρων της βαθμονόμησης.

Η όλη διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στη προαναφερθείσα στο κείμενο βιβλιογραφία, με το σύνολο των εξισώσεων του χρησιμοποιούμενου, ανά συγγραφέα, μοντέλου.

4.6.8 Ανακατασκευή

Η μέθοδος αυτή καλύπτει τις διάφορες διαδικασίες, από τη μετατροπή μιας μη μετρητικής μηχανής σε μετρητική (ή ημι-μετρητική) έως τον υπολογισμό των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού και κατ' επέκταση των διορθώσεων στις μετρήσεις ταυτόχρονα με τους υπόλοιπους αναλυτικούς υπολογισμούς. Η πρώτη κατηγορία διαδικασιών περιλαμβάνει μετασκευές, τεχνικές επεμβάσεις στη μηχανή, όπως π.χ. η εισαγωγή σημείων πλαισίου, η χρήση γυάλινης πλάκας με κάναβο (*reseau*), ή ακόμα χρήση πρόσθετων συστημάτων επιπεδότητας του φιλμ.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τη χρήση καθαρά αναλυτικών μεθόδων όπου, με κατάλληλο προγραμματισμό, δεν είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των αγνώστων της βαθμονόμησης, αλλά η διόρθωση των συντεταγμένων γίνεται με τη βοήθεια ορισμένων παραμέτρων που πρέπει να υπολογιστούν. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την εφαρμογή του άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού-*DLT*, όπως αναπτύχθηκε στη παράγραφο 4.6.6 (Γεωργόπουλος, 2000).

4.7 Βαθμονόμηση συστήματος (*System Calibration*)

Στη σημερινή εποχή, με τη χρησιμοποίηση μαζί με την ίδια τη μηχανή λήψης τόσων πολλών συσκευών, έχει επικρατήσει η έννοια της βαθμονόμησης συστήματος. Αυτή αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας του άμεσου ή ολοκληρωμένου προσανατολισμού της μηχανής (*direct or integrated sensor orientation*). Ο όρος *sensor orientation* έχει αντικαταστήσει την έννοια του *image orientation* και περιλαμβάνει τον εσωτερικό, τον εξωτερικό προσανατολισμό και τις παραμέτρους βαθμονόμησης του συστήματος (Heipke et al, 2002).

Η ταυτόχρονη επεξεργασία των στοιχείων του *GPS/IMU* μαζί με τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τις εικόνες, για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού (*EO*)

σε ένα πρόγραμμα αεροτριγωνισμού, αναφέρεται ως **Ολοκληρωμένος Προσανατολισμός Αισθητήρων (ISO)** (Jacobsen & Schmitz 1996, Kruck et al. 1996).

Ο συνδυασμός και των δύο (*AT* και άμεση μέτρηση) φέρνει τη μέγιστη ακρίβεια, μεγάλη ανοχή στο λάθος και αξιοπιστία. Από την άλλη πλευρά, η χρήση των άμεσων μετρήσεων του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, χωρίς αεροτριγωνισμό, σημεία σύνδεσης και σημεία επίγειου ελέγχου, αποτελεί την έννοια της **Άμεσης Γεωαναφοράς (Direct Georeferencing, DG)**. Το ποια προσέγγιση τώρα είναι κατάλληλη για ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως π.χ. την απαιτούμενη ακρίβεια, την κλίμακα της εικόνας, την διαθεσιμότητα των πληροφοριών των σταθμών αναφοράς των *GPS* και την δυνατότητα πρόσβασης στην περιοχή. Στην περίπτωση του άμεσου προσανατολισμού, οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού μετρώνται άμεσα και οι συντεταγμένες των σημείων υπολογίζονται από τα κέντρα προβολής. Λόγω αυτού του γεγονότος, η εσωτερική γεωμετρία του δέκτη και η σχέση μεταξύ των αισθητήρων-συσκευών έχουν πολύ μεγάλη σημασία.

Έτσι λοιπόν, η βαθμονόμηση του συστήματος είναι το πρώτο βήμα του άμεσου ή ολοκληρωμένου προσανατολισμού. Περιλαμβάνει συνολικά τον προσδιορισμό της θέσης και των στροφών μεταξύ του *IMU* και της μηχανής (*boresight misalignment*), τις αποχές μεταξύ της κεραίας του *GPS* και της μηχανής, τα σφάλματα χρονικού συγχρονισμού του *GPS*, καθώς επίσης και τον εσωτερικό προσανατολισμό του ίδιου του αισθητήρα. **Η βαθμονόμηση του συστήματος καλύπτει τη βαθμονόμηση όλων των αισθητήρων και τη βαθμονόμηση μεταξύ των αισθητήρων** (Skaloud, 1999). Η βαθμονόμηση των αισθητήρων περιλαμβάνει το καλιμπράρισμα της φωτογραφικής μηχανής (εσωτερικός προσανατολισμός), το καλιμπράρισμα του *IMU* για τις παραμέτρους *shift* και *drift* (αποχές και εσωτερικές δυσλειτουργίες), και το καλιμπράρισμα του *GPS*. Η βαθμονόμηση τώρα μεταξύ των αισθητήρων, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό ενός στιγμιαίου διανύσματος μετατόπισης μεταξύ του αισθητήρα και της κεραίας του *GPS* (*GPS antenna offset*) και το προσδιορισμό των αποκλίσεων μεταξύ του αισθητήρα και του σώματος του *IMU* (*boresight misalignment*). Η βαθμονόμηση των *GPS* και *IMU* εκτελείται συνήθως μετά από την παραγωγή τους στο εργοστάσιο. Εντούτοις, οι παράμετροι της βαθμονόμησής τους μπορούν να ελεγχθούν με μια ολοκληρωμένη επεξεργασία των μετρήσεων με φίλτρο *Kalman* (Schwarz et al, 1994). Οι πληροφορίες στροφής (*roll*, *pitch*, και *yaw*) που υπολογίζει το *IMU* συσχετίζονται με τον γεωγραφικό Βορρά, ενώ αντίθετα τα φωτογραμμετρικά *phi*, *omega* και *kappa* αφορούν τον Βορρά τετραγωνισμού (*grid*). Συνεπώς η σύγκλιση του μεσημβρινού πρέπει να ληφθεί υπόψη στο μετασχηματισμό, από τον προσανατολισμό του *IMU* στο φωτογραμμετρικό προσανατολισμό.

Οι γωνίες τελικά αυτές του *boresight misalignment* μπορούν να υπολογιστούν με επαναληπτικές επιλύσεις ελαχίστων τετραγώνων της γραμμικής εξίσωσης των *GCP*. Η εξίσωση αυτή που συνδέει τις *2D* συντεταγμένες στο χώρο της εικόνας, με τις *3D* στο χώρο του αντικειμένου, έχει ως παραμέτρους εισαγωγής: τον εσωτερικό προσανατολισμό της μηχανής, τη θέση του αισθητήρα, το υψόμετρό του και τις γωνίες στροφής (εξωτερικός προσανατολισμός), τα *GCP* με τις συντεταγμένες τους στο χώρο του αντικειμένου και της εικόνας, και καθορίζεται ως εξής :

$$r^m = r_s^m + \lambda \cdot R_b^m \cdot R_s^b \cdot r^s \quad (4.7-1)$$

r^m = διάνυσμα του σημείου *P* εκφρασμένο σε γεωδαιτικές συντεταγμένες (*m-frame*)

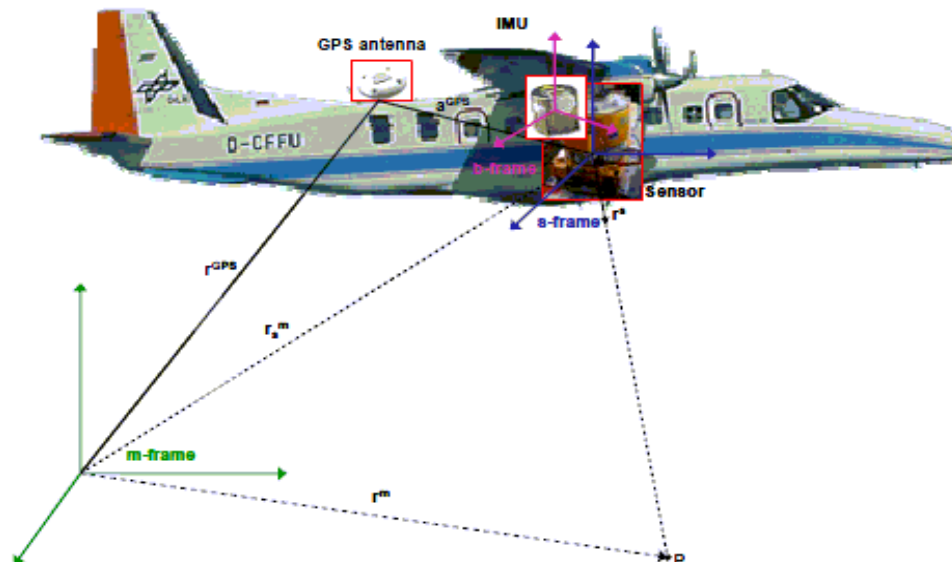
r_s^m = διάνυσμα του προβολικού κέντρου της μηχανής (μετρήσεις *GPS* και *IMU*)

λ = συντελεστής κλίμακας

R_b^m = πίνακας στροφών από το σύστημα του σώματος (*b-frame*) στο *m-frame* σύστημα (μετρήσεις της *IMU*)

R_s^b = πίνακας στροφών από το σύστημα του αισθητήρα (*s-frame*) στο *b-frame* (στροφές *boresight misalignment*)

r^s = διάνυσμα του σημείου *P* εκφρασμένο στο *s-frame*



Εικόνα 4-7: Στοιχεία άμεσης γεωναφοράς αεροφωτογραφίας

Πηγή: Holzwarth, 2005

4.8 Η Εξέλιξη στη Βαθμονόμηση Ψηφιακών Μηχανών

Η μεγάλη διαθεσιμότητα των νέων ψηφιακών αερομεταφερόμενων συστημάτων απεικόνισης σήμερα, έχει αλλάξει τις διαδικασίες βαθμονόμησης κυρίως λόγω των ακόλουθων δύο παραγόντων:

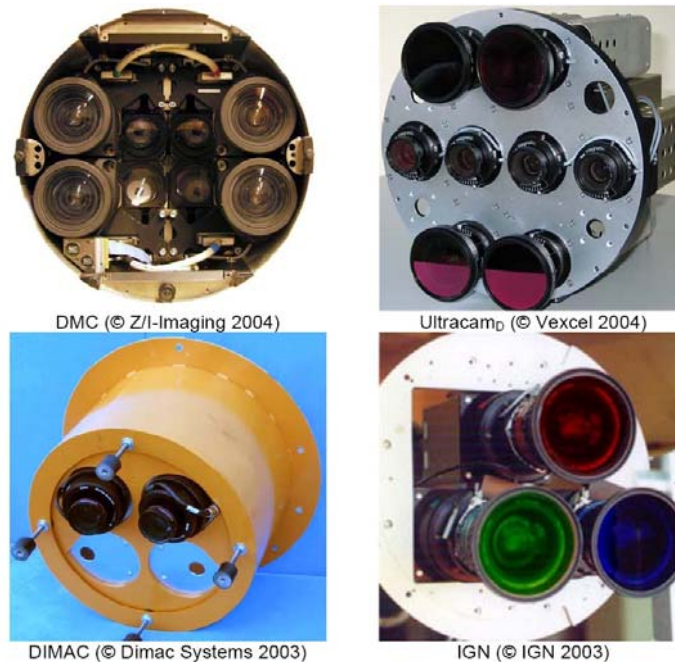
Κατ' αρχάς, συγκρίνοντας αυτά τα ψηφιακά συστήματα με τις αναλογικές φωτογραφικές μηχανές, διαπιστώνεται ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές όσον αφορά την ιδέα σχεδιασμού τους. Για παράδειγμα, η προσέγγιση πλαισίου (*frame*) έναντι της γραμμικής προσέγγισης (*line scanning*), τα συστήματα πολλαπλών φακών, έναντι των μεμονωμένων αισθητήρων, η απόκτηση δεδομένων μεγάλου *format* εικόνας, έναντι μεσαίων ή ακόμα και μικρών *format*, η χρήση παγχρωματικών ή/και πολυφασματικών δεδομένων. Λόγω της νέας αυτής ικανότητας για πολυφασματική απεικόνιση, η βαθμονόμηση πρέπει όχι μόνο να περιοριστεί στη γεωμετρική πλευρά, αλλά να επεκταθεί και στο ραδιομετρικό μέρος.

Ο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με τη βελτίωση της απεικόνισης των μηχανών, με χρήση πρόσθετων αισθητήρων για τον άμεσο προσδιορισμό της τροχιάς τους, όπως το *GPS* ή τα αδρανειακά συστήματα *IMU*. Ο συνδυασμός των μηχανών αυτών με την άμεση γνώση των παραμέτρων του προσανατολισμού, παρέχει πολύ ακριβείς πληροφορίες για την κίνηση των αισθητήρων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τη γρήγορη παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων, όπως οι ορθοεικόνες.

Στον Πίνακα 4-4 συνοψίζονται τα διαφορετικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού με βάση τα διαθέσιμα συστήματα στο εμπόριο. Η Εικόνα 4-8 δείχνει τις διαφορές στο σχεδιασμό των συστημάτων πολλαπλών κεφαλών μεταξύ τους και με τις κλασικές αναλογικές μηχανές. Όλα τα προαναφερθέντα καταλήγουν στη διαφορετική προσέγγιση βαθμονόμησης κάθε μηχανής. Επιπρόσθετα με τις κεφαλές πολυφασματικής καταγραφής, φαίνεται εντονότερα η ανάγκη ραδιομετρικής βαθμονόμησης των φακών των κεφαλών αυτών και έτσι η διαδικασία της βαθμονόμησης δεν θα έπρεπε να περιορίζεται μόνο στη γεωμετρική βαθμονόμηση, για την ακριβέστερη απεικόνιση των στοιχείων του εδάφους.

	Σύστημα	Γεωμετρία		Αισθητήρες-Κεφαλές (φακοί)		Έκταση λήψης		Καταγραφή εικόνας		Αδρανειακό Σύστημα/GPS	
		Γραμμή	καρέ	απλός	Πολλαπλοί	μεγάλη	μεσαία	Syn-chronous	Syn-topic	προαιρετικό	Απαραίτητο
1	ADS40	√		√		√		√			√
2	DMC		√		√	√		√		√	
3	Ultracam _D		√		√	√			√	√	
4	DSS		√	√			√	√		√	
5	DIMAC		√	√	√		√	√		√	
6	HRSC-Ax	√		√		√		√			√
7	3-DAS-1	√			√	√		√			√
8	Starimager	√		√		√		√			√

Πίνακας 4-4: Χαρακτηριστικά ψηφιακών συστημάτων καταγραφής



Εικόνα 4-8: Φακοί ψηφιακών συστημάτων καταγραφής

Ως εκ τούτου, η βαθμονόμηση πρέπει να καλύπτει ολόκληρο το σύστημα της μηχανής, από το κυρίως μέρος απεικόνισης, έως και τα πρόσθετα στοιχεία, όπως το *GPS* ή και τα αδρανειακά συστήματα *INS-IMU* (*system calibration*). Υπό αυτή την έννοια, η ανάγκη πιο σύνθετων, εκτεταμένων και περισσότερο ειδικευμένων διαδικασιών διακρίβωσης είναι εμφανής, με τη βαθμονόμηση πεδίου να αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία.

Από τη στιγμή που ο σχεδιασμός κάθε ψηφιακής μηχανής είναι αρκετά διαφορετικός από κάποια άλλη, θα αναφερθούν παρακάτω κάποιες μηχανές που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές κατηγορίες, οι οποίες είναι η *Applanix/Emerge DSS*, *ZI-Imaging DMC* και η *Leica ADS40*. Αυτές οι μηχανές αντιπροσωπεύουν κατηγορίες όπου οι αισθητήρες τους βασίζονται σε :

- 2D επιφάνεια καταγραφής (*CCD*) με μία κεφαλή μηχανής (τυπικά από μικρό έως μεσαίο εύρος καταγραφής)
- Πολλαπλές 2D επιφάνειες καταγραφής (*CCD*) συνδυασμένες με πολλαπλές κεφαλές φακών (χρησιμοποιώντας μεσαίο έως μεγάλο εύρος καταγραφής για κάθε μία κεφαλή) και
- Συστήματα σάρωσης γραμμών (*line scanning*), όπου πολλαπλές γραμμές γραμμικών (και όχι πινακοποιημένων όπως στις δύο προηγούμενες κατηγορίες) *CCD* με διαφορετικές γωνίες θέασης και διαφορετικές φασματικές ευαισθησίες συνδυάζονται σε ένα εστιακό επίπεδο.

Η *DSS* αντιπροσωπεύει την πρώτη κατηγορία. Αυτή η κατηγορία είναι πολύ σημαντική, διότι πολλές από τις ήδη υπάρχουσες σχετικά χαμηλού κόστους ημι-επαγγελματικές ή επαγγελματικές ψηφιακές μηχανές του εμπορίου, μπορούν να τροποποιηθούν για χρήση

αεροφωτογράφισης. Η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία αφορά περισσότερο σε υψηλής ακρίβειας και μεγάλου εύρους καταγραφής δεδομένα. Η *Vexcel UltracamD* και η *Dimac Systems DIMAC* είναι κάποια από τα συστήματα αεροφωτογράφισης που σχετίζονται με τη δεύτερη κατηγορία. Εκτός από την *ADS40*, άλλα συστήματα σάρωσης γραμμών χρησιμοποιούνται σχετικά σπάνια. Η οικογένεια της *DLR HRSC* και ο σαρωτής *Starlabo TLS* πρέπει ακόμα να αναφερθούν σε αυτή την κατηγορία, καθώς και ο ελαφρώς διαφορετικός σαρωτής *3-DAIS-1* της *Wherli Ass.* Άλλα συστήματα σάρωσης γραμμών, έχουν χρησιμοποιηθεί σε στενή σύνδεση με συστήματα σάρωσης λέιζερ (*laser scanning systems*), για να υποστηρίξουν την αυτόματη ταξινόμηση σημείων λέιζερ. Ένας αντιπρόσωπος αυτής της κατηγορίας ενοποίησης συστημάτων είναι το *Toposys Falcon laser scanner system*.

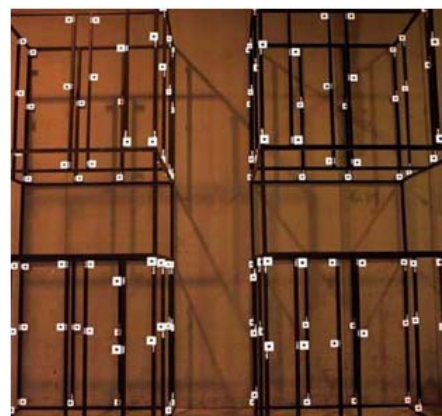
4.8.1 DSS (Applanix)

Η *DSS* της *Applanix*, εκπροσωπεί τις ψηφιακές μεσαίου εύρους καταγραφής (*medium format*) μηχανές αεροφωτογράφισης. Το οπτικό μέρος είναι τοποθετημένο σε ένα *CCD* της *MegaVision* διαστάσεων 4092x4077 pixel τοποθετημένο σε μία *Contax 645* μεσαίου φορμάτ θήκη φιλμ φωτομηχανής. Η θήκη είναι στερεωμένη σε ένα εξωτερικό σκελετό για να διατηρεί μια σταθερή εσωτερική γεωμετρία στην μηχανή (Εικόνα 4-9). Το σώμα της μηχανής είναι άκαμπτα στερεωμένο με ένα *Applanix POS/AV 410 GPS/αδρανειακό* σύστημα, παρέχοντας πλήρως τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού για αυτόματη γεωαναφορά των λήψεων (*direct georeferencing*). Οι διαστάσεις του *CCD* είναι 3.68x3.67 cm² (9x9 μm² *pixel size*) το οποίο είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος των μεσαίου φορμάτ αναλογικών μηχανών που χρησιμοποιούν φιλμ (περίπου από 4.5x6 cm² έως 6x7 cm²). Σε συνδυασμό με τους δύο διαθέσιμους φακούς των 55mm (παρεχόμενος) και των 35mm (προαιρετικός), το οπτικό πεδίο καταλήγει να είναι από 37° έως 56°. Συγκρίνοντας τα παραπάνω με τις διαστάσεις της αναλογικής μηχανής (23x23 cm²) αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε κανονικό φακό γωνίας λήψης και σταθεράς της μηχανής (41°, 30.5 cm) ή σε ευρυγώνιο φακό αντίστοιχων χαρακτηριστικών (57°, 21 cm).

Η γεωμετρική βαθμονόμηση της *DSS* γίνεται με επίγεια και εναέρια βαθμονόμηση. Χρησιμοποιώντας ένα «κλωβό βαθμονόμησης» (*calibration cage*) (Εικόνα 4-10) και φωτογραφίζοντάς τον από διαφορετικές γωνίες, υπολογίζονται οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού, δηλαδή η σταθερά της μηχανής, το πρωτεύον σημείο και η διαστροφή του φακού. Επιπρόσθετα στις παραμέτρους της μηχανής, υπολογίζεται και το διάνυσμα μεταξύ του κέντρου του *IMU* και του προβολικού κέντρου της μηχανής. Μετά την επίγεια βαθμονόμηση, οι υπολογισμένες παράμετροι επικυρώνονται και από εναέρια δεδομένα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη διαδικασία της βαθμονόμησης, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και τη συνολική επεξεργασία παρουσιάζονται από τον *Mostafa* (2004).



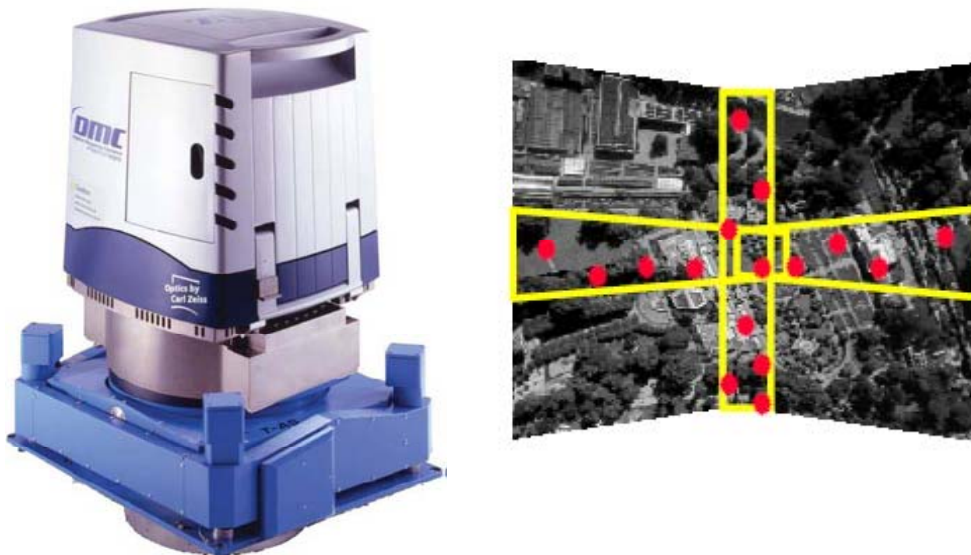
Εικόνα 4-9: Η DSS σε εξωτερικό σκελετό για τη σταθεροποίηση της θήκης της



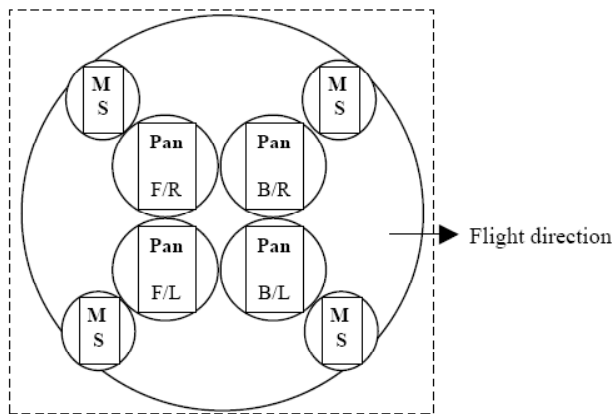
Εικόνα 4-10: Κλωβός βαθμονόμησης της DSS

4.8.2 DMC (ZI-Imaging)

Η ιδέα και οι αρχές λειτουργίας του συστήματος *DMC* της *ZI-Imaging*, πρωτοπαρουσιάστηκαν στην φωτογραμμετρική κοινότητα κατά τη διάρκεια της Φωτογραμμετρικής Εβδομάδας το 1999 (*Photogrammetric Week 1999*). Η επίσημη εμπορική παρουσίαση έλαβε χώρα στο συνέδριο της *ISPRS* το 2000 στο Άμστερνταμ. Ο ψηφιακός αισθητήρας της μηχανής βασίζεται στη λύση των πολλαπλών κεφαλών χρησιμοποιώντας τέσσερις, μεγάλου φορμάτ, αισθητήρες *CCD* (7k x 4k pixel, pixel size 12x12 μm^2). Θεωρητικά, ένα απλό *CCD*, παρόμοιο σε διαστάσεις και με παρόμοια ανάλυση με τις υπάρχουσες αναλογικές μηχανές, το οποίο να παρέχει την υψηλή γεωμετρική ακρίβεια σε συνδυασμό με την ακόμη καλύτερη ραδιομετρία θα ήταν αυτό που θα έπρεπε να χρησιμοποιείται στις ψηφιακές φωτομηχανές. Ωστόσο, σήμερα δεν είναι διαθέσιμο ένα τέτοιο τσιπ *CCD* για τεχνολογικούς και οικονομικούς λόγους. Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για τη φωτογραμμετρία και τις εργασίες αεροφωτογράφισης. Για να ικανοποιήσει την ανάγκη αυτή, η *DMC*, αποτελείται από τα τέσσερα αυτά απλά *CCD* που δουλεύουν παράλληλα το ένα με το άλλο. Τα τέσσερα αυτά *CCD* χρησιμοποιούνται στις κεφαλές υψηλής ανάλυσης της μηχανής οι οποίες έχουν ελαφριά απόκλιση μεταξύ τους. Στην Εικόνα 4-11 φαίνεται ολόκληρη η σχεδίαση της μηχανής. Η *DMC* συνδυάζει τέσσερα παγχρωματικά και τέσσερα πολυφασματικά στοιχεία, όπως στην Εικόνα 4-12. Τα τέσσερα παγχρωματικά στοιχεία, είναι τοποθετημένα σε μία 2x2 συστοιχία και οι οπτικοί άξονές τους κοιτάζουν προς τα κάτω με μια μικρή απόκλιση ο καθένας, για να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια του εδάφους. Με μία μεταεπεξεργασία μετασχηματίζονται οι τέσσερις υπό-εικόνες (*sub-images*), σε μία «συνολική», «εικονική» εικόνα (*virtual image*), η οποία έχει τα χαρακτηριστικά της κεντρικής προβολής (Εικόνα 4-13). Τα πολυφασματικά στοιχεία είναι τοποθετημένα περίξ των παγχρωματικών και λαμβάνουν εικόνες «κοιτάζοντας» προς το ναδίρ. Οι πολυφασματικές λήψεις έχουν την ίδια κάλυψη εδάφους με την συνολική εικόνα (*virtual image*), αλλά με μειωμένη ανάλυση.

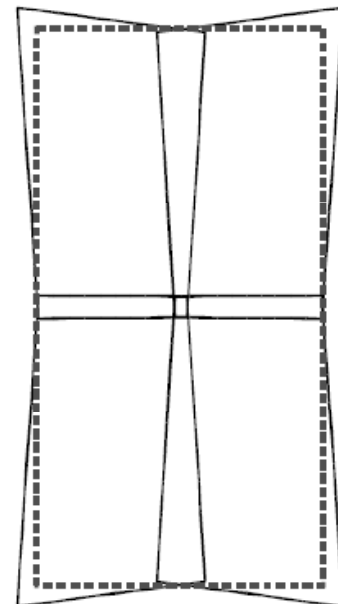


Εικόνα 4-11: Η *DMC* της *ZI-Imaging* και η παγχρωματική της εικόνα



Εικόνα 4-12: Συστοιχία φακών της DMC

F/R: εμπρός δεξιά, B/R: πίσω δεξιά, F/L: εμπρός αριστερά,
B/L: πίσω αριστερά πλευρά λήψης κοιτάζοντας την κατεύθυνση πτήσης



Εικόνα 4-13: Ίχνος των παγχρωματικών λήψεων

Διακεκομμένη γραμμή= συνολική εικόνα (virtual image)

Στον Πίνακα 4-5 παρουσιάζονται κάποια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής DMC. Εξαιτίας της αρχιτεκτονικής των CCD η κοντή πλευρά του τσιπ (οι γραμμές της εικόνας) πρέπει να βρίσκονται κατά μήκος της κατεύθυνσης πτήσης, δηλαδή κατά τον x-άξονα του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας. Η γωνία εκτροπής του κάθε οπτικού στοιχείου χρησιμεύει στο να υπάρχει επικάλυψη περίπου στο 1% μεταξύ των υπό-εικόνων. Μία συμπαγής μήτρα-θήκη εγγυάται τη σταθερή γεωμετρική σχέση μεταξύ των οπτικών στοιχείων. Όπως στις αναλογικές μηχανές, υπάρχει ο μηχανισμός αποκατάστασης λόγω κίνησης προς τα εμπρός (*Forward Motion Compensation – FMC*), κάτι αντίστοιχο υπάρχει σε κάθε ένα στοιχείο μηχανής (*TDI*). Το σύστημα αυτό, ονομάζεται *TDI (Time Delayed Integration)* και δουλεύει με ηλεκτρονικό τρόπο, ολοκληρώνοντας έτσι το σύστημα των φακών (Tang, 2000).

Παράμετρος	Τιμή
Συνολικά :	
Προσεγγιστική απόσταση μεταξύ φακών κατά x και y (γραμμή/στήλη) [mm]	80/170
Προσεγγιστικές γωνίες κλίσης φ/ω (γραμμή/στήλη)	10°/20°
Υπό-εικόνα (sub-image) :	
Βαθμονομημένη σταθερά c_{sub} [mm]	120
Μέγεθος εικονοστοιχείου pel_{sub} [μm]	12
Ραδιομετρική ανάλυση [bit]	12
Μέγεθος εικόνας [pixel]	4096x7168
Μέγεθος εικόνας [mm]	49,15x86,02
Προσεγγιστική γωνία θέασης (γραμμή/στήλη)	23°/39°
Συνολική εικόνα (virtual image) :	
Καθορισμένη σταθερά της μηχανής c_{virt} [mm]	120
Μέγεθος εικονοστοιχείου pel_{virt} [μm]	12
Προσεγγιστικό μέγεθος εικόνας [pixel]	8000x14000
Προσεγγιστικό μέγεθος εικόνας [mm]	95x168
Προσεγγιστική γωνία θέασης (γραμμή/στήλη)	44°/74°

Πίνακας 4-5: Τεχνικές προδιαγραφές και παράμετροι της διάταξης των παγχρωματικών φακών της DMC

Όπως προαναφέρθηκε, οι υπό-εικόνες μετασχηματίζονται σε μια συνολική εικόνα πριν την περαιτέρω επεξεργασία. Αναντίρρητα, η ακρίβεια της συνολικής εικόνας έρχεται σε πρώτη προτεραιότητα για οποιαδήποτε φωτογραμμετρική ή χαρτογραφική διαδικασία. Στο σημείο αυτό, δηλαδή της ακρίβειας της συνολικής εικόνας, δύο θέματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, τα οποία είναι: i) η επίδραση του μετασχηματισμού σε μία συνολική εικόνα και ii) η πιθανή μετατόπιση υψομέτρων κατά τη στερεοσκοπική παρατήρηση.

i) *Επίδραση του μετασχηματισμού.* Για να χρησιμοποιηθούν οι πρακτικές και η τεχνικές που ήδη υπάρχουν στην φωτογραμμετρία και ειδικότερα το υπάρχον λογισμικό φωτογραμμετρικών διαδικασιών, είναι απαραίτητο η συνολική εικόνα να μοντελοποιηθεί, όπως οι απλές εικόνες κεντρικής προβολής. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι κάθε μία από τις υπό-εικόνες δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πουθενά αλλού εκτός της πλατφόρμας λογισμικού της εταιρείας για τον σχηματισμό της συνολικής εικόνας, καθώς επίσης και πουθενά στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει λεπτομερής αναφορά για το είδος της προβολής τους και πού ακριβώς βρίσκεται το κέντρο της προβολής. Προφανώς, λόγω της γωνίας εκτροπής της κάθε μιας μηχανής, αλλά και του τρόπου ενοποίησης τους στη συνολική εικόνα, κάθε προβολικό κέντρο πρέπει να βρίσκεται σε έκκεντρη θέση. Μάλιστα το σημείο αυτό βρίσκεται πλησίον των δύο πλευρών που έχουν αλληλοεπικάλυψη με τις άλλες υπό-εικόνες. Έτσι, λοιπόν, τα τέσσερα προβολικά κέντρα πρέπει να μετασχηματιστούν σε ένα. Αυτός ο μετασχηματισμός, μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια γενική περίπτωση έκκεντρης κεντρικής προβολής, η οποία είναι συνάρτηση και του προσανατολισμού των καμερών και της διακύμανσης της επιφάνειας του αντικειμένου. Ο χονδρικός τρόπος αυτού του μετασχηματισμού των υπό-εικόνων στο κοινό επίπεδο της συνολικής εικόνας πρέπει να γίνει μέσω του χώρου του αντικειμένου, π.χ. χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM), το οποίο γενικότερα δεν είναι διαθέσιμο. Ακόμα κι έτσι, με ένα δισδιάστατο μετασχηματισμό δηλαδή, θα επιβληθεί μια γεωμετρική μετάθεση λόγω των διαφορετικών κέντρων των προβολών, αν το έδαφος δεν είναι τελειώς επίπεδο.

Για την αποφυγή της πολυπλοκότητας της προηγούμενης μοντελοποίησης του μετασχηματισμού των εικόνων μέσω του χώρου του αντικειμένου, επιλέγεται και αναλύεται παρακάτω μία πιο γεωμετρική προσέγγιση βασισμένη στις παραμέτρους του Πίνακα 4-5. Πρέπει να σημειωθεί ότι για να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα, πρέπει οι τέσσερις υπό-εικόνες να έχουν ληφθεί ακριβώς την ίδια στιγμή. Αυτή η προϋπόθεση πρέπει να ικανοποιείται με τον κατάλληλο συγχρονισμό του κλείστρου των μηχανών. Επίσης, ο σχετικός προσανατολισμός κάθε μηχανής μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερός σε σχέση με το χρόνο. Στο Σχήμα 4-21 φαίνονται δύο υπό-εικόνες και η συνολική εικόνα. Σύμφωνα με αυτό, αρχικά επιλέγεται ένα ύψος πτήσης h_g (από ένα επίπεδο αναφοράς στο χώρο του αντικειμένου), για το οποίο η επίδραση της γεωμετρίας του εδάφους (αβεβαιότητες συντεταγμένων) πρέπει να απαλειφθεί. Το σημείο Q βρίσκεται σε τέτοια θέση στο επίπεδο αναφοράς, ώστε να απεικονίζεται στο πρωτεύον σημείο της συνολικής εικόνας. Κατ' αυτόν τον τρόπο το σημείο Q'_{virt} διαχωρίζει τη συνεισφορά των δύο γειτονικών υπό-εικόνων στη συνολική εικόνα. Στη συνέχεια επιλέγεται ένα σημείο P, ώστε να βρίσκεται σε ύψος Δh πάνω από το επίπεδο αναφοράς έτσι ώστε $P'_{sub}=Q'_{sub}$. Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς Δh και την εκτροπή των προβολικών κέντρων dX_0 , τα δύο προβαλλόμενα σημεία P'_{virt} και Q'_{virt} στη συνολική εικόνα είναι διαφορετικά. Η μετατόπιση dX στο χώρο του αντικειμένου μοντελοποιείται όπως στην παρακάτω σχέση (4.8-1) για τις X και Y διευθύνσεις:

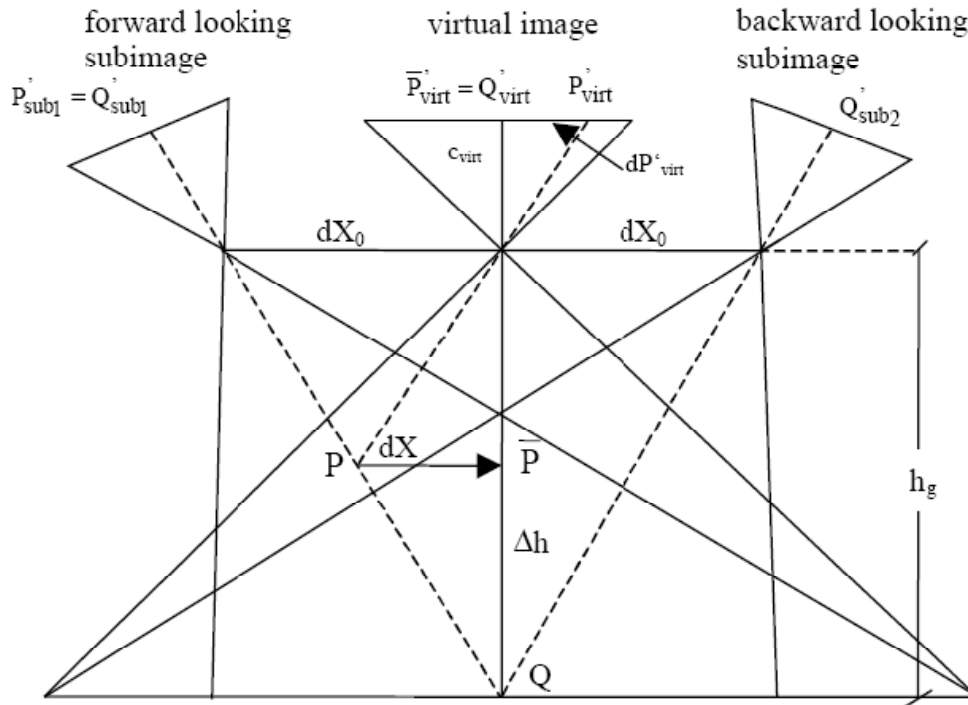
$$dX = \frac{\Delta h}{h_g} dX_0, \quad dY = \frac{\Delta h}{h_g} dY_0 \quad (4.8-1)$$

Έτσι, οι αντίστοιχες διορθώσεις συντεταγμένων για το σημείο P στον χώρο της εικόνας υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.8-2) που ακολουθούν:

$$dx' = \frac{c_{virt}}{h_g - \Delta h} dX = \frac{c_{virt}}{h_g} \frac{\Delta h / h_g}{(1 - \Delta h / h_g)} dX_0$$

$$dy' = \frac{c_{virt}}{h_g} \frac{\Delta h / h_g}{(1 - \Delta h / h_g)} dY_0$$
(4.8-2)

έτσι ώστε $\bar{P}'_{virt} = P'_{virt} - dP'_{virt} = Q'_{virt}$.



Σχήμα 4-21: Γεωμετρικές σχέσεις της DMC κατά τη διεύθυνση της πτήσης

Με τον τρόπο αυτό, οι τιμές των dx' και dy' δείχνουν την καταληκτική εκτροπή λόγω μετασχηματισμού στο σημείο P στη συνολική εικόνα. Οι εξισώσεις (4.8-1) και (4.8-2) μπορούν να εφαρμοστούν όχι μόνο στο ειδικό σημείο P, αλλά σε οποιοδήποτε αυθαίρετο σημείο πιο πάνω ή πιο κάτω στο επίπεδο αναφοράς. Πρέπει να τονιστεί ότι η επικαλυπτόμενη περιοχή μεταξύ της εμπρός και της πίσω υπό-εικόνας στο Σχήμα 4-21 είναι αρκετά μεγάλη, λόγω του μεγάλου λόγου dX_0/h_g , για να είναι πιο κατανοητό το παράδειγμα. Η πραγματική επικάλυψη όμως περιορίζεται σε ένα μικρό ποσοστό του μεγέθους της κάθε υπό-εικόνας.

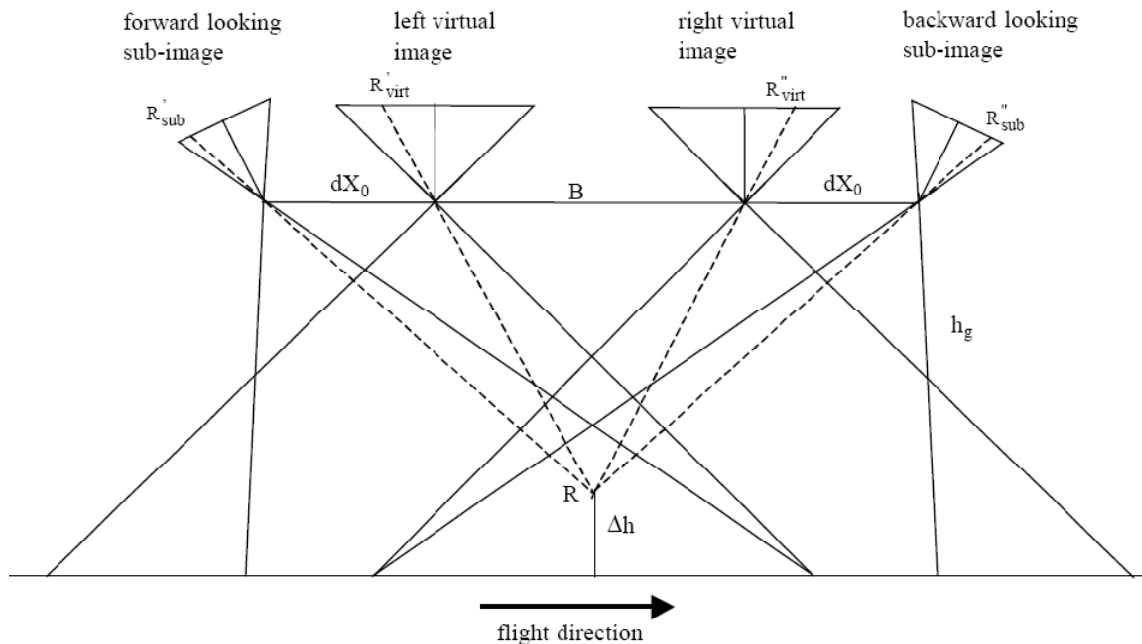
ii) *Μετατόπιση υψομέτρων.* Η μετατόπιση στη X-διεύθυνση, επηρεάζει επίσης και τη συντεταγμένη Z, που λαμβάνεται από τη στερεοσκοπική παρατήρηση και μέτρηση. Υποθέτοντας μια κανονική περίπτωση με μία κατά μήκος επικάλυψη 60%, το μοντέλο που λαμβάνεται στο τέλος βασίζεται στο συνδυασμό του εμπρός στοιχείου φακών και του πίσω στοιχείου του επόμενου σετ λήψεων (Σχήμα 4-22). Για ένα σημείο R σε ένα ύψος Δh πάνω από το επίπεδο αναφοράς στο κέντρο του μοντέλου, οι μετατοπίσεις λόγω του μετασχηματισμού δίνονται από τις εξισώσεις (4.8-2). Έχουν την ίδια απόλυτη τιμή, αλλά διαφορετικό πρόσημο. Έτσι, το άθροισμα των δύο απόλυτων τιμών μπορεί να θεωρηθεί μετατόπιση παράλλαξης d_{px} της στερεοσκοπικής μέτρησης στη συνολική εικόνα για τον καθορισμό του ύψους στο R. Η διόρθωση στο υψόμετρο σύμφωνα με τα παραπάνω θα είναι:

$$dZ = \frac{h_g}{c_{virt}} \frac{h_g}{B} d_{px} = \frac{h_g}{c_{virt}} \frac{h_g}{B} 2 \frac{c_{virt}}{h_g} \frac{\Delta h / h_g}{(1 - \Delta h / h_g)} dX_0 = \frac{c_{virt}}{b} \frac{\Delta h / h_g}{(1 - \Delta h / h_g)} dB$$
(4.8-3)

όπου B και b είναι η βάσεις στο χώρο του αντικειμένου και στο χώρο της εικόνας αντίστοιχα και η μετατόπιση της βάσης είναι $dB=2*dX_0$.

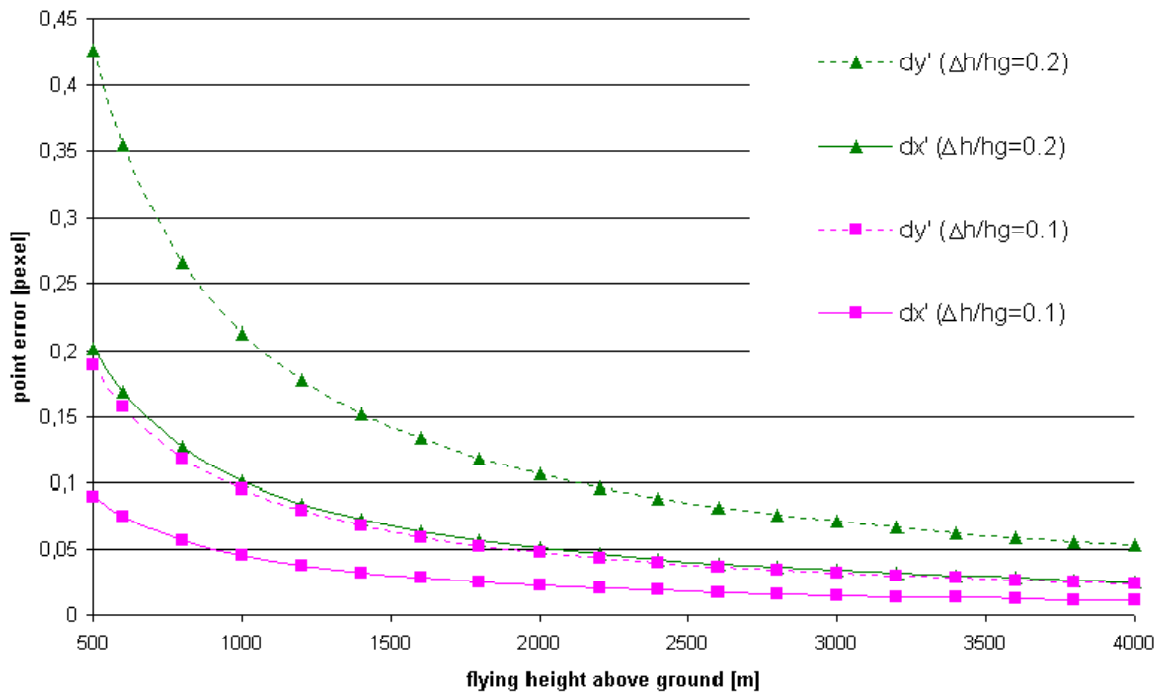
Για εφαρμογές υψηλότερης ακρίβειας η επιρροή στο ύψος μπορεί να υπολογιστεί αλλάζοντας την τιμή της εστιακής απόστασης με την τιμή dc_{virt} . Από τη στιγμή που $dZ/dc_{virt}=(h_g-\Delta h)/c_{virt}$, έχουμε: $dZ=(h_g-\Delta h)/c_{virt}dc_{virt}$ και εξισώνοντας αυτή την εξίσωση με την εξίσωση (4.8-3) προκύπτει:

$$\frac{c_{virt}}{b} \frac{\Delta h/h_g}{(1-\Delta h/h_g)} dB = \frac{h_g - \Delta h}{c_{virt}} dc_{virt} \Rightarrow dc_{virt} = \frac{c_{virt}}{b} \frac{c_{virt}}{h_g} \frac{\Delta h/h_g}{(1-\Delta h/h_g)^2} dB \quad (4.8-4)$$



Σχήμα 4-22: Στερεομοντέλο της DMC και μετατόπιση του υψομέτρου

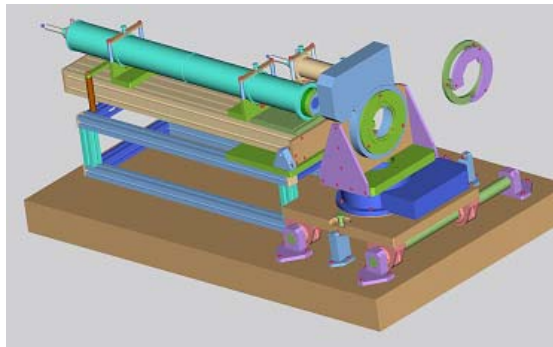
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι τα dx' και dy' δεν έχουν πολύ μεγάλες τιμές και μειώνονται ακόμα περισσότερο με την αύξηση του ύψους. Η μετατόπιση κατά Y μπορεί να φτάσει και 0.43 pixel για ύψος πτήσης 500m και $\Delta h/h_g=0.2$ που σημαίνει υψομετρικές διαφορές 100m πάνω ή κάτω από το επίπεδο αναφοράς. Αυτή η μετατόπιση μεταφράζεται σε 1.7cm στο έδαφος. Η μετατόπιση κατά την X διεύθυνση είναι ακόμη μικρότερη εξαιτίας της μικρής μετατόπισης των δύο προβολικών κέντρων κατά μήκος της γραμμής πτήσης. Στην πράξη, ο λόγος $\Delta h/h_g$ μόνο κάτω από εξαιρετικές συνθήκες μπορεί να υπερβεί την τιμή 0.2, αφού αυτό σημαίνει διαφορά στο ύψος του αντικειμένου 40% σε σχέση με το ύψος πτήσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις συνιστάται να δημιουργούνται ξεχωριστές γραμμές πτήσης. Οι παραπάνω εκτροπές στις συντεταγμένες, αλλά και το πρόβλημα της μετατόπισης λόγω της αναδόμησης της συνολικής εικόνας (*resampling*), μπορούν εκμηδενιστούν αν αντί για τη συνολική εικόνα χρησιμοποιηθούν οι τέσσερις υπό-εικόνες ξεχωριστά. Αυτό όμως εισάγει άλλα προβλήματα καθώς κάθε δύο μοντέλα θα υπάρχει μικρή επικάλυψη, αλλά και η γεωμετρία και το μοντέλο της προβολής δεν είναι ευρέως γνωστό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν στα ήδη υπάρχοντα μηχανήματα και λογισμικά που κυκλοφορούν ευρέως για φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Οι υπό-εικόνες παρέχονται ως πρωτογενή δεδομένα (*raw data*) και μπορεί να τύχουν επεξεργασίας μόνο από το λογισμικό που συνοδεύει την DMC για το σχηματισμό της συνολικής εικόνας. Οι κατασκευαστές επίσης δηλώνουν ότι η αναδόμηση (*resampling*) της συνολικής εικόνας από τις τέσσερις εικόνες δεν επηρεάζει στην ακριβή αποτύπωση του αντικειμένου. Στο Σχήμα 4-23 φαίνονται οι εκτροπές που προαναφέρθηκαν ανάλογα με το ύψος πτήσης (Tang, 2000).



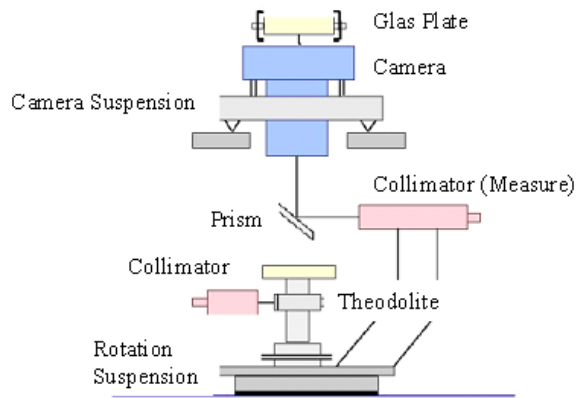
Σχήμα 4-23: Εκτροπή dx' και dy' σε σχέση με το h_g και το $\Delta h/h_g$

Η βαθμονόμηση της *DMC*, σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία, χωρίζεται σε δύο μέρη. Πρώτα πρέπει να βαθμονομηθεί η κάθε μία κεφαλή ξεχωριστά (*single head calibration*) και να υπολογιστούν οι παράμετροι βαθμονόμησης. Δεύτερον, πρέπει να υπολογιστεί ο προσανατολισμός της κάθε μίας κεφαλής μέσα στον κώνο της μηχανής (*platform calibration*). Η βαθμονόμηση, λοιπόν, ξεκινά μετά την τοποθέτηση των οπτικών και ηλεκτρονικών συστημάτων σε κάθε κεφαλή από το εργοστάσιο και γίνεται ξεχωριστά και μεμονωμένα για την καθεμία. Στη συνέχεια, τοποθετούνται όλα τα οπτικά στοιχεία στην «πλατφόρμα» της μηχανής και υπολογίζεται ο σχετικός προσανατολισμός μεταξύ τους, από πραγματικές φωτογραφίες που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του εργοστασιακού ελέγχου. Έτσι, γεννάται το πιστοποιητικό βαθμονόμησης της μηχανής το οποίο και τη συνοδεύει. Το συνοδευτικό αυτό πιστοποιητικό με τις παραμέτρους που περιέχει χρησιμεύει στον χρήστη για να ρυθμίσει τη μηχανή κατά την μεταεπεξεργασία. Στις αρχές του 2005 η γεωμετρική βαθμονόμηση της *DMC* μεταφέρθηκε στην *Carl Zeiss Jena*, σε εργαστήριο που δημιουργήθηκε ειδικά για την *DMC*, από την γερμανική Υπηρεσία Βαθμονομήσεων (*Deutscher Kalibrierdienst*), που βρίσκεται στο εργοστάσιο της *Carl Zeiss* στο *Oberkochen* της Γερμανίας και που λειτουργούσε ήδη από ετών για τη βαθμονόμηση και των αναλογικών μηχανών.

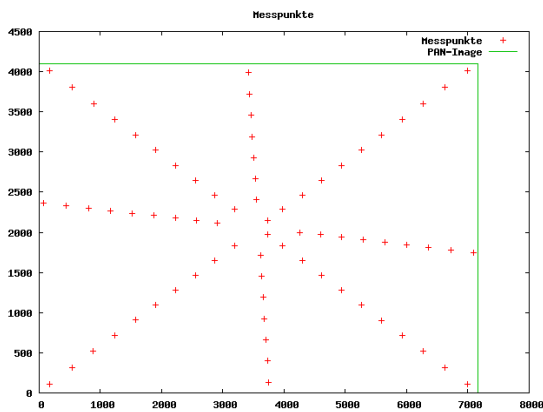
Έτσι, υπάρχουν κάποιες διαφορές στην προσέγγιση των δύο βαθμονομήσεων. Ενώ η νέα βαθμονόμηση στην *Jena* χρησιμοποιεί δύο περιστρεφόμενα ταμπλό υψηλής ακρίβειας (Εικόνα 4-14), η βαθμονόμηση του *Oberkochen* χρησιμοποιεί μια οπτική διάταξη με ένα ευθυγραμμιστή και ένα γωνιόμετρο (*Zeiss Theodolite TH2*) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-15. Με το γωνιόμετρο επιτυγχάνεται θεωρητική ακρίβεια των 0.6 mrad, όταν τα κυλιόμενα ταμπλό του νέου συστήματος βαθμονόμησης επιτυγχάνουν μια ακρίβεια των 0.3 mrad. Οι κατανομή των στόχων που θα μετρηθούν είναι περίπου ίδια. Μετρώνται αρκετά σημεία κατά μήκος τεσσάρων γραμμών όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-16 και στην Εικόνα 4-17. Με την προσέγγιση του *Oberkochen* χρησιμοποιούνταν 90 στόχοι, ενώ με την προσέγγιση της *Jena* 75 στόχοι αποδεικνύονται αρκετοί. Όλες οι μετρήσεις, σε κάθε επίπεδο, γίνονται δύο φορές, ενώ η κεφαλή περιστρέφεται κατά 180°. Σε αυτή την περίπτωση υπερτερεί η διάταξη με τα στρεφόμενα ταμπλό, που εξασφαλίζουν καλύτερη ακρίβεια στην περιστροφή αυτή.



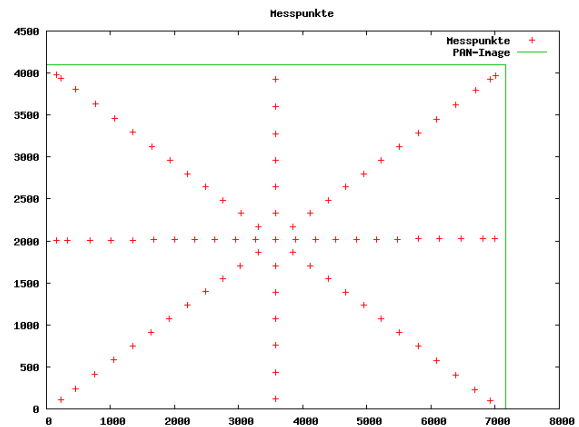
Εικόνα 4-14: Στοιχεία μέτρησης Jena



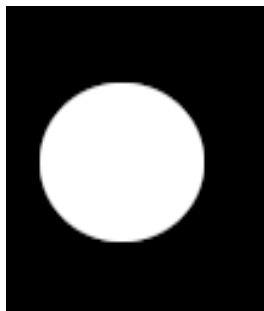
Εικόνα 4-15: Στοιχεία μέτρησης Oberkochen



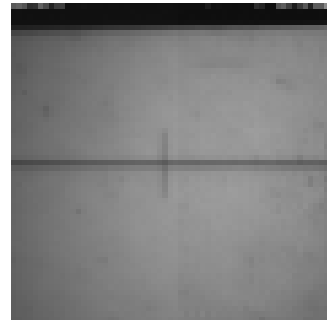
Εικόνα 4-16: Μετρούμενα σημεία στην κατά Jena βαθμονόμηση



Εικόνα 4-17: μετρούμενα σημεία στη βαθμονόμηση του Oberkochen



Εικόνα 4-18: Στόχος στην κατά Jena βαθμονόμηση

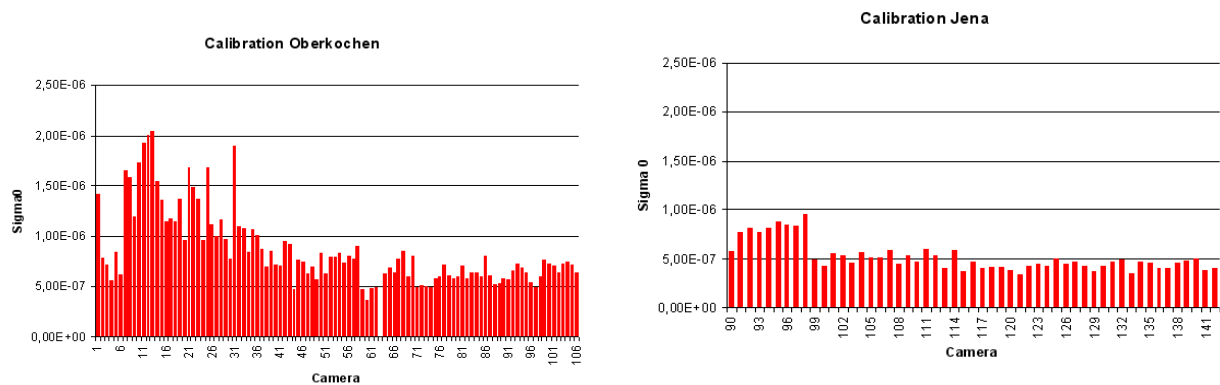


Εικόνα 4-19: Στόχος στην κατά Oberkochen βαθμονόμηση

Η νέα προσέγγιση (κατά *Jena*) χρησιμοποιεί ένα κυκλικό στόχο, ενώ η παλιά προσέγγιση (κατά *Oberkochen*) χρησιμοποιεί στόχο νηματόσταυρο. Επίσης, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αλγόριθμοι για να ληφθούν τα κέντρα των στόχων. Η παλιά προσέγγιση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων επιτυγχάνει ακρίβεια 1/20 του pixel. Με τη νέα μέθοδο, η ακρίβεια αυξάνει σε τιμές καλύτερες του 1/25 του pixel για την μέτρηση του κέντρου. Ο λόγος είναι διττός. Πρώτον, οι κυκλικοί στόχοι μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια και δεύτερον η σχεδίαση των στόχων αυτών, επιλέχθηκε να είναι με μεγάλη αντίθεση, για την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο.

Η τυπική απόκλιση της μονάδας βάρους (σ_0 *a posteriori*) των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων δεν έχει νόημα να συγκριθεί, καθώς από εκεί φαίνεται απλώς με ποια ακρίβεια ταιριάζουν οι μετρήσεις στο υιοθετούμενο μαθηματικό μοντέλο. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται μόνο ελάχιστες διαφορές. Για τη μέθοδο του *Oberkochen* πρέπει να εκτιμηθούν

οι εξωτερικοί προσανατολισμοί σε τέσσερις θέσεις της μηχανής, ενώ με τη μέθοδο της *Jena* εισάγονται οι 6 θέσεις της μηχανής. Το γεγονός αυτό αυξάνει τους αγνώστους από 22 σε 28. Λόγω των ελάχιστων διαφορών μπορούν να συγκριθούν τα σ_0 όπως στα γραφήματα στο Σχήμα 4-24:

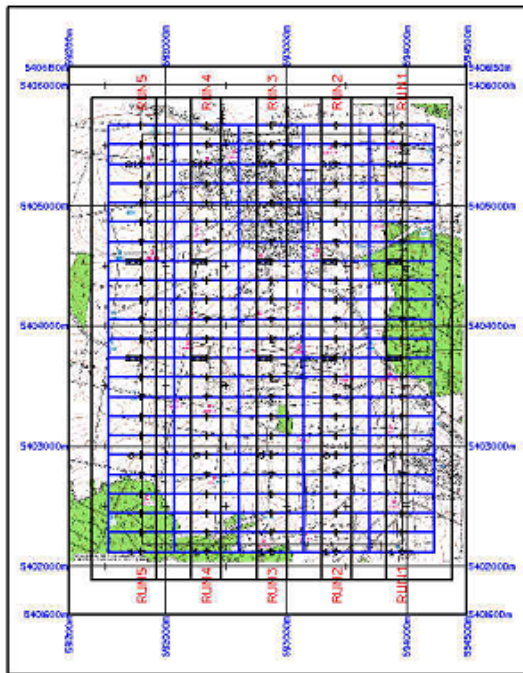


Σχήμα 4-24: σ_0 για τις βαθμονομήσεις του Oberkochen (αριστερά) και της Jena (δεξιά) για διαφορετικούς φακούς

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι η βαθμονόμηση του *Oberkochen* φαίνεται να διορθώνεται ως προς το χρόνο χωρίς να αλλάξει η διαδικασία. Επίσης, είναι φανερό ότι η ακρίβεια διαφέρει από τη μία μηχανή στην άλλη, σε σύγκριση με την βαθμονόμηση της *Jena*. Ένας λόγος είναι η μεγαλύτερη ακρίβεια των κυλιόμενων ταμπλό και ένας άλλος είναι η πλήρης αυτοματοποίηση της βαθμονόμησης της *Jena*. Στη βαθμονόμηση του *Oberkochen* ο παρατηρητής που είναι άνθρωπος χρειάζεται κάποια εμπειρία για να εξαγάγει την καλύτερη ακρίβεια. Με τη μέθοδο της *Jena* μειώνεται το σ_0 στο μισό. Λόγω του μεγαλύτερου αριθμού των αγνώστων μια μείωση του σ_0 ήταν αναμενόμενη. Αλλά, με τη μείωση στο μισό είναι ξεκάθαρο ότι η εσωτερική ακρίβεια είναι καλύτερη. Επίσης φαίνεται ότι με τη νέα μέθοδο επιτυγχάνεται μία σταθερότητα, λόγω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας που χρησιμοποιείται.

Οι παράμετροι της βαθμονόμησης υπολογίζονται από μια συνόρθωση δέσμης, όπου θεωρούνται επιπρόσθετοι άγνωστοι. Οι μετρούμενες γωνίες μετασχηματίζονται σε συντεταγμένες του αντικειμένου (σε κάποιο τοπικό σύστημα αναφοράς), μέσω παρεμβολής των μετρούμενων ακτίνων σε ένα επίπεδο με σταθερές διαστάσεις και απόσταση από το φακό. Στην εργαστηριακή βαθμονόμηση της *DMC* οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται, είναι οι φυσικές παράμετροι που προτάθηκαν από τον *Brown*, ελαφρώς αλλαγμένες από τον *Fraser* (1997). Εκτός από τις τρεις γεωμετρικές παραμέτρους Δx_0 , Δy_0 και Δc , οι δύο πρώτοι συντελεστές (K_1, K_2) από τους τρεις της ακτινικής διαστρόφης είναι πάντα σημαντικοί. Σε πολλές περιπτώσεις οι συντελεστές B_1 και B_2 (*affinity* και *shear*) υπολογίζονται ως σημαντικοί, δηλαδή η τιμή τους είναι υπολογίσιμη και όχι αμελητέα. Λόγω της υψηλής ποιότητας κατασκευής των φακών οι συντελεστές P_1 και P_2 στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι αμελητέοι. Επαναλαμβάνοντας τη βαθμονόμηση μετά από τα τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. δύο χρόνια), διαπιστώθηκε ότι οι μέγιστες διορθώσεις που επιφέρονται είναι περίπου στο 1/10 του pixel (*Dorstel et al 2003*), λόγω της σταθερότητας της κατασκευής της μηχανής.

Το επόμενο βήμα αξιολόγησης της νέας μεθόδου της *Jena*, είναι να συγκριθούν οι ακρίβειες ενός αεροτριγωνισμού. Κατά τη διάρκεια των εργοστασιακών ελέγχων κάθε μηχανή «πετάει» πάνω από το πεδίο ελέγχου της εταιρίας στο *Elchingen* (Εικόνα 4-20). Κατά την δοκιμαστική πτήση λαμβάνονται εικόνες σε κλίμακα 1:5000 και το πεδίο περιέχει 33 καλά κατανομημένα σημεία ελέγχου. Στους πίνακες που ακολουθούν (4-7, 4-8, 4-9) φαίνονται οι ακρίβειες του αεροτριγωνισμού που είναι παρόμοιες για τις δύο προσεγγίσεις βαθμονόμησης και για τις τρεις κλίμακες φωτογράφισης. Μόνο η ακρίβεια του υψομέτρου εμφανίζει αξιόλογες διαφορές με τη βαθμονόμηση κατά *Jena* να παρουσιάζει υψηλότερη ακρίβεια.



Εικόνα 4-20: Πεδίο ελέγχου του Elchingen

Κλίμακα φωτογράφισης	1:5000
Ύψος πτήσης (από το έδαφος) [m]	600 AGL
Ύψος πτήσης (από ΜΣΘ) [m]	1200 AMSL
Πλάτος πεδίου [m]	539.1
Μήκος βάσης [m]	161.3
Αριθμός λήψεων	115
Επικάλυψη κατά πλάτος [%]	35
Επικάλυψη κατά μήκος [%]	65
Υψόμετρο εδάφους [m]	600
Γραμμές πτήσης	5
Εικόνες ανά γραμμή πτήσης	23
Σύνολο εικόνων	115
Σημεία γνωστών γεωδαιτικών συν/νων	33
Μέγεθος εδαφοψηφίδας [cm]	5

Πίνακας 4-6: Παράμετροι δοκιμαστικής πτήσης

EL4000	Μονάδες	Βαθμονόμ. Oberkochen	Βαθμον. Jena
RMS Control Points	X [m]	0.030	0.028
	Y [m]	0.022	0.024
	Z [m]	0.056	0.050
Μέγιστα υπόλοιπα σημείων εδάφους	X [m]	0.051	0.048
	Y [m]	0.037	0.045
	Z [m]	0.094	0.094
Τυπική απόκλιση	X [m]	0.027	0.031
	Y [m]	0.024	0.027
	Z [m]	0.020	0.021
σ_0	-	1.1	1.1

Πίνακας 4-7: Πτήση ελέγχου κλίμακας 1:4000

EL5000	Μονάδες	Βαθμονόμ. Oberkochen	Βαθμον. Jena
RMS Control Points	X [m]	0.052	0.055
	Y [m]	0.048	0.050
	Z [m]	0.105	0.076
Μέγιστα υπόλοιπα σημείων εδάφους	X [m]	0.165	0.139
	Y [m]	0.126	0.136
	Z [m]	0.218	0.183
Τυπική απόκλιση	X [m]	0.013	0.016
	Y [m]	0.017	0.020
	Z [m]	0.012	0.013
σ_0	-	1.1	1.3

Πίνακας 4-8: Πτήση ελέγχου κλίμακας 1:5000

EL10000	Μονάδες	Βαθμονόμ. Oberkochen	Βαθμον. Jena
RMS Control Points	X [m]	0.049	0.040
	Y [m]	0.048	0.042
	Z [m]	0.070	0.043
Μέγιστα υπόλοιπα σημείων εδάφους	X [m]	0.118	0.090
	Y [m]	0.123	0.115
	Z [m]	0.159	0.107
Τυπική απόκλιση	X [m]	0.023	0.026
	Y [m]	0.030	0.033
	Z [m]	0.014	0.016
σ_0	-	1.4	1.6

Πίνακας 4-9: Πτήση ελέγχου κλίμακας 1:10000

Υπάρχει μία ακόμη υπολογιστική διαδικασία που πρέπει να γίνει στο σύστημα, εξαιτίας των πολλαπλών κεφαλών. Είναι ο σχετικός προσανατολισμός των κεφαλών μεταξύ τους. Στη βιβλιογραφία, αλλά και από την εταιρία παραγωγής αναφέρεται ως *platform calibration*. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την αναδόμηση της συνολικής εικόνας από τις υπό-εικόνες. Εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται μηχανικά μέρη σε εξαιρετικά δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, όπως μια πτήση που δεν μπορεί να θεωρηθεί τελείως σταθερή, η *DMC* είναι σχεδιασμένη να δέχεται κάποιες γωνιακές μετατοπίσεις των κεφαλών μεταξύ τους. Αυτές οι μετατοπίσεις είναι διαφορετικές για κάθε πτήση και πρέπει να υπολογίζονται κάθε φορά από τα δεδομένα κάθε πτήσης. Αυτού του είδους η βαθμονόμηση (*on-the-fly*) βασίζεται στην μέτρηση σημείων σύνδεσης (*tie points*) στις επικαλυπτόμενες περιοχές των παγχρωματικών εικόνων. Τα σημεία αυτά, βεβαίως, εντοπίζονται αυτόματα και η όλη διαδικασία είναι επίσης αυτόματη μέσω της τεχνικής *image matching*. Η ακριβής γνώση των σχετικών θέσεων των κεφαλών μεταξύ τους θα προσδιοριστεί, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της προηγούμενης βαθμονόμησης όπως περιγράφηκαν παραπάνω, οι οποίες και αποτελούν σημαντικά δεδομένα. Η βαθμονόμηση επιλύεται πάλι με την προσέγγιση της συνόρθωσης δέσμης, όπου υπολογίζονται οι τρεις στροφές στο χώρο και μία εστιακή απόσταση για τρεις φακούς σε σχέση με ένα φακό αναφοράς. Όπως αναφέρει ο *Dorstel* (2003) περίπου 30-50 σημεία σύνδεσης είναι αρκετά για να υπολογιστούν οι άγνωστες παράμετροι. Η τυπική ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι από 1/12 έως 1/6 του pixel.

4.8.3 Ultracam_D (Vexcel - Microsoft)

Ο σχεδιασμός της μηχανής *Ultracam_D* βασίζεται στη χρήση εννέα παράλληλων αισθητήρων *CCD* (4K x 2.7k pixel ο καθένας). Η μηχανή παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-21, όπου φαίνονται και οι διαφορετικοί κώνοι. Τέσσερις οπτικοί κώνοι (τοποθετημένοι σε γραμμή), παρέχουν τις υψηλής ανάλυσης παγχρωματικές εικόνες και οι άλλοι τέσσερις κώνοι στις γωνίες καταγράφουν πολυφασματικά δεδομένα. Κάθε παγχρωματικός φακός έχει το ίδιο πεδίο θέασης, αλλά τα *CCD* είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις μέσα σε κάθε εστιακό επίπεδο. Έτσι, μια διαδικασία συγκόλλησης είναι απαραίτητη για την απόκτηση μιας συνολικής εικόνας από τις επί μέρους μικρότερες. Οι παγχρωματικοί φακοί απεικονίζουν το αντικείμενο σε εννέα διαφορετικά *CCD*, τα οποία είναι χωρισμένα στους τέσσερις διαφορετικούς κώνους και καταλήγουν σε μία εικόνα μεγάλου εύρους (*large format image*) μεγέθους περίπου 11500 x 7500 pixel.

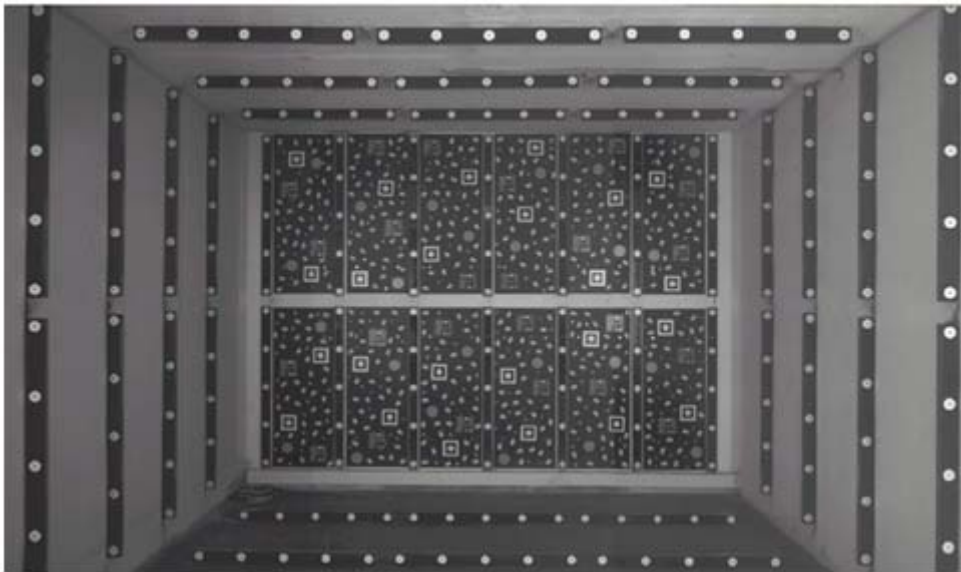


Εικόνα 4-21: Η μηχανή *Ultracam_D* της *Vexcel* και η αποκτώμενη εικόνα

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης των εικόνων, ο ένας κώνος είναι πρωτεύον για να καθοριστεί το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας. Οι άλλες εικόνες, συρράπτονται με λογισμικό ως μέρη υπό-εικόνας, μέσω του συστήματος αναφοράς του πρωτεύοντος κώνου. Από τη στιγμή που οι άλλοι κώνοι είναι μετακινημένοι σε σχέση με τον πρωτεύοντα, οι ανεξάρτητοι αυτοί κώνοι φωτογραφίζουν με συγκεκριμένο χρόνο καθυστέρησης, ο ένας από

τον άλλο, για να υπάρχει ένα μοναδικό φυσικό προβολικό κέντρο για τις τέσσερις διαφορετικές παγχρωματικές εικόνες. Αυτή η μέθοδος λήψης εικόνων ονομάζεται συντοπική (*syntopic*) καταγραφή εικόνων, σε αντίθεση με την πιο γνωστή σύγχρονη (*synchronous*), όπου όλοι οι φακοί φωτογραφίζουν ταυτόχρονα, όπως για παράδειγμα στην *DMC*. Η χρονοκαθυστέρηση μεταξύ των υπό-εικόνων εξαρτάται από την ταχύτητα πτήσης του αεροσκάφους. Αφού οι κώνοι είναι μετακινημένοι κατά 7cm, η καταγραφή πρέπει να έχει μια καθυστέρηση 0.001sec, όταν η ταχύτητα του αεροσκάφους είναι 70m/sec (252km/h).

Η εργαστηριακή βαθμονόμηση της μεγάλου εύρους (*large format*) ψηφιακής μηχανής *Ultracam_D* της *Vexcel*, είναι παρόμοια με την τυπική βαθμονόμηση των επίγειων μηχανών με πεδίο ελέγχου και την εργαστηριακή βαθμονόμηση της *DSS*. Ένα τρισδιάστατο πεδίο ελέγχου (Εικόνα 4-22) με 240 σημεία – στόχους με γνωστές συντεταγμένες καταγράφεται από τρεις διαφορετικούς σταθμούς με περιστραμμένες και συγκλίνουσες θέσης μηχανής.



Εικόνα 4-22: Επίγειο πεδίο ελέγχου για βαθμονόμηση της *Ultracam_D*

Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό συνόρθωσης δέσμης, υπολογίζονται οι παράμετροι βαθμονόμησης με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, όπου λαμβάνονται 84 εικόνες για κάθε ξεχωριστή κεφαλή μηχανής. Για κάθε κώνο η εστιακή απόσταση, το πρωτεύον σημείο, και οι διαστροφές υπολογίζονται ως σχετικές παράμετροι. Παράλληλα, υπολογίζονται η μετατόπιση, η κλίμακα, η αφινική παραμόρφωση (*shear*) και οι προοπτικές διαστροφές για κάθε *CCD*. Οι σχετικοί προσανατολισμοί μεταξύ των κεφαλών εκτιμώνται για έλεγχο πιθανής εκτροπής των οπτικών στοιχείων από την καθορισμένη εργοστασιακή τοποθέτηση. Από τη στιγμή που ο προσανατολισμός μεταξύ του πρωτεύοντος κώνου και των τριών άλλων θεωρείται μεταβλητός, οι παράμετροι μετασχηματισμού υπολογίζονται για κάθε εικόνα ξεχωριστά από τα δεδομένα που αποκτώνται από κάθε πτήση. Αυτό είναι σημαντικό για την συγκόλληση των εικόνων μεταξύ τους, σε μία συνολική εικόνα μεγάλου φορμάτ από τις πολλαπλές κεφαλές. Μέσω αυτής της διαδικασίας έχουν ήδη υπολογιστεί οι παράμετροι της διαστροφής και έτσι δημιουργείται (θεωρητικά) μια συνολική εικόνα χωρίς διαστροφές. Οι υπολογισμένες παράμετροι αξιολογούνται και από βαθμονόμηση με πτήση, ως ένα δεύτερο βήμα. Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε ένα εκτενές πιστοποιητικό βαθμονόμησης μαζί με τη ραδιομετρική βαθμονόμηση, παρατηρήσεις για τους φακούς, βαθμονόμηση των ηλεκτρονικών αισθητήρων και βαθμονόμηση του φωτοφράκτη του διαφράγματος.

4.8.4 Leica ADS40

Αντίθετα με τις μηχανές που βασίζονται σε *frame* (απλών ή πολλαπλών κεφαλών) και περιγράφηκαν μέχρι τώρα, πολλαπλές γραμμές γραμμικών *CCD* χρησιμοποιούνται στην *Leica ADS40*. Η ανάπτυξη του αισθητήρα της *ADS40*, οδηγήθηκε από την εμπειρία των

ψηφιακών εναέριων συστημάτων σάρωσης γραμμών του *DLR*, που λέγονται *WAOSS/WAAC* συστήματα μηχανής και σχεδιάστηκαν το 1996 για την αποστολή στον πλανήτη Άρη και υιοθετήθηκαν για χρήση από αεροσκάφος μετά την αποτυχία τους να χρησιμοποιηθούν για την αρχική τους αποστολή. Τα πρώτα τεστ με τα μοντέλα της *ADS* ξεκίνησαν το 1997 και η επίσημη παρουσίαση του προϊόντος έγινε στο συνέδριο *ISPRS 2000* στο Άμστερνταμ. Το σύστημα καταγραφής αποτελείται από δέκα γραμμές *CCD* με διαφορετικές γωνίες θέασης και διαφορετική πολυφασματική ευαισθησία. Κάθε γραμμή παρέχει 12000 pixel με μέγεθος εικονοστοιχείου $6.5 \times 6.5 \mu\text{m}^2$. Το σύστημα της μηχανής και η εγκατάσταση του σε αεροσκάφος για μια δοκιμαστική πτήση φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 4-23 και Εικόνα 4-24 αντίστοιχα:



Εικόνα 4-23: ADS40



Εικόνα 4-24: ADS40 σε αεροσκάφος

Κατά τη βαθμονόμηση καθορίζονται οι θέσεις των pixel κάθε γραμμής. Η ονοματολογία των διαφορετικών γραμμών *CCD* είναι όπως παρακάτω:

Παγχρωματική εμπρός (*PANF*), ναδίρ (*PANN*) και όπισθεν (*PANB*) γραμμή, πολυφασματική εμπρός (*red REDF*, *green GRNF*, *blue BLUF*) και όπισθεν (*near-infrared NIRB*) γραμμή. Η ονοματολογία των γραμμών συμπληρώνεται προσθέτοντας τη γωνία θέασης στην κατεύθυνση του ναδίρ, με την απαραίτητη στρογγυλοποίηση των αριθμών που αντιπροσωπεύουν την κάθε γωνία θέασης. Για παράδειγμα το 28 αντιστοιχεί στην 28.4° γωνία μεταξύ ναδίρ και εμπρός κατεύθυνσης των καναλιών *PANF* – η ονομασία που προκύπτει είναι ο *PANF28*. Οι άλλες γωνίες θέασης είναι 14.2° για τις πίσω *PAN* γραμμές, 16.1° για τις *RGB* εμπρός γραμμές και 2.0° για την *NIR* όπισθεν *PAN* γραμμή του *CCD*, διαμορφώνοντας του κωδικούς αριθμούς 14, 16, 02 να συμπληρώνουν την ονομασία των γραμμικών *CCD*. Από τη στιγμή που κάθε *PAN* κανάλι αποτελείται από δύο ανεξάρτητες γραμμές, μετατοπισμένες κατά μισό *pixel* (λέγονται και κλιμακωτοί πίνακες – *staggered arrays*), αυτές οι δύο γραμμές διαχωρίζονται χρησιμοποιώντας τον χαρακτήρα A για την πρώτη και B για τη δεύτερη. Για λόγους πληρότητας πρέπει να αναφερθεί ότι η *ADS* διατίθεται και με διαφορετική διαμόρφωση του *CCD* στο εστιακό επίπεδο, δηλαδή οι κλιμακωτές γραμμές του ναδίρ και οι εμπρός *RGB* γραμμές εναλλάσσονται.

Η εργαστηριακή βαθμονόμηση της *ADS* βασίζεται στο κωδικοποιημένο κατακόρυφο γωνιόμετρο (*coded vertical goniometer – CVG*) που διατίθεται από την *SwissOptic* (εταιρεία της *Leica Geosystems*). Το *CVG* αναπτύχθηκε από ένα τροποποιημένο ηλεκτρονικό κατακόρυφο γωνιόμετρο (*EVG*), όπου ο φωτοπολλαπλασιαστής αντικαθίσταται από μια ψηφιακή *CCD – frame camera* και η γυάλινη πλάκα αναφοράς αντικαθίσταται από ειδική κωδικοποιημένη γυάλινη πλάκα. Οι κωδικοποιημένοι στόχοι είναι τοποθετημένοι στις δύο διαγωνίους και στις δύο γραμμές, την κάθετη και την οριζόντια. Η απόσταση μεταξύ γειτονικών στόχων είναι 10mm. Η μέτρηση γίνεται αυτόματα με μεγάλη ακρίβεια. Από τις μετρημένες αντίστοιχες γωνίες του αντικειμένου αποκτώνται η βαθμονομημένη εστιακή

απόσταση και η εξίσωση της διαστροφής. Οι κώνοι των φακών και το εστιακό επίπεδο του CCD βαθμονομούνται αρχικά ξεχωριστά. Στη συνέχεια συναρμολογούνται και τα δύο και βαθμονομούνται μαζί χρησιμοποιώντας το CVG. Σε αυτή την περίπτωση η γυάλινη κωδικοποιημένη πλάκα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλέον, αφού τα CCD τοποθετούνται στο εστιακό επίπεδο. Έτσι, προβάλλεται ένας κωδικοποιημένος στόχος με αντίστροφη κατεύθυνση στη γραμμή του CCD των υπό δοκιμή φακών. Για να επιτραπούν μετρήσεις σε διευθύνσεις εκτός ναδίρ, ένας επιπρόσθετος καθρέπτης είναι τοποθετημένος στο πάνω μέρος του γωνιομέτρου. Με αυτή τη μετατροπή κάθε μία θέση pixel του εστιακού επιπέδου μπορεί να διευθυνσιοδοτηθεί. Όπως γράφουν οι Schuster & Braunecker (2000) αρκεί να μετρηθούν pixel κάθε $2^\circ - 5^\circ$ εντός της γωνίας θέασης. Οι τιμές των ενδιάμεσων pixel βρίσκονται με αριθμητική παρεμβολή.

Παρόλο που υπάρχει η ολοκληρωμένη διαδικασία εργαστηριακής βαθμονόμησης, έχει εισαχθεί μία νέα προσέγγιση πρόσφατα για τη βαθμονόμηση της ADS. Η προσέγγιση του πεδίου ελέγχου, βασίζεται στην αυτοβαθμονόμηση η οποία είναι μία προσέγγιση βαθμονόμησης για όλα τα συστήματα που εμπλέκονται στη φωτογράφιση. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να προστεθεί και το αδρανειακό σύστημα μέτρησης (IMU), το οποίο είναι απαραίτητο για την επιχειρησιακή χρησιμοποίηση των δεδομένων των εναέριων σαρωτών γραμμών. Ο απαραίτητος σχετικός προσανατολισμός μεταξύ του σώματος του IMU και του σώματος της μηχανής ADS μπορεί να γίνει μόνο με αυτοβαθμονόμηση και η διαδικασία δίνεται από τους Tempelmann et al (2003) και σε συντομία παρακάτω.

Οι συντελεστές του Brown χρησιμοποιούνται ως παράμετροι βαθμονόμησης. Παράλληλα με αυτούς, χρησιμοποιούνται τρεις επιπλέον συντελεστές για να μοντελοποιήσουν την εκτροπή των στροφών. Παρόλο που στην ADS οι εικόνες αποτελούνται από γραμμές αντί για το κλασικό καρέ, πολύ από τους συντελεστές του Brown μεταφέρονται απ' ευθείας. Πολλές από τις παραμέτρους του Brown που μοντελοποιούν την επιπεδότητα δεν είναι χρήσιμοι. Έτσι όμως υπάρχουν κάποια εναπομένοντα σφάλματα που πρέπει να μοντελοποιηθούν από επιπρόσθετα πολυώνυμα. Σύμφωνα με τον Tempelmann (2003) ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού είναι αρκετό και εφαρμόζεται για τις συντεταγμένες κατά X και κατά Y σε κάθε γραμμή του αισθητήρα.

Εξαιτίας της μεγάλης συµμεταβλητότητας κάποιων παραμέτρων βαθμονόμησης και παραμέτρων εξωτερικού προσανατολισμού, το block των εικόνων θα πρέπει να αποτελείται από δύο γραμμές πτήσης που σχηματίζουν σταυρό, με κάθε γραμμή να έχει γίνει και στις δύο κατευθύνσεις. Αρχικά αυτός ο τρόπος είναι αρκετός για να εκτιμηθούν όλες οι παράμετροι (ακόμη και χωρίς φωτοσταθερά), εκτός από την εστιακή απόσταση. Για να υπολογιστεί και αυτή η παράμετρος, η γνώση της κλίμακας είναι απαραίτητη, και μπορεί να αποκτηθεί εισάγοντας επίγειο έλεγχο (φωτοσταθερά). Εναλλακτικά το ίδιο μπλοκ θα μπορούσε να είχε ληφθεί από διαφορετικό ύψος πτήσης, έχοντας έτσι δύο εικόνες διαφορετικής κλίμακας. Αφού και τα δύο μπλοκ συνδέονται με σημεία σύνδεσης (tie points), το γεγονός αυτό όχι μόνο επιτρέπει τη βαθμονόμηση χωρίς επίγεια σημεία ελέγχου, αλλά επίσης πλεονεκτεί για την ισχυρή γεωμετρία του μπλοκ, του οποίου τα αποτελέσματα είναι πολύ αξιόπιστες παράμετροι βαθμονόμησης. Έτσι, αυτός ο διπλός σταυρός είναι το ενδεικνυόμενο σχέδιο για πτήση βαθμονόμησης.

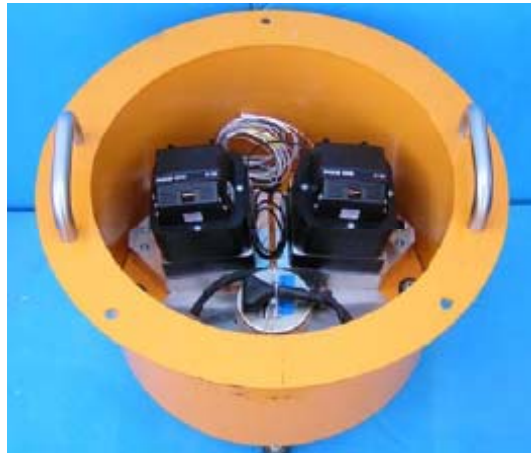
Πρακτικοί έλεγχοι έχουν δείξει, ότι με βάση αυτή τη διαδικασία αυτοβαθμονόμησης επιτυγχάνεται ακρίβεια 2.5-2.9 μm για όλα τα συστήματα ADS, η οποία είναι και η αναμενόμενη ακρίβεια που μπορεί να δώσει η αυτόματη ταύτιση των σημείων σύνδεσης. Η τάση αυτή τη στιγμή είναι οι παράμετροι της βαθμονόμησης να λαμβάνονται από την αυτοβαθμονόμηση αφού είναι σημαντικό να βαθμονομείται το σύστημα των φακών μαζί με το αδρανειακό σύστημα και το GPS. Πιθανότατα η εργαστηριακή βαθμονόμηση της ADS40 να εκλείψει στο μέλλον.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης περιλαμβάνονται σε ένα πιστοποιητικό βαθμονόμησης 5 σελίδων. Εκεί αναγράφονται ξεχωριστά οι βαθμονομήσεις του κάθε μέρους του συστήματος και ένα περίγραμμα της πτήσης με τα χρησιμοποιούμενα σημεία σύνδεσης. Επίσης αναγράφονται οι διαφορές των εκτροπών των γωνιών όπως αυτές βαθμονομήθηκαν, αλλά τα υπόλοιπα αποτελέσματα της γεωμετρικής βαθμονόμησης (π.χ. βαθμονομημένες

συντεταγμένες x , y όλων των pixel όλων των γραμμών των αισθητήρων) δεν αναφέρονται αναλυτικά, αλλά επισυνάπτονται σε ένα ψηφιακό αρχείο το οποίο και συνοδεύει το πιστοποιητικό.

4.8.5 DIMAC (Dimac Systems)

Η μηχανή *DIMAC* της *Dimac Systems*, είναι μια ψηφιακή μηχανή πλαισίου (*frame based*) με ένα ευέλικτο συνδυασμό έως και τεσσάρων ανεξάρτητων κεφαλών. Η συγκεκριμένη μηχανή δεν ελέγχεται με εργαστηριακή βαθμονόμηση. Η βαθμονόμηση γίνεται αποκλειστικά από δεδομένα αεροφωτογράφισης. Αντιθέτως με την *DMC* και την *Ultracam_D*, οι εικόνες των διαφορετικών κεφαλών παραμένουν ανεξάρτητες χωρίς την συγχώνευσή τους σε μία μεγαλύτερη συνολική - εικονική φωτογραφία κατά την μεταεπεξεργασία.



Εικόνα 4-25: Η ψηφιακή μηχανή DIMAC

5. ΠΕΔΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανασκόπηση της κυριότερης διεθνούς βιβλιογραφίας, που αναφέρεται στα πεδία ελέγχου και τις προδιαγραφές τους, που υπάρχουν διεθνώς για την εξυπηρέτηση διαφόρων φωτογραμμετρικών αναγκών και ιδιαίτερα της βαθμονόμησης των μηχανών αεροφωτογράφισης. Αν και ο σκοπός ίδρυσης και χρήσης τους, σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να διαφοροποιείται από τους σκοπούς του πεδίου που ιδρύθηκε για την παρούσα εργασία, εν τούτοις τα στοιχεία που βρέθηκαν για αυτά είναι σημαντικά και συνεκτιμήθηκαν για την οριστικοποίηση των προδιαγραφών του πεδίου που ιδρύθηκε. Για παράδειγμα δεν μπορούσαν να αγνοηθούν οι προδιαγραφές των στόχων ενός πεδίου ελέγχου, που ιδρύθηκε για την αποκατάσταση των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων, από τη στιγμή που αυτό αφορά όχι μόνο την παρούσα, αλλά και κάθε (σχεδόν) φωτογραμμετρική εργασία. Το υλικό, κείμενο και εικόνες, ειδικά για το κεφάλαιο αυτό, προέρχεται αποκλειστικά από τις αντίστοιχα αναφερόμενες στην αρχή κάθε ενότητας πηγές-άρθρα.

5.1 Ανασκόπηση Υπαρχόντων Πεδίων Ελέγχου

Στις δεκαετίες του '70 και του '80, χρησιμοποιήθηκαν αρκετά πεδία ελέγχου για την βαθμονόμηση των αναλογικών φωτογραφικών μηχανών (Salmenperä, 1972; Merchant, 1974; Kupfer, 1975; Brown, 1976; Kilpelä, 1981; Waldhäusl, 1986). Τα αποτελέσματα από αυτές τις δοκιμές αλλά και άλλες παρόμοιες, αποτέλεσαν τη βάση για τις σύγχρονες μεθόδους αυτοβαθμονόμησης. Διεθνείς έρευνες επάνω στο ψηφιακό αεροτριγωνισμό (Jaakkola και Sarjakoski, 1996), την αυτόματη εξαγωγή σημείων σύνδεσης (Heipke και Eder, 1998) και τον αεροτριγωνισμό μαζί με μετρήσεις *GPS/IMU* (Heipke et al, 2002b) είχαν μεγάλη πρακτική σημασία και επηρέασαν σημαντικά την χρήση των πεδίων για την πιστοποίηση και διακρίβωση των σύγχρονων αερομηχανών.

Στην ενότητα που ακολουθεί θα περιγραφούν εν συντομία μερικά από τα πεδία που έχουν δημιουργηθεί και λειτουργούν ανά τον κόσμο με έμφαση στην κατανομή, το σύνολο και την ακρίβεια των *GCP*.

5.1.1 Πεδία Ελέγχου Willunga, Kapunda, Jamijarvi

Στην εργασία αυτή (Kilpela, 1981) το κύριο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη σύγκριση των στοιχείων βαθμονόμησης, των πεδίων ελέγχου βαθμονόμησης και της αυτοβαθμονόμησης. Αν και ο σκοπός του δεν αφορά άμεσα τη βαθμονόμηση μιας αερομηχανής, παρουσιάζεται συνοπτικά γιατί σχετίζεται με τα σφάλματα συντεταγμένων που παρουσιάζονται και που θα επηρεάσουν και την παρούσα εργασία, ώστε να υπάρχει μια αίσθηση της συσχέτισής τους.

Τα συμπεράσματα εξήχθησαν πειραματικά, βασίζόμενα στην σχετική θεωρία, με τη συμμετοχή πολλών οργανισμών (*Institut fur Photogrammetrie, Universitat Bonn, FRG-Institut fur Photogrammetrie, Universitat Stuttgart, FRG- National Board of Survey, Helsinki, Finland etc*) και χρονολογούνται στη δεκαετία του '80.

Για τους σκοπούς της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα πεδία ελέγχου, που βρίσκονταν στην Αυστραλία και Φινλανδία. Σε όλα τα σημεία των πεδίων, που χρησιμοποιήθηκαν ως *control* ή *check points* στις φωτογραμμετρικές διαδικασίες, δόθηκαν συντεταγμένες από επίγειες γεωδαιτικές μετρήσεις. Οι συντεταγμένες αυτές μετατράπηκαν σε καρτεσιανό σύστημα.

Πεδίο Ελέγχου	Χώρα	Έκταση ^a (Km ²)	Μέγιστη Υψομετρική διαφορά (m)	Αριθμός σημείων ^b	Ακρίβεια (mm)	
					Οριζοντιογραφική	Υψομετρική
Willunga	Αυστραλία	5.8x5.8	130	96	25 ^c	30 ^c
Kapunda	Αυστραλία	24x24	300	43	40 ^c	40 ^c

Πεδίο Ελέγχου	Χώρα	Έκταση ^a (Km ²)	Μέγιστη Υψομετρική διαφορά (m)	Αριθμός σημείων ^b	Ακρίβεια (mm)	
					Οριζοντιογραφική	Υψομετρική
Jamijarvi (small)	Φινλανδία	0.8x0.8	25	180	5 ^d	0.6mm/Km
Jamijarvi (large)	Φινλανδία	2x2	60	121	3 ^d	0.6mm/Km

Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά πεδίων

a : Έκταση με σημεία γνωστών συντεταγμένων

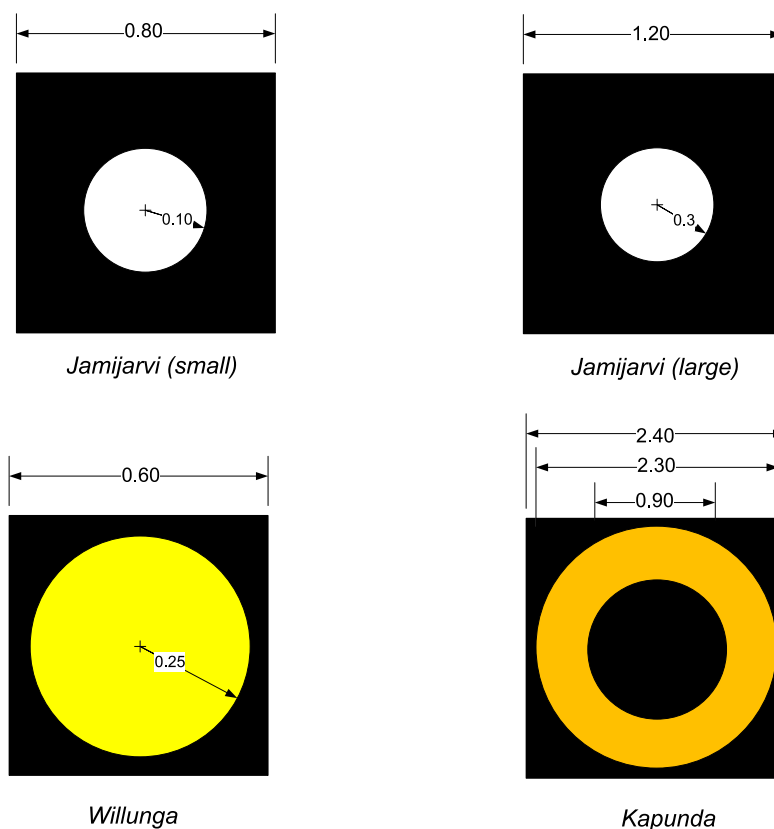
b : Αριθμός σημείων γνωστών συντεταγμένων

c : Μέσο τυπικό σφάλμα μιας συντεταγμένης

d : Μέγιστο τυπικό σφάλμα μιας συντεταγμένης

Επιπρόσθετα στα σημεία γνωστών συντεταγμένων, στα πεδία ελέγχου *Jamijarvi (large)*, *Willunga* και *Karunda*, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον 100, 28 και 70 σημεία αντίστοιχα, των οποίων δεν υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες. Συνέπεια αυτού, ήταν να μεγαλώσει η έκταση των πεδίων κατά 2.6x2.6, 3x3 και 40x40 Km², αντίστοιχα. Ωστόσο όλων των ειδών τα σημεία επισημάνθηκαν με στόχους όπως στο Σχήμα 5-1 που ακολουθεί, των οποίων οι διαστάσεις, ο χρωματισμός και το είδος τους ποικίλλει, συναρτήσει της κλίμακας φωτογράφισης.

Το πεδίο ελέγχου *Jamijarvi (small)* χρησιμοποιήθηκε για φωτογραφίες κλίμακας 1:4000. Το πεδίο *Jamijarvi (large)* για φωτογραφίες 1:8000 και σε κάποιες περιπτώσεις σε 1:4000. Απ' την άλλη, το πεδίο *Willunga* για 1:12000 και τέλος το *Karunda* για φωτογραφίες 1:50000. Οι κάμερες φωτογράφισης ήταν οι *RMK A2* και η *MRB*.



Σχήμα 5-1: Τύποι στόχων, χρησιμοποιούμενοι στα πεδία ελέγχου

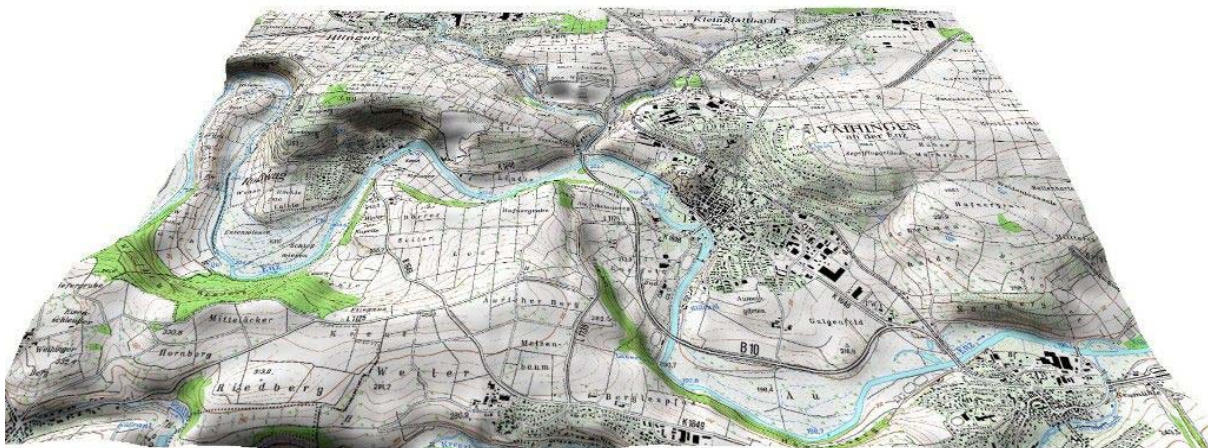
Από την πληθώρα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων δίνεται βαρύτητα μόνο σε κάποια από αυτά, που ενδεχομένως πρέπει να ληφθούν υπ' όψη, καθώς αφορούν και την παρούσα εργασία, σχετικά με την αποκατάσταση των εικονοσυντεταγμένων που θα μετρηθούν και χρησιμοποιηθούν:

- Σε μπλοκ με 60% κατά μήκος επικάλυψη, η οριζοντιογραφική ακρίβεια εξαρτάται σε μικρό βαθμό από το πρότυπο των σημείων. Η σχέση που συνδέει τα δυο αυτά χαρακτηριστικά, είναι ότι όσο πιο μικρό είναι το σημείο τόσο μεγαλύτερη είναι η επιτευχθείσα ακρίβεια. Με 20% επικάλυψη, η αποκατάσταση των σφαλμάτων των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων, είναι αποτελεσματική σε μεμονωμένα μπλοκ, αλλά δεν φτάνει την αντίστοιχη ακρίβεια των πυκνών μπλοκ.
- Τα αποτελέσματα φωτογράφισης των πεδίων ελέγχου σε κλίμακα 1:8000, έδωσαν λίγο καλύτερα αποτελέσματα από αυτά με τις φωτογραφίες κλίμακας 1:4000, δείχνοντας την επίδραση της κλίμακας στην διόρθωση σφαλμάτων των εικονοσυντεταγμένων.
- Η μέθοδος της αυτοβαθμονόμησης, έδωσε καλύτερα αποτελέσματα ακρίβειας, από την χρήση του πεδίου βαθμονόμησης.
- Σχετικά με το ίδιο το πεδίο, το σημαντικότερο εύρημα της εργασίας, ήταν το συμπέρασμα για την ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων σημείων. Η μεταβολή τους από 25 έως 180, έδωσε αποτελέσματα ακρίβειας με μικρές διαφορές μεταξύ τους, το οποίο είναι πολύ σημαντικό από την άποψη της οικονομικότητας.

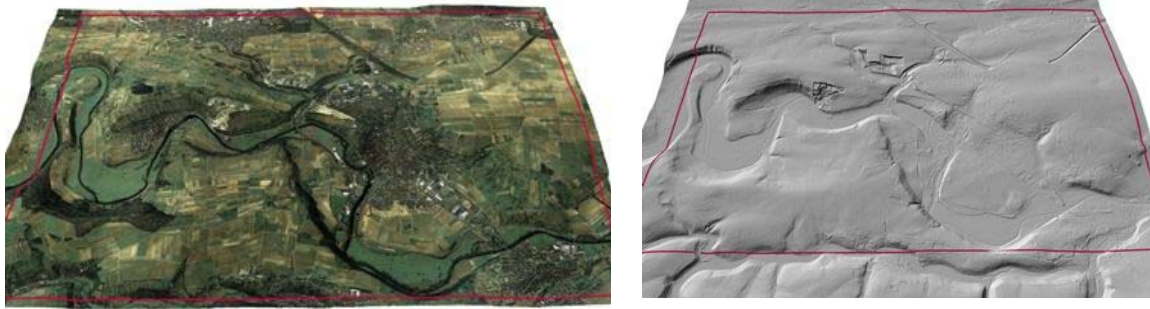
5.1.2 Πεδίο ελέγχου Vaihingen/Enz

Πρόκειται για ένα πεδίο ελέγχου του ινστιτούτου φωτογραμμετρίας του πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης (*Institut für Photogrammetrie / Universität Stuttgart*), από όπου προέρχονται και οι ακόλουθες πληροφορίες. Ιδρύθηκε το καλοκαίρι του 1995, για την εκτέλεση γεωμετρικών ελέγχων και αποδοχής ακρίβειας αερομεταφερόμενων ψηφιακών συστημάτων. Συγκεκριμένα ελέγχθηκε η γεωμετρική απόδοση του ψηφιακού συστήματος *Digital Photogrammetry Assembly (DPA)* καθώς και οι ψηφιακοί γραμμικοί σαρωτές *WAAC* και *HRSC* της *DLR*. Ξεκινώντας από αυτό, χρησιμοποιήθηκε για αρκετούς τύπους ερευνών, που μεταξύ άλλων αφορούσαν: Την ανεξάρτητη αξιολόγηση πτήσεων των νέων ψηφιακών αερομεταφερόμενων δεκτών (*ADS40*, *DiGICam-K14* και *DMC*), καθώς επίσης και έρευνες σχετικά με τη γεωαναφορά εικόνων από συνδυασμένη χρήση τυπικών αναλογικών μηχανών και *GPS/INS*. Το πεδίο αυτό βρίσκεται 20 km νοτιοδυτικά της Στουτγκάρδης σε μια λοφώδη έκταση, που διαθέτει αρκετούς τύπους βλάστησης και περιοχές μικρών δασών καθώς επίσης και χωριών.

Η έκταση της περιοχής είναι περίπου 7.5(EW) x 4.7(NS) km² και απεικονίζεται στην Εικόνα 5-1. Το διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της εν λόγω περιοχής, αποκτήθηκε με αερομεταφερόμενο δέκτη *LiDAR*. Η απόκτηση των δεδομένων έγινε το Φεβρουάριο του 2001, με χρήση του συστήματος *Optech ALTM 1225* (ύψος πτήσης: 900m, συχνότητα σάρωσης 25Hz). Το τελικό *DTM* ήταν διαθέσιμο με βήμα κανάβου 1m. Η υψομετρική ακρίβεια, ήταν καλύτερη των 50 cm. Τα υψόμετρα ποικίλλουν στη περιοχή, μεταξύ 193m και 356m, πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας.



Εικόνα 5-1: Απεικόνιση περιοχής



Εικόνα 5-2: Ορθοφωτογραφία και σκίαση αναγλύφου περιοχής

Αν και ο αριθμός των επίγειων σημείων γνωστών συντεταγμένων (*ground control points*) ποικίλλει λίγο κατά τη διάρκεια των διαφορετικών -ανάλογα με το σκοπό- πτήσεων ελέγχου, οι κύριες θέσεις τους παραμένουν αμετάβλητες. Τα σημεία αυτά τοποθετήθηκαν, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πτήση με αναλογικές μηχανές με ευρυγώνιους φακούς, σε μεσαίες κλίμακες (1:13.000) και 60% επικάλυψη. Η κατανομή των σημείων είναι πιο πυκνή στο κεντρικό τμήμα της περιοχής (Εικόνα 5-3), λαμβάνοντας έτσι υπ' όψη τους ελέγχους υψηλής ανάλυσης και μεγάλης κλίμακας, καλύπτοντας μια έκταση περίπου 5 km(EW) x 2.8 Km(NS).



Εικόνα 5-3: Οριοθέτηση συνολικής περιοχής (κόκκινο περίγραμμα) – Πύκνωση σημείων (μωβ περίγραμμα)

Τα σημεία είναι κυρίως βαμμένοι στόχοι, οι συντεταγμένες των οποίων έχουν υπολογιστεί με μετρήσεις *GPS* στατικού προσδιορισμού θέσης και με ακρίβεια της τάξης των 2 cm για όλες τις διαστάσεις (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά). Σχεδόν 200 σημεία (Πίνακας 5-2) είναι συνολικά διαθέσιμα σε ολόκληρο το πεδίο ελέγχου. Στην περιοχή πύκνωσης των σημείων, οι στόχοι είναι τετράγωνα διαστάσεων 0.3m x 0.3m χρώματος μαύρου, εντός άσπρου τετραγώνου διαστάσεων 0.6m x 0.6m (Εικόνα 5-4).



Εικόνα 5-4: Χρησιμοποιούμενα επίγεια σημεία

#	Point size	# of points	distribution of points
1	signalized/painted squares 0.6m x 0.6m	172	whole test site
2	signalized/painted squares 0.3m x 0.3m	103	densified region only

Πίνακας 5-2: Αριθμός στόχων ανά είδος

Επιπρόσθετα έχει προετοιμαστεί ένας κινητός στόχος (*Siemens star*), για τον έλεγχο της ραδιομετρικής ανάλυσης, που τοποθετείται μόνο εάν ο σκοπός της πτήσης αποβλέπει σε κάτι τέτοιο. Ο στόχος αυτός, έχει διάμετρο 8 μέτρων και αποτελείται από 12 λευκά/μαύρα τμήματα (Εικόνα 5-5).



Εικόνα 5-5: Κινητός στόχος ραδιομετρικής βαθμονόμησης

5.1.3 Πεδίο ελέγχου Fredrikstad

Ο ευρωπαϊκός οργανισμός για την πειραματική φωτογραμμετρική έρευνα, (*European Organisation for Experimental Photogrammetric Research – OEEPE σημερινός EuroSDR*), ξεκίνησε ένα πείραμα, διερευνώντας τον συνολικό προσανατολισμό φωτογραφικού δέκτη με τη χρήση *GPS* και *IMU* (*inertial measurement unit*) σε σύγκριση και συνδυασμό με αεροτριγωνισμό (*Heipke, Jacobsen, Wegmann, Andersen, & Nilsen, 2000*).



Σχήμα 5-2: Πεδίο ελέγχου Fredrikstad

Για την επίτευξη των σκοπών του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε το πεδίο ελέγχου Fredrikstad. Αυτό βρίσκεται στη νότια Νορβηγία, κοντά στην πρωτεύουσα Όσλο. Καλύπτει

αστική, περιαστική και δασώδη περιοχή και είναι σχεδόν επίπεδο, με τις μέγιστες υψομετρικές διαφορές να κυμαίνονται στα 70m. Το μέγεθός του είναι περίπου 5 x 6 km² και διαθέτει 51 προσημασμένα σημεία γνωστών συντεταγμένων (*ground control points*) στο σύστημα *UTM/EUREF 89* και με το γεωμετρικό τους υψόμετρο με ακρίβεια καλύτερη των 0.01 m. Τα σημεία αυτά είναι μαύρα τετράγωνα διαστάσεων 60 x 60 cm² με λευκό τετράγωνο κέντρο διαστάσεων 40 x 40 cm², όπως στην Εικόνα 5-6. Οι στόχοι αυτοί είναι μόνιμα σημασμένοι με μπουλόνι πάνω σε πέτρινη επιφάνεια. Το πεδίο είναι εγκατεστημένο ήδη από το 1992 και συντηρείται από το *Department of Mapping Science* του Αγροτικού Πανεπιστημίου της Νορβηγίας.



Εικόνα 5-6: GCP στο πεδίο Fredrikstad

5.1.4 Πεδίο ελέγχου Sjökkulla

Η βαθμονόμηση των ψηφιακών φωτογραμμετρικών συστημάτων, είναι απαραίτητη για να χαρακτηρίσει τις επιδόσεις τους, για τη βελτίωσή τους και για να καθιστά τη χρήση τους ικανή να επιτύχει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Οι ραδιομετρικές, φασματικές, χωρικές και γεωμετρικές ιδιότητες των ψηφιακών συστημάτων απαιτούν επομένως βαθμονόμηση και ελέγχους, με μεθόδους και διαδικασίες που περιγράφονται στην αντίστοιχη εργασία στη συνέχεια (Honkavaara, 2008). Το Φινλανδικό Γεωδαιτικό Ινστιτούτο (*Finnish Geodetic Institute*) διατηρεί ένα μόνιμο πεδίο ελέγχου για γεωμετρική, ραδιομετρική και χωρικής ανάλυσης βαθμονόμηση και δοκιμές των υψηλής ευκρίνειας αερομεταφερόμενων και δορυφορικών συστημάτων συλλογής εικόνων στη πόλη *Sjökkulla* από το 1994. Τα ειδικά χαρακτηριστικά αυτού του πεδίου ελέγχου είναι οι στόχοι ανάκλασης από χαλίκι. Ακολουθεί μια περιγραφή του πεδίου ελέγχου *Sjökkulla*, που αφορά την κατασκευή και τις φασματικές του ιδιότητες, καθώς επίσης τους στόχους και τις μεθόδους για τον έλεγχο και τη βαθμονόμηση των φωτογραμμετρικών συστημάτων, περιλαμβάνοντας εκτός από ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και άλλα συστήματα όπως πχ *Lidar*.

Το πεδίο βρίσκεται σε μια αγροτική περιοχή με λίμνες, δάση και χωράφια στο *Sjökkulla*, κοντά στα γραφεία του *FGI* και στο αεροδρόμιο. Είναι γενικά επίπεδο, αφού τα ύψη στην περιοχή που χρησιμοποιείται για τη γεωμετρική βαθμονόμηση μεγάλης κλίμακας κυμαίνονται από 35 έως 60m. Ένα μέρος του αποτελεί πεδίο ελέγχου της ποιότητας της εικόνας, καθώς χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση και τον έλεγχο της ραδιομετρικής και χωρικής ανάλυσης. Ένα άλλο τμήμα του όμως, διαθέτει δίκτυο τοπογραφικά προσδιορισμένων σημείων, για τη βαθμονόμηση και έλεγχο της γεωμετρίας της μηχανής (αναφερόμενη στο συγκεκριμένο άρθρο, ως γεωμετρική βαθμονόμηση). Το μόνιμο πεδίο ελέγχου *Sjökkulla* μαζί με μερικούς συμπληρωματικούς φορητούς στόχους που διαθέτει, είναι ουσιαστικά ένα πρότυπο φωτογραμμετρικό πεδίο.

Στη Φινλανδία, οι εταιρείες παραγωγής δεδομένων τηλεπισκόπησης ήδη χρησιμοποιούν το πεδίο *Sjökkulla*, τακτικά για τη γεωμετρική βαθμονόμηση των συστημάτων τους. Η εθνική τοπογραφική υπηρεσία (*National Land Survey*) της Φινλανδίας προσδιορίζει από το 2002 τις

παραμέτρους του *boresight misalignment* και τον εσωτερικό προσανατολισμό των αναλογικών συστημάτων (μαζί με *GPS/IMU*) μια φορά ή δύο φορές το χρόνο στο πεδίο αυτό. Ακόμα και οι ιδιωτικές εταιρείες που χρησιμοποιούν μεγάλου *format* αναλογικές και ψηφιακές μηχανές βαθμονομούν και αυτές τα συστήματά τους στο πεδίο ελέγχου *Sjökulla*. Οι προμηθευτές δεδομένων που χρησιμοποιούν μικρότερου *format* αισθητήρες εκτελούν επίσης τις πτήσεις ελέγχου στο πεδίο αυτό, προκειμένου να χαρακτηρίσουν και να πιστοποιήσουν τα συστήματα και τα προϊόντα τους.

Η βαθμονόμηση των συστημάτων με χρήση πεδίου ελέγχου, έχει γίνει ένα κεντρικό κομμάτι της διαδικασίας αγοράς ψηφιακών φωτογραμμετρικών δεκτών από τις Φινλανδικές χαρτογραφικές επιχειρήσεις και γίνονται έτσι πολλές και εκτενείς εμπειρικές δοκιμές για να αξιολογηθεί η ποιότητα και η τεχνική απόδοση των αισθητήρων.

➤ Πεδίο ελέγχου της γεωμετρίας της μηχανής

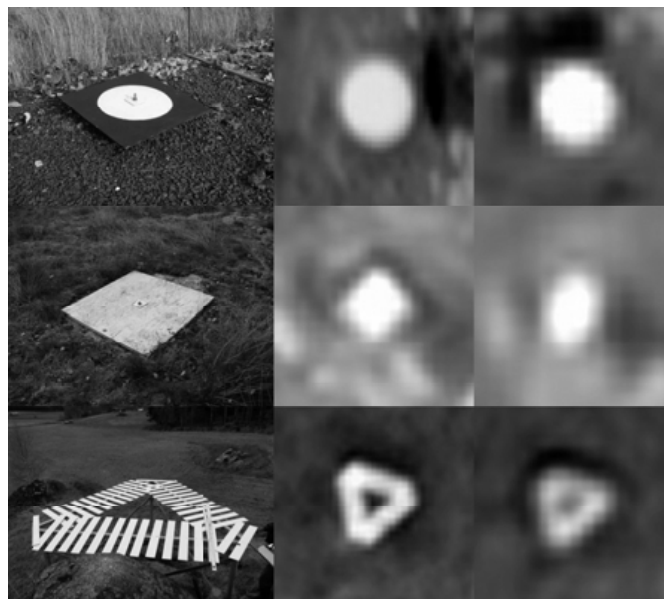
Το τμήμα του πεδίου, που αφορά τον γεωμετρικό έλεγχο των μηχανών, περιέχει συγκεκριμένα σημεία αναφοράς, για τη βαθμονόμηση σε μεγάλες, μεσαίες και μικρές κλίμακες. Τα σημεία αυτά μετρούνται με τη στατική μέθοδο μετρήσεων με *GPS*. Για τα σημεία αναφοράς της μεσαίας κλίμακας, οι μετρήσεις διήρκεσαν τουλάχιστον έξι ώρες, ενώ για εκείνα της μικρής κλίμακας μια ώρα, για να πέσουν στα 20 λεπτά, όταν επρόκειτο για τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλη κλίμακα.

Στο πεδίο μεγάλης κλίμακας, βρίσκονται 18 σημεία γνωστών συντεταγμένων σε βραχώδες υπόστρωμα ή μεγάλες πέτρες και σηματοδοτούνται με ένα μπουλόνι για την ακριβή κέντρωση, ενώ άλλα 26 σημεία συνδέονται με το έδαφος ή υφιστάμενες κατασκευές. Για τις μικρότερες κλίμακες, όλα τα σημεία είναι σε βραχώδες υπόστρωμα και με μπουλόνια.

Η εκτιμώμενη ακρίβεια (*RMSE*) των σημείων αναφοράς είναι 5 mm οριζοντιογραφικά και 10 mm στο υψόμετρο. Η τελική ακρίβεια ενός σημείου γνωστών συντεταγμένων (*GCP*) εξαρτάται από το είδος-στόχο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-4 παρακάτω.

Οι τρεις τύποι των στόχων (Εικόνα 5-7), που χρησιμοποιούνται σε όλη την έκταση του πεδίου, για τον έλεγχο της γεωμετρίας είναι:

- Κυκλικοί λευκοί στόχοι των 0,3 m και 0,4 m σε διάμετρο, βαμμένοι σε κόντρα πλακέ. Το φόντο είναι μαύρο.
- Τετράγωνοι λευκοί στόχοι του 1 m x 1 m κατασκευασμένοι από κόντρα πλακέ.
- Τριγωνικοί στόχοι, από στενά πλαίσια ξυλείας, με μήκος πλευράς 2.4 μ.



Εικόνα 5-7: Τύποι στόχων στο πεδίο ελέγχου *Sjökulla*

Στην προηγούμενη Εικόνα 5-7, απεικονίζεται το είδος των στόχων και η διαφορετική τους απεικόνιση, αναλόγως της επιλεγμένης εδαφοψηφίδας, που για τις δυο εικονιζόμενες περιπτώσεις, η κατάσταση έχει όπως αναγράφεται στον Πίνακα 5-3.

Είδος στόχου	Αριστερή εικόνα	Δεξιά Εικόνα
	Μέγεθος Εδαφοψηφίδας	
Κύκλος	5 εκ.	8 εκ.
Τετράγωνο	25 εκ.	50 εκ.
Τρίγωνο	25 εκ.	50 εκ.

Πίνακας 5-3: Μεγέθη εδαφοψηφίδας των στόχων της Εικόνας 5-7

Η κατανομή των σημείων και ο τύπος του στόχου, καθορίζουν την εφικτή εδαφοψηφίδα και την κλίμακα της εικόνας. Αναλυτικότερα:

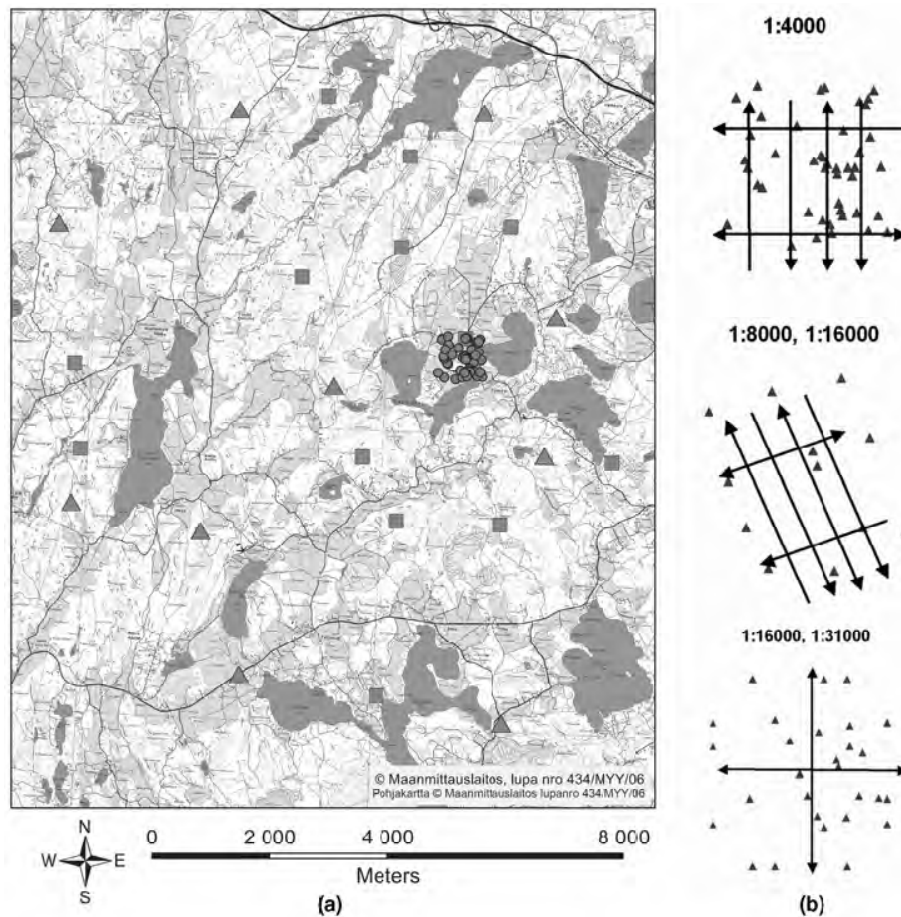
Κλίμακα	Έκταση (Km ²)	Εύρος κλίμακας	Ground Sample Distance (m)	Αριθμός GCP	Τύποι στόχων	Ακρίβεια (cm)
Μεγάλη	1 x 1	3000-4000	<0.1	44	42 κυκλικόι	$\sigma_x=\sigma_y=1.0,$ $\sigma_z=2.0$
					2 τετράγωνοι	
Μεσαία	4 x 5	8000-16000	<0.3	12	10 τετράγωνοι	$\sigma_x=\sigma_y=1.0,$ $\sigma_z=2.0$
					2 τριγωνικοί	$\sigma_x=\sigma_y=1.0,$ $\sigma_z=5.0$
Μικρή	10 x 10	16000-40000	<0.5	23	14 τετράγωνοι	$\sigma_x=\sigma_y=1.0,$ $\sigma_z=2.0$
					9 τριγωνικοί	$\sigma_x=\sigma_y=5.0,$ $\sigma_z=5.0$

Πίνακας 5-4: Συσχέτιση κλίμακας-φωτοσταθερών-ακρίβειας και είδους στόχων στο πεδίο ελέγχου Sjökkulla

Οι τριγωνικοί στόχοι είναι μόνιμες κατασκευές, ενώ οι κυκλικόι και τετράγωνοι, εγκαθίστανται στο πεδίο μόνο κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης. Η κατανομή των σημείων στο πεδίο, αναπαρίσταται με το αντίστοιχο σχήμα τους (κύκλοι, τετράγωνα, τρίγωνα) επί χάρτου στην Εικόνα 5-8 που ακολουθεί, όπου παράλληλα στα δεξιά εμφανίζεται ένα παράδειγμα δομής μοντέλων, αναλόγως της κλίμακας που εκτελείται η βαθμονόμηση.

Μια πιθανή βελτίωση του γεωμετρικού πεδίου ελέγχου *Sjökkulla*, είναι να αυξηθεί ο αριθμός των σημείων γνωστών συντεταγμένων. Τουλάχιστον 50 GCP σε κάθε κλίμακα είναι επιθυμητά. Μια ειδική δυσκολία έγκειται στην ίδρυση και μέτρηση σημείων για μεγάλες κλίμακες με μεγάλη ακρίβεια. Σε μεγάλες κλίμακες (πχ 1:4000), η ακρίβεια των κυκλικών στόχων στο σύστημα της εικόνας είναι 2.5 μm οριζοντιογραφικά. Αυτή η ακρίβεια θεωρείται για τα φωτοσταθερά επαρκής, για τους σκοπούς της βαθμονόμησης.

Στις πτήσεις πάνω από το συγκεκριμένο πεδίο, η ακρίβεια του καλύτερα προσδιοριζόμενου σημείου, έφτασε στο επίπεδο: «συντελεστής κλίμακας x 1.5 μm», οριζοντιογραφικά και 0.02% της απόστασης του αντικειμένου κατά την τρίτη διάσταση. Η ακρίβεια των σημείων ελέγχου (*check points*), θα πρέπει να είναι το 1/3 της προηγούμενης ή καλύτερη. Επομένως για μεγάλες κλίμακες (1:4000, που σημαίνει απόσταση αντικειμένου 400m) η ακρίβεια των σημείων ελέγχου πρέπει να είναι 2mm οριζοντιογραφικά και 3mm υψομετρικά. Στην πράξη είναι υπερβολικά δύσκολο να επιτευχθούν τέτοιες ακρίβειες, κάτι που θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5-8: Κατανομή σημείων πεδίου Sjöckulla και μοντέλα διαφορετικών κλιμάκων βαθμονόμησης

➤ **Πεδίο ελέγχου ποιότητας εικόνων**

Το μέγεθος αυτού του πεδίου, είναι περίπου 60m x 100m και δομείται ως εξής (Εικόνα 5-9):



Εικόνα 5-9: Μόνιμοι και κινητοί στόχοι στο πεδίο ελέγχου Sjöckulla

- (1) Μόνιμοι ραβδωτοί στόχοι υψηλής χωρικής ανάλυσης
- (2) Μόνιμη κλίμακα του γκρι
- (3) Μόνιμες περιοχές αντανάκλασης (gray, red, black, white, clay, grass)
- (4) Ραβδωτοί στόχοι χαμηλής ανάλυσης
- (5) Μόνιμοι κυκλικοί στόχοι
- (6) Κινητός στόχος τύπου Siemens star
- (7) Κινητή κλίμακα του γκρι

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερότητα και η αντοχή του ενάντια στο νερό, τον πάγο και τη βλάστηση, το πεδίο κατασκευάστηκε σε διαφορετικά επίπεδα. Ξεκινώντας από κάτω προς τα πάνω, τα επίπεδα αυτά είναι:

- Στρώση άμμου 100 με 200 mm
- Ινώδες υλικό
- Χαλίκι διαμέτρου 25 με 55 mm, σε στρώση πάχους 100mm
- Ινώδες υλικό
- Χαλίκι διαμέτρου 8 με 16 mm ή 4 με 8 mm, σε στρώση πάχους 50mm.

Το υλικό βάσης είναι αργιλώδης πηλός. Η ανώτερη στρώση, έχει διαφορετικό πρότυπο, που οφείλεται σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους χαλικιού: μαύρο, κόκκινο και γκρι γρανίτη, καθώς και λευκό ασβεστόλιθο (Εικόνα 5-10).



Εικόνα 5-10: Δείγματα χαλικιών

Εναλλακτικά, αντί των στόχων από πέτρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βαμμένοι στόχοι από υλικά όπως: μουσαμάς, κόντρα πλακέ ή τσιμέντο. Το πρόβλημα με τους βαμμένους στόχους, είναι ότι οι ραδιομετρικές και φασματικές τους ιδιότητες αλλάζουν γρήγορα, εξαιτίας του ξεθωριάσματος, των ρύπων και της συμπεριφοράς των υλικών τους στην πρωινή δροσιά για παράδειγμα ή στο συγκεντρωμένο νερό μετά από μια βροχή, που απαιτούν συνεχείς επισκέψεις για συντήρηση πριν από την πτήση. Αντίθετα, οι πετρώδεις στόχοι έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Είναι ανθεκτικοί στις καιρικές μεταβολές, το νερό της βροχής ξεπλένει τη σκόνη από αυτούς και στεγνώνει γρήγορα, ενώ το χιόνι και η παγωνιά δεν τους παραμορφώνει.

Οι στόχοι ελέγχου της ανάλυσης της εικόνας, είναι οι μόνιμοι ραβδωτοί στόχοι δυο κατηγοριών: *sparse*, *dense* (αραιοί και πυκνοί), καθώς και το *Siemens Star*.

Οι ραβδωτοί στόχοι είναι κατασκευασμένοι από ξύλινα (για πλάτος >12 cm) ή χαλύβδινα (για πλάτος ≤12 cm) πλαίσια. Τα χαρακτηριστικά τους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5:

Στόχος	Διάμετρος Χαλικιών (mm)	Λόγος Αντίθεσης	Πλάτος Ράβδου (m)	Μήκος Ράβδου (m)	Προσαύξηση Πλάτους	RP Range (1/mm)	Εύρος κλίμακας ***	Εύρος Εδαφοψηφίδας (m)
Dense	4 με 8	1:2	0,03-0,12	1	$\sqrt{2}$	25-100*	<1:6000	0,03-0,06
Dense	4 με 8	1:8	0,03-0,12	1	$\sqrt{2}$	25-100*	<1:6000	0,03-0,06

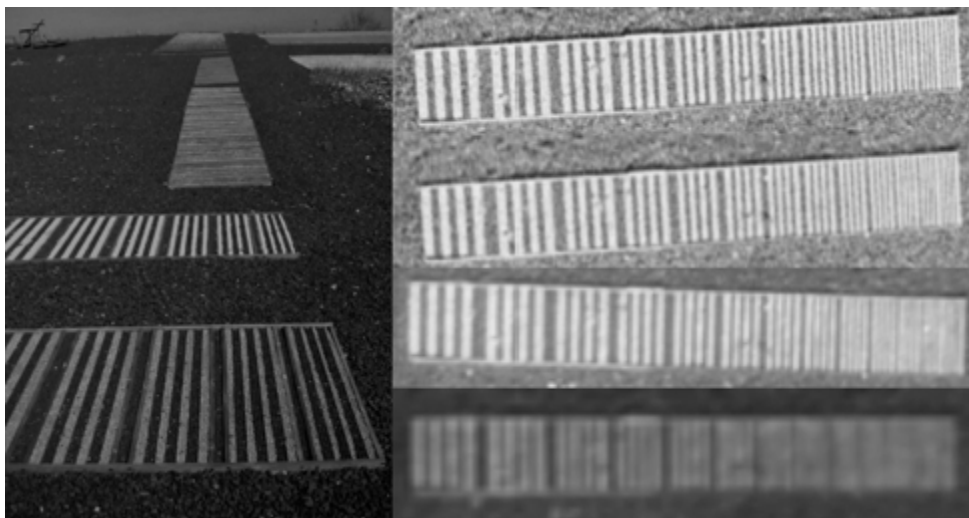
Στόχος	Διάμετρος Χαλκικών (mm)	Λόγος Αντίθεσης	Πλάτος Ράβδου (m)	Μήκος Ράβδου (m)	Προσαύξηση Πλάτους	RP Range (1/mm)	Εύρος κλίμακας ***	Εύρος Εδαφοψηφίδας (m)
Sparse	8 με 16	1:2	0,03-1,5	1-6	Ακανόνιστο	40-80**	<1:60000	0,03-1
Sparse	8 με 16	1:8	0,03-1,5	1-6	Ακανόνιστο	40-80**	<1:60000	0,03-1
Sparse	-	1:6 με 1:11	0-1	-	Συνεχές		<1:25000	0,01-0,25

Πίνακας 5-5: Χαρακτηριστικά στόχων ανάλυσης

* κλίμακα 1:3000

** κλίμακα 1:60000

*** Συμβατικά αναλογικά συστήματα φωτογράφισης



Εικόνα 5-11: Πυκνοί ραβδωτοί στόχοι ανάλυσης

Στην Εικόνα 5-11, φαίνεται ένα παράδειγμα πυκνών ραβδωτών στόχων ανάλυσης και το πώς αυτοί απεικονίζονται με διαφορετικό μέγεθος εδαφοψηφίδα. Οι δυο πρώτες εικόνες στα δεξιά, δείχνουν το στόχο από αναλογική φωτογραφία με εδαφοψηφίδα 2 εκ. και 4 εκ. (από πάνω προς τα κάτω), εικόνων που έχουν σαρωθεί με 10 μm και 20μm αντίστοιχα. Οι δυο τελευταίες δείχνουν τον ίδιο στόχο τραβηγμένο με ψηφιακή μηχανή και με εδαφοψηφίδα 4 εκ. (ο τρίτος) και 8 εκ. (ο τέταρτος).

Το φορητό *Siemens Star* (ένα ημικύκλιο), έχει τομείς 10 μοιρών και ακτίνα 6.8 μέτρα, που συνεπάγεται μέγιστο πλάτος ενός τομέα στο 1 μέτρο. Είναι κατασκευασμένο από μαύρο και γκρι πολυ-ακρυλικό ύφασμα. Τα υλικά του αυτά, έχουν σταθερή ανάκλαση στο ορατό και εγγύς τμήμα του φάσματος. Είναι στερεωμένο στο έδαφος με ελαστικές ζώνες και πασσάλους από χάλυβα. Το βάρος του υφάσματος είναι περίπου 290 gr/m² και το συνολικό βάρος του στόχου 21 kg. Παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-12 που ακολουθεί από επίγεια φωτογράφιση και από αεροφωτογραφία με μέγεθος εδαφοψηφίδα 4, 8 25 και 50 εκατοστά αντίστοιχα, από αριστερά προς τα δεξιά:

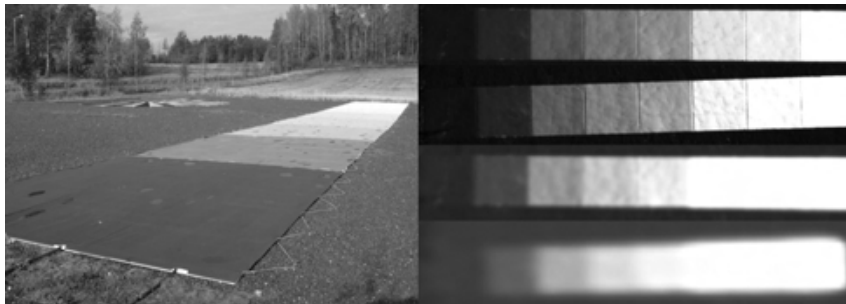


Εικόνα 5-12: Siemens Star

Μέρος του πεδίου ελέγχου ποιότητας των εικόνων είναι, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας, οι στόχοι αντανάκλασης. Αυτοί είναι κινητοί και μόνιμοι στόχοι αντανάκλασης σε κλίμακα του γκρι και μόνιμοι στόχοι αντανάκλασης, όπως παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 5-9. Οι κινητοί στόχοι αντανάκλασης σχεδιάστηκαν αρχικά για τον έλεγχο των αναλογικών αερομεταφερόμενων φωτογραφικών μηχανών, για την περιοχή του φάσματος 400-800 nm. Συνολικά κατασκευάστηκαν οχτώ στόχοι, με ονομαστική αντανάκλαση: 5, 10, 20, 25, 30, 45, 50 και 70 τοις εκατό. Το υλικό κατασκευής τους ήταν πολυεστέρας και PVC. Το μέγεθος του κάθε στόχου είναι 5m x 5m. Οι μεγάλοι τετράγωνοι στόχοι αντανάκλασης από γκρι, μαύρο, κόκκινο και λευκό χαλίκι είναι μεγέθους 15m x 7m.

Η μόνιμη κλίμακα του γκρι, αποτελείται από 9 βήματα μεγέθους 2m x 3m και είναι κατασκευασμένη από ξύλινα πλαίσια γεμάτα από λευκά και μαύρα χαλίκια. Ειδικά προβλήματα της μόνιμης κλίμακας του γκρι είναι το ότι η αντανάκλαση των βημάτων δεν είναι ομοιόμορφη, εξαιτίας της ανομοιόμορφης μίξης των χαλικιών και της ανομοιομορφίας του μεγέθους τους.

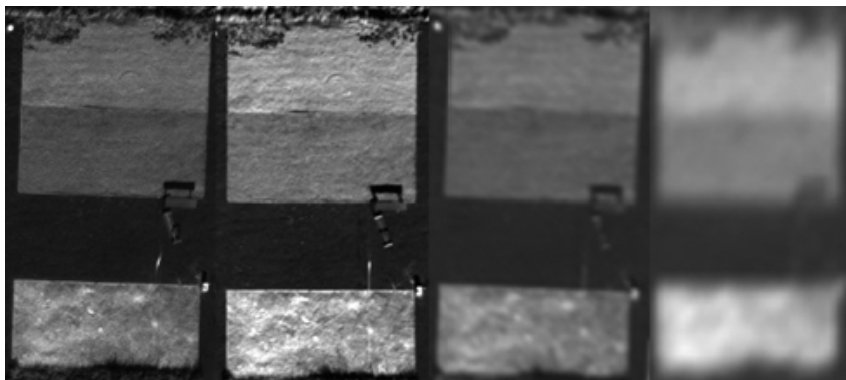
Στην Εικόνα 5-13, παρουσιάζονται από επίγειες φωτογραφήσεις παραδείγματα των στόχων που αναφέρθηκαν και η απεικόνισή τους από αεροφωτογράφιση με μέγεθος εδαφοψηφίδας 4 cm, 8 cm, 25 cm και 50 cm, αντίστοιχα από πάνω προς τα κάτω και αριστερά προς δεξιά:



Εικόνα 5-13: Κινητή κλίμακα του γκρι



Εικόνα 5-14: Μόνιμη κλίμακα του γκρι



Εικόνα 5-15: Τετραγωνικές περιοχές 15m x 7m
(γκρι, κόκκινες, μαύρες και λευκές)

5.1.5 Πεδίο ελέγχου Madison

Στη εργασία αυτή (Merchant, Schenk, Habib, & Yoon) περιγράφεται η ανάπτυξη μιας μεθόδου βαθμονόμησης ψηφιακής αεροφωτομηχανής, με τη χρήση πεδίου ελέγχου. Το πρόγραμμα αποτελεί μια συνεργασία της *USGS* και δυο πανεπιστημίων: *Ohio State University (OSU)* και *Calgary University (CU)*. Για τις ανάγκες του προγράμματος, ιδρύθηκε και χρησιμοποιήθηκε το πεδίο ελέγχου *Madison Test and Calibration Range*, που θα περιγραφεί στα επόμενα, από τα αναφερόμενα στο άρθρο στοιχεία.

Το πεδίο ελέγχου στο Μάντισον του Οχάιο, αποτελείται από 100 στόχους εντός μιας περιοχής 1.6km x 2.6km, οι συντεταγμένες των οποίων είναι μετρημένες με *GPS*. Η εσωτερική ακρίβεια του δικτύου είναι καλύτερη από 2 cm σε κάθε άξονα συντεταγμένων, συμπεριλαμβανομένου του βασικού σταθμού, που βρίσκεται σε απόσταση 5 km από το κέντρο της περιοχής του πεδίου, στο αεροδρόμιο της περιοχής. Το πεδίο κατασκευάστηκε και συντηρείται από το γραφείο αερο-μηχανικής του τμήματος μεταφορών του Οχάιο (*Office of Aerial Engineering of the Ohio Department of Transportation-ODOT*). Οι συντεταγμένες του κέντρου του πεδίου είναι 39°56'25"N και 83°31'28"W.

Οι στόχοι (κύκλοι) είναι βαμμένοι επάνω στους υπάρχοντες ασφάλτινους δρόμους και η κέντρωση γίνεται με καρφί. Έχουν διάμετρο 2.40 μέτρα χρώματος μαύρου, με έναν λευκό κύκλο διαμέτρου 80 cm στο κέντρο. Οι στόχοι σχεδιάστηκαν έτσι, ώστε να παρέχουν τη βέλτιστη εικόνα για αυτόματο εντοπισμό και καταγραφή των εικονοσυντεταγμένων τους, για μηχανές με φιλμ και ύψος πτήσης περίπου 1200 μέτρα πάνω από το πεδίο.

Προκειμένου να φωτογραφηθεί επαρκής αριθμός στόχων σε μία μόνο εικόνα, όταν χρησιμοποιούνται συμβατικές ψηφιακές μηχανές, οι στόχοι έχουν μια πυκνή κατανομή στη διασταύρωση τριών οδών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-18, που ακολουθεί. Στη διασταύρωση οι στόχοι απέχουν 10 μέτρα ο ένας από τον άλλο και καθώς εξαπλώνονται το διάστημα αυτό αυξάνει με συντελεστή $\sqrt{2}$. Με τον τρόπο αυτό, μηχανές με σχετικά μικρό οπτικό πεδίο, πετώντας σε χαμηλά ύψη μπορούν να αποκτήσουν επαρκή αριθμό εικόνων, που θα εξυπηρετήσουν τους σκοπούς της βαθμονόμησης. Το μέγεθος των στόχων, επιτρέπει την αναγνώριση και εντοπισμό τους, ακόμη και από το *Google Earth*, όπως διαπιστώθηκε κατά την αναζήτηση στο διαδίκτυο και παρατίθεται στην Εικόνα 5-18.



Εικόνα 5-16: Περιοχή πεδίου ελέγχου Madison



Εικόνα 5-17: Προετοιμασία στόχων



Εικόνα 5-18: Περιοχή πεδίου υψηλής πυκνότητας στόχων για βαθμονόμηση ψηφιακών μηχανών

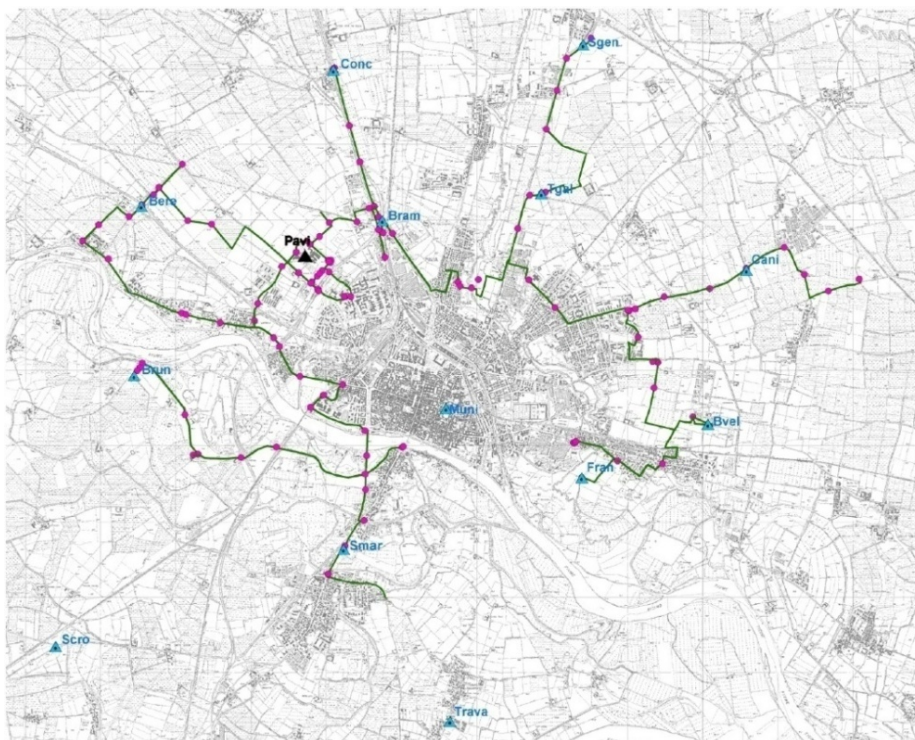
Πηγή: Google Earth

5.1.6 Πεδίο ελέγχου Pavia

Το πεδίο ελέγχου *Pavia*, ιδρύθηκε από το εργαστήριο Γεωπληροφορικής του πανεπιστημίου της *Pavia*, στην Ιταλία (*Geomatics Laboratory, University of Pavia, Italy*) και περιγράφεται στη συνέχεια (Galetto & Casella).

Για την εξυπηρέτηση των ερευνών, έχει ιδρυθεί ένα υψηλής ακρίβειας δίκτυο *GPS* 13 σταθμών, που έχει μετρηθεί με τη στατική μέθοδο. Το δίκτυο έχει συνδεθεί με το Ιταλικό δίκτυο *GPS: IGM95*, που είναι υλοποίηση του *datum ETRS-89*. Περιλαμβάνει ακόμα έναν μόνιμο σταθμό αναφοράς, που παρακολουθείται από το εργαστήριο και επαναμετράται συνεχώς, καθώς χρησιμοποιείται συχνά για διάφορους επιστημονικούς σκοπούς.

Στην Εικόνα 5-19, με μπλε τρίγωνο απεικονίζονται οι κορυφές του δικτύου *GPS* και με κόκκινο κύκλο οι κορυφές του δικτύου χωροστάθμησης, που ενώνονται με τις πράσινες γραμμές. Με το μαύρο τρίγωνο απεικονίζεται ο βασικός σταθμός.



Εικόνα 5-19: Χωροσταθμικό δίκτυο και δίκτυο *GPS* του πεδίου ελέγχου *Pavia*

Το πεδίο έχει διαστάσεις 6km x 4.5km και ένα μέσο υψόμετρο 90m. Περιλαμβάνει 169 (*artificial control points-AGCP*) τεχνητά σημεία γνωστών συντεταγμένων (Εικόνα 5-20), που έχουν προσημανθεί με λευκό τετράγωνο πλευράς 35 cm.



Εικόνα 5-20: Κατανομή AGCP

Τα περισσότερα από τα σημεία, έχουν χρωματιστεί απευθείας επί των δρόμων κυρίως, αλλά και σε κατασκευές από τσιμέντο (Εικόνα 5-23). Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, για παράδειγμα στις αγροτικές περιοχές του πεδίου, χρησιμοποιούνται τεχνητοί μεταφερόμενοι στόχοι, κατασκευασμένοι από μέταλλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-21.



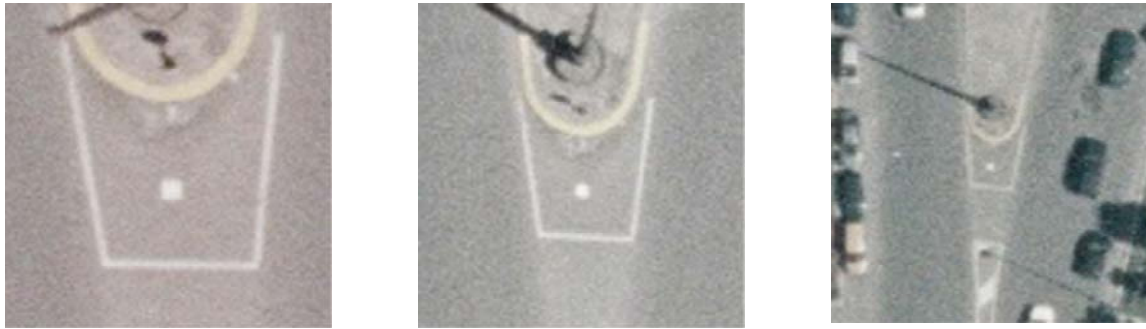
Εικόνα 5-21: Επισήμανση στόχου (κινητή)

Η εκλογή του μεγέθους, του σχήματος και του χρώματος των στόχων ήταν αποτέλεσμα σύγκρισης μεταξύ αντίστοιχων δοκιμαστικών κατασκευών (Εικόνα 5-22), με κριτήριο την ορατότητά τους σε κλίμακες φωτογράφισης του εύρους 1:5000 έως 1:8000. Δοκιμάστηκαν κυκλικοί, τετράγωνοι και στόχοι σχήματος ρόμβου και χρώματος λευκού και κίτρινου.



Εικόνα 5-22: Κατασκευή δοκιμαστικών μεταφερόμενων (αριστερά) και μόνιμων (δεξιά) στόχων διαφορετικού μεγέθους και σχήματος

Ο εντοπισμός αυτού του μεγέθους του στόχου, που υιοθετήθηκε τελικά ($35 \times 35 \text{ cm}^2$), έχει πολύ καλά αποτελέσματα αναγνώρισης του (Εικόνα 5-23), για κλίμακες φωτογράφισης 1:5000 και 1:8000, ενώ είναι ικανοποιητικά για εικόνες κλίμακας 1:18000.



Εικόνα 5-23: Ορατότητα σημείου σε κλίμακες 1:5.000 - 1:8.000 - 1:18.000 από αριστερά προς τα δεξιά αντίστοιχα

Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται ως φωτοσταθερά και 62 φυσικά σημεία χωρίς προσήμανση ή κάποια ειδική κατασκευή, αριθμός που συνεχώς αναθεωρείται. Αυτά καλούνται *natural control points (NGCP)* και κατανέμονται στην περιοχή του πεδίου όπως στην Εικόνα 5-24.



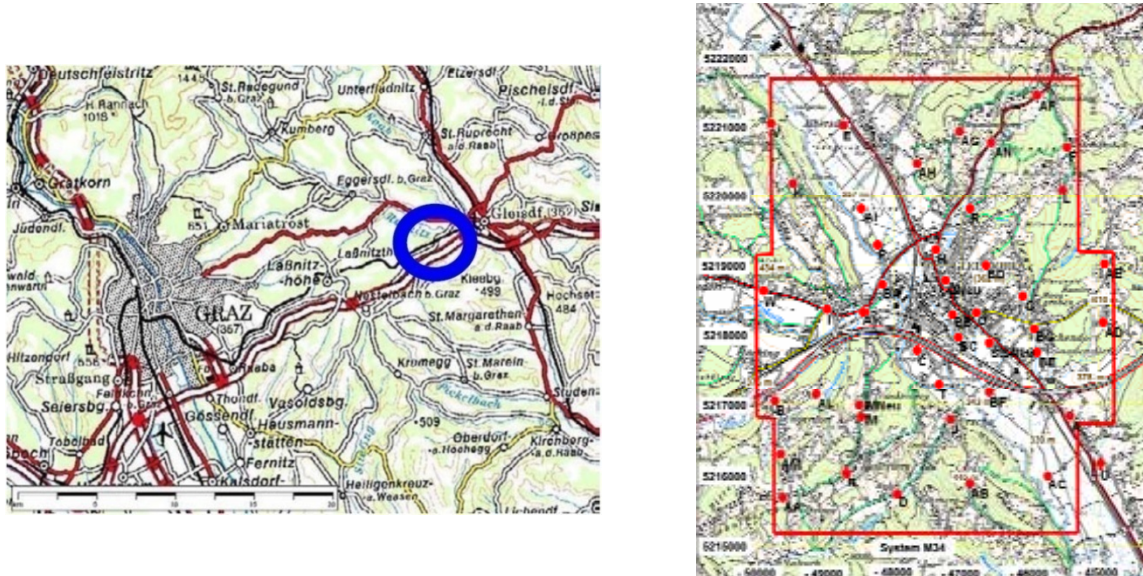
Εικόνα 5-24: Κατανομή NGCP

Προκειμένου να υποστηριχτούν διάφορα ερευνητικά προγράμματα, όπως για παράδειγμα μελέτες ψηφιακών μηχανών, τοποθετήθηκαν αρχικά 50 και μετέπειτα άλλα 70 με μεγαλύτερες τεχνητές επισημάνσεις, της τάξης των 60 cm. Αυτές καλούνται *Big AGCP (BAGCP)* και μετρούνται με παρατηρήσεις *GPS* στατικής μεθόδου, όπως τα υπόλοιπα σημεία. Τέλος, η πιο πρόσφατη προσθήκη στο πεδίο, ήταν ένα αστέρι *Siemens* που έχει διάμετρο 5.4m και το οποίο τοποθετήθηκε στη στέγη ενός κτιρίου κατά τη διάρκεια της πτήσης με τη μηχανή *ADS40*.

5.1.7 Πεδίο ελέγχου Gleisdorf

Στο άρθρο αυτό (Mansholt & Ladstaedter, 2008) περιγράφονται μέθοδοι για την βαθμονόμηση και έλεγχο της μηχανής *Ultracamx*, με τη χρήση του πεδίου ελέγχου *Gleisdorf*. Το πεδίο βρίσκεται 30 km ανατολικά της πόλης *Graz* της Αυστρίας (Εικόνα 5-25) και έχει έκταση 5km x 7km. Για την επιλογή της κατάλληλης περιοχής ίδρυσής του, δόθηκε προσοχή στις εδαφικές ετερογενείς περιοχές (περιοχή με υψομετρικές διαφορές, δάση, χορτολιβαδικές εκτάσεις, κτίρια, υποδομές μεταφορών κτλ). Αυτό γιατί με βάση αυτές τις περιοχές, θα μπορούσε να εκτελεστεί και ραδιομετρικός έλεγχος των μηχανών, επιπρόσθετα του

γεωμετρικού ελέγχου τους. Το πεδίο διαθέτει 46 σημεία γνωστών συντεταγμένων (*ground control points*) και στις τρεις διαστάσεις, που έχουν προσδιοριστεί με μετρήσεις *GPS*, με μια ακρίβεια της τάξης των 3 cm.



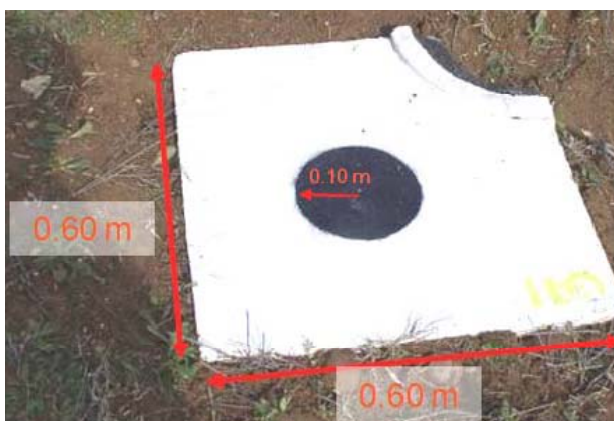
Εικόνα 5-25: Πεδίο ελέγχου Gleisdorf και κατανομή των GCP

5.1.8 Πεδίο ελέγχου Valladolid

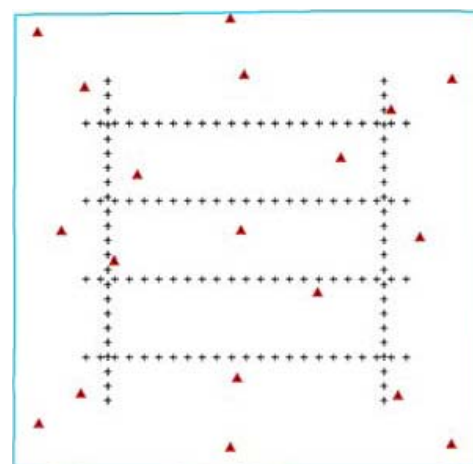
Στην εργασία αυτή (Nafria et al, 2008) περιγράφεται η χρήση ενός πεδίου ελέγχου, για την εξυπηρέτηση ενός προγράμματος παραγωγής ορθοφωτοχαρτών της Ισπανικής κυβέρνησης, προκειμένου να υπολογίζονται οι παράμετροι, για την απευθείας γεωαναφορά των λαμβανομένων αεροφωτογραφιών με σύστημα *GPS-IMU*, καλύπτοντας τις τεθείσες κάθε φορά προδιαγραφές ακρίβειας.

Το πεδίο ελέγχου έχει έκταση 3.6km x 3.6km και βρίσκεται βόρεια της *Valladolid* στη κεντρική Ισπανία. Ιδρύθηκε με πρωτοβουλία της Ισπανικής κυβέρνησης και συντηρείται από το *Instituto Tecnológico Agrario (itacyl)*.

Διαθέτει 19 προσημασμένους τετράγωνους στόχους (Εικόνα 5-26) πλευράς 60cm, από οπλισμένο σκυρόδεμα, χρώματος λευκού με μαύρο κύκλο ακτίνας 10 cm στο κέντρο.



Εικόνα 5-26: Χρησιμοποιούμενοι προσημασμένοι στόχοι στο πεδίο ελέγχου Valladolid



Σχήμα 5-3: Κατανομή GCP στο πεδίο ελέγχου Valladolid

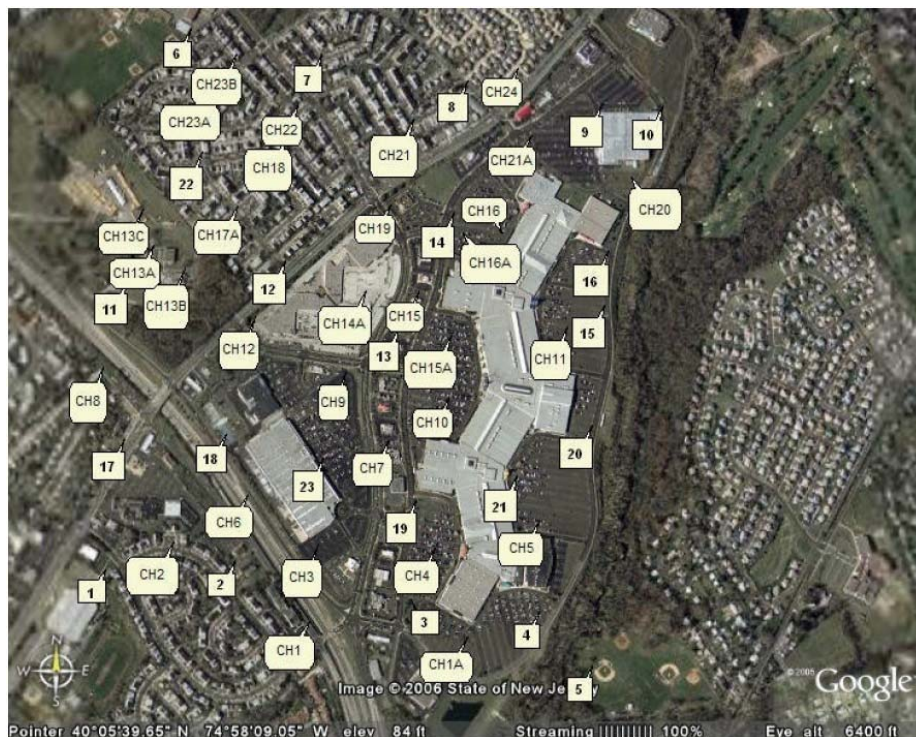
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-26, οι στόχοι έχουν «στρογγυλεμένη» μία γωνία, που προσανατολίζεται να δείχνει προς τον Βορρά, προκειμένου να ελέγχεται τυχόν μετατόπιση, από την αρχική τους θέση.

Στη περιοχή του πεδίου, υπάρχει ένας σταθμός αναφοράς *EUREF L1&L2 GNSS*

(GPS+GLONASS), με συχνότητα καταγραφής 1Hz. Επιπρόσθετα, υπάρχουν άλλοι 10 σταθμοί αναφοράς σε απόσταση 100 Km από το πεδίο βαθμονόμησης.

5.1.9 Πεδίο ελέγχου Franklin Mill

Στην εργασία αυτή (Jacobsen & Passini), περιγράφεται ένα πεδίο, που βρίσκεται στη Νοτιοανατολική Φιλαδέλφεια στην Αμερική, σε μια σχετικά επίπεδη και ανοιχτή από κάθετα εμπόδια περιοχή. Ονομάστηκε *test field Franklin Mill* από το όνομα του ομώνυμου εμπορικού κέντρου της περιοχής, το οποίο διαθέτει ένα μεγάλο παρκινγκ αυτοκινήτων, με τις θέσεις του να οριοθετούνται με γραμμές από χρώματα οδοποιίας. Επίσης, η ευρύτερη περιοχή όμως, διαθέτει μεγάλους δρόμους με σήμανση επ' αυτών. Συνολικά 42 σημεία χρησιμοποιούνται ως *control* και *check points*, τα οποία είναι τομές γραμμών επισήμανσης στην άσφαλτο.



Εικόνα 5-27: Κατανομή σημείων στο πεδίο ελέγχου Franklin Mill

Τα σημεία αυτά έχουν προσδιορισθεί με κινηματικές μετρήσεις GPS με μια οριζοντιογραφική ακρίβεια μικρότερη των 2cm και υψομετρική μικρότερη των 2.5cm.



Εικόνα 5-28: Παρκινγκ εμπορικού κέντρου



Εικόνα 5-29: Παρκινγκ εμπορικού κέντρου και επιλογή και μέτρηση σημείων επί αυτού

Το πεδίο χρησιμοποιήθηκε σε πρόγραμμα βαθμονόμησης των ψηφιακών μηχανών *DMC*, *UltraCamD*, *UltraCamX* και της αναλογικής μηχανής *RC30*, με δοκιμές συνδυασμού επιπρόσθετων παραμέτρων.

5.1.10 Πεδίο ελέγχου Stennis Space Center

Ήδη από το 2000, *USGS* και *ASPRS*, είχαν κατανοήσει την ανάγκη ύπαρξης κατάλληλων μεθόδων και συσκευών βαθμονόμησης για τους αερομεταφερόμενους ψηφιακούς δέκτες (Pagnutti et al). Η πρωτοβουλία αυτή βασίστηκε στην ομάδα της *ASPRS*, για τη βαθμονόμηση των μηχανών, που συγκροτήθηκε το 1998. Σήμερα η *USGS* σε συνεργασία με τη *NASA* και το *SSC (Stennis Space Center)*, εργάζονται για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη και εφαρμογή χαρακτηριστικών μεθόδων και προτύπων αξιολόγησης, των ψηφιακών μηχανών και άλλων συστημάτων συλλογής εικόνων. Στη βάση των ερευνών αυτών, πολλοί κατασκευαστές ψηφιακών αερομεταφερόμενων μηχανών (*ADS40*, *DMC*, *UltracamD*, *DSS*) εκτελούν πτήσεις πάνω από το πεδίο ελέγχου *SSC* της *NASA*. Χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες *in situ calibration*, διερευνούν τα συστήματά τους, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη γεωμετρική και ραδιομετρική ακρίβεια και σταθερότητά τους (Cramer M.).

Το *Stennis Space Center (SSC)* της *NASA* βρίσκεται στο *Mississippi* των ΗΠΑ και αρχικά κατασκευάστηκε ως ένα πεδίο επαλήθευσης και πιστοποίησης (*Verification & Validation - V&V*), δορυφορικών δεκτών συλλογής εικόνων. Στην πορεία και στη βάση των όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως, (Cramer, 2004), χρησιμοποιήθηκε και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα και για τον έλεγχο ψηφιακών αερομεταφερόμενων μηχανών. Το πεδίο, το οποίο αναφέρεται και ως *Stennis Fee Area*, έχει έκταση 55 km² και έχει σχεδόν τετραγωνικό σχήμα. Βρίσκεται σε έκταση που ανήκει στο δημόσιο και η κάλυψη γης είναι κυρίως δασική, περιλαμβάνει όμως και αριθμό ανθρωπογενών κατασκευών καθώς και δρόμους, λίμνες, έλη, κανάλια κτλ. Χρησιμοποιείται δε για τον γεωμετρικό, χωρικό και ραδιομετρικό χαρακτηρισμό των δεκτών.

➤ Προδιαγραφές πεδίου για γεωμετρική βαθμονόμηση των δεκτών (Geometric Characterization Site Requirements)

Το πεδίο πρέπει να διαθέτει έναν επαρκή αριθμό σημείων (πάνω από 20) κατανεμημένων σε ολόκληρη την περιοχή. Η αναγνώρισή τους πρέπει να γίνεται εύκολα από τα αντικείμενα του περιβάλλοντα χώρου και η ακρίβεια θέσης τους θα πρέπει να είναι καλύτερη, κατά ένα συντελεστή μεγέθυνσης, από την ακρίβεια του ελεγχόμενου δέκτη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται 45 **γεωδαιτικοί στόχοι**, κυκλικού σχήματος, χρώματος λευκού και διαμέτρου 2.44 m, με το κέντρο τους διαμέτρου 0.6 m, να είναι βαμμένο κόκκινο (Εικόνα 5-30). Το κόκκινο χρώμα επιλέχθηκε για την καλύτερη αναγνώριση των στόχων σε εικόνες από συστήματα που χρησιμοποιούν φιλμ και δεν παίζει ρόλο για τους ψηφιακούς δέκτες.

Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται και άλλοι 136 ευκαιριακοί στόχοι, όπως είναι **καλύμματα φρεατίων** διαμέτρου από 0.6 - 2.9 m (Εικόνα 5-31).

Για το βάψιμό τους χρησιμοποιείται λευκό χρώμα με ονομαστική τιμή ανακλαστικότητας του ορατού τμήματος του φάσματος 60%. Οι συντεταγμένες των στόχων, έχουν προσδιοριστεί με

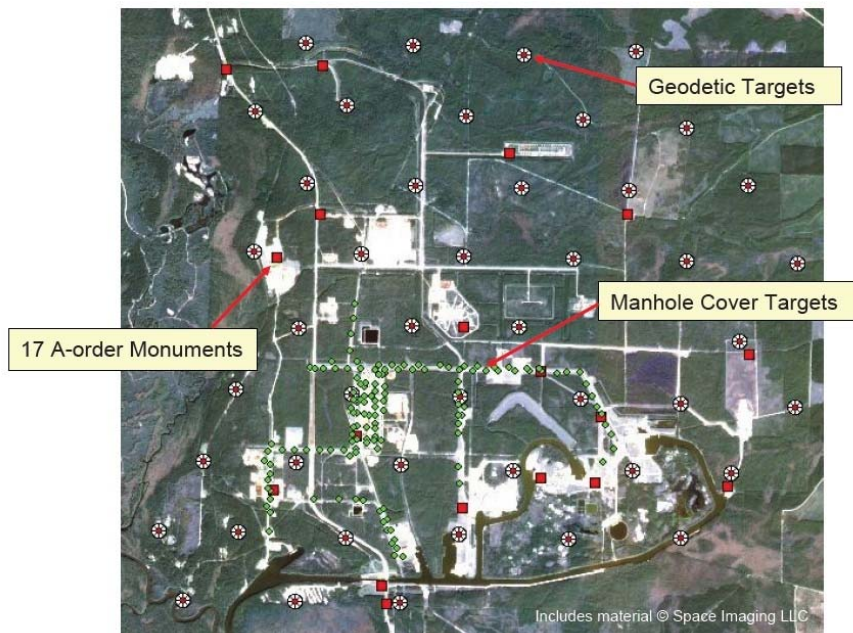
κινηματικές μετρήσεις GPS και με ακρίβειες οριζοντιογραφικά 3 cm και υψομετρικά 9 cm. Για την υποβοήθηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 17 σημεία α' τάξης (Εικόνα 5-32).



Εικόνα 5-30: Γεωδαιτικοί στόχοι πεδίου SSC



Εικόνα 5-31: Βαμμένα καλύμματα φρεατίων σαν ευκαιριακοί στόχοι



Εικόνα 5-32: Κατανομή σημείων στο SSC

➤ **Προδιαγραφές πεδίου για χωρική και ραδιομετρική βαθμονόμηση των δεκτών**

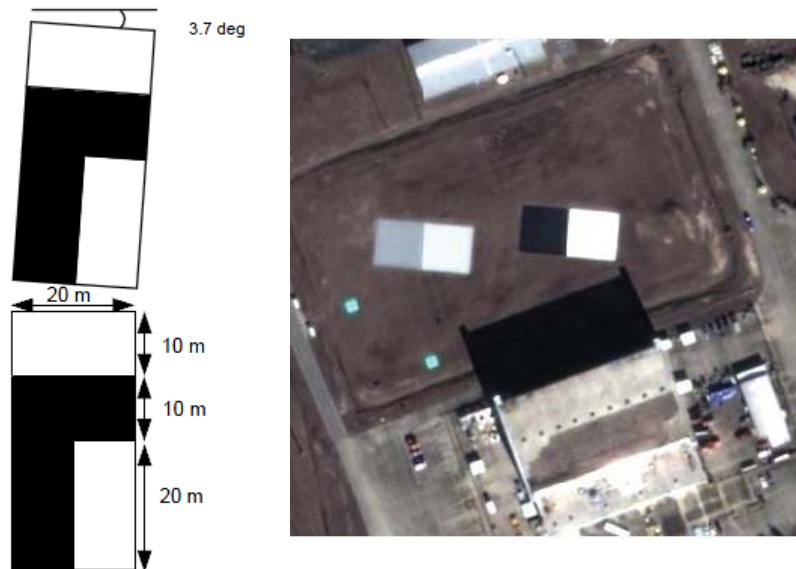
Αυτό το πεδίο ελέγχου δημιουργήθηκε για χρήση από δορυφορικές απεικονίσεις και δεν διαπιστώθηκε να έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση, γεωμετρική ή ραδιομετρική, μηχανών αεροφωτογραφίσεων.

Ένας τρόπος αξιολόγησης της χωρικής διακριτικής ικανότητας της εικόνας ενός δέκτη, είναι η ικανότητά του να αποτυπώνει ακμές με μεγάλη πιστότητα. Έτσι χρησιμοποιούνται στόχοι ακμών δύο τύπων. Ο πρώτος από αυτούς, δημιουργείται από το διαχωρισμό φωτεινών και σκοτεινών περιοχών σε δυο κάθετα επίπεδα και με διαφορετικό προσανατολισμό (Εικόνα 5-33), προκειμένου να ικανοποιείται η απαίτηση ύπαρξης αρκετών εικονοστοιχείων κατά μήκος των ακμών, σε εικόνες με διαφορετικά συστήματα μέτρησης εικονοσυντεταγμένων.

Οι σκοτεινές περιοχές είναι βαμμένες σε τσιμέντο με χρώματα ανακλαστικότητας 5% του ορατού τμήματος του φάσματος, ενώ οι λοιπές με 50%. Ένας άλλος τύπου στόχου για το

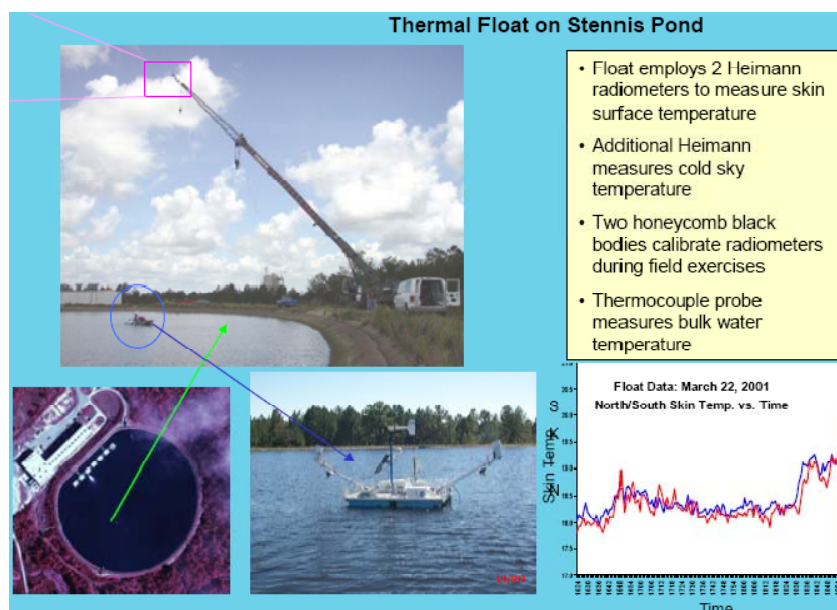
σκοπό αυτό (Εικόνα 5-33), που χρησιμοποιείται όμως και για τον ραδιομετρικό χαρακτηρισμό, κατασκευάζεται από βαμμένα ειδικά καλύμματα διαστάσεων 20m x 20m, δημιουργώντας δυο διαφορετικούς στόχους: Έναν με ανακλαστικότητα από 3.5-52% και έναν από 22-34%. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του είδους του στόχου, είναι η δυνατότητα μεταφοράς και τοποθέτησής του σε εναλλακτικές τοποθεσίες.

Για τον ραδιομετρικό χαρακτηρισμό όμως, εμπλέκονται και άλλες τεχνικές όπως: Μοντελοποίηση της ατμόσφαιρας από κώδικες μεταφοράς ακτινοβολίας και μετρήσεις ιδιοτήτων της, μέτρηση ανακλαστικότητας επίγειων στόχων, ατμοσφαιρική πίεση, υγρασία κτλ.



Εικόνα 5-33: Στόχοι ακμών για χωρικό (αριστερά)-ραδιομετρικό (δεξιά) χαρακτηρισμό του πεδίου SSC

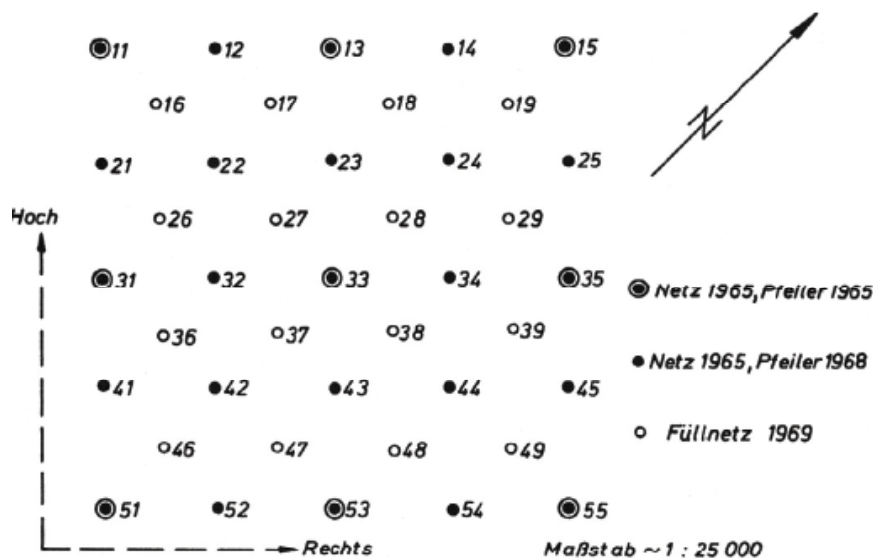
Ακόμα, γίνονται θερμικές ραδιομετρικές βαθμονομήσεις για κάποιους αισθητήρες που έχουν αυτή τη δυνατότητα. Για το σκοπό αυτό, συνήθως χρησιμοποιούνται μικρές λίμνες νερού βάθους 10-15 μέτρων και διαστάσεων τέτοιων ώστε να καλύπτουν 10 pixel χωρικά. Στο πεδίο SSC V&V υπάρχει και διατηρείται μια δεξαμενή ύδατος στην οποία τη στιγμή της βαθμονόμησης γίνονται και άλλες μετρήσεις, όπως ατμοσφαιρικές και μετρήσεις εξάτμισης του νερού.



Εικόνα 5-34: Δεξαμενή μέτρησης της θερμικής ραδιομετρίας στο SSC V&V

5.1.11 Πεδίο ελέγχου του Rheidt

Η ανάγκη ύπαρξης των πεδίων ελέγχου ήταν γνωστή από τη δεκαετία του '60, τουλάχιστον ως συμπλήρωμα στην εργαστηριακή βαθμονόμηση. Τον καιρό εκείνο τα πεδία ελέγχου χρησιμοποιούνταν κυρίως για να εκτιμηθούν οι πηγές σφαλμάτων κατά την δόμηση των εικόνων που χρησιμοποιούνταν στη φωτογραμμετρία (Kupfer 1971). Διάφορες προσεγγίσεις είχαν προταθεί και διάφορα πεδία είχαν κατασκευαστεί. Ένα από τα γνωστά πεδία της εποχής ιδρύθηκε και συντηρούνταν από το *Institut fur Photogrammetrie, Universitat Bonn*, κοντά στο χωριό *Rheidt*, βορειοανατολικά της Βόννης. Το πεδίο αυτό περιέχει 41 κανονικά καταναμημένες ομάδες σημείων μέσα σε μία περιοχή $2 \times 2 \text{ km}^2$ (Εικόνα 5-35). Η κάθε ομάδα αποτελείται από τρία επισημασμένα σημεία. Από αυτά τα πεδία ελέγχου και τις έρευνες που διεξήχθησαν διάφορα μοντέλα βαθμονόμησης προτάθηκαν και μπορούν να αναζητηθούν για παράδειγμα στους Hallert (1968), Brown (1966, 1976), Ebner (1976), Gruen (1978).



Εικόνα 5-35: Πεδίο ελέγχου Rheidt

5.1.12 Λοιπά πεδία ελέγχου

Επιπρόσθετα, εντοπίστηκαν αναφορές και στα εξής πεδία ελέγχου, για τα οποία δεν βρέθηκαν επαρκείς πληροφορίες, για την περιγραφή τους και αναφέρονται για την πληρότητα του κειμένου:

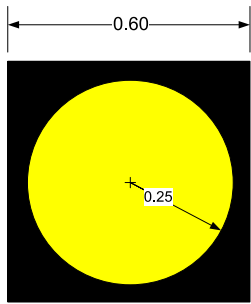
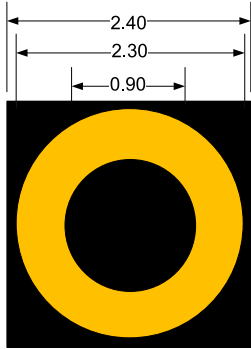
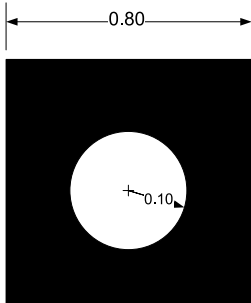
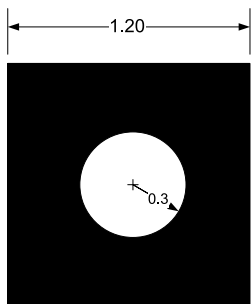
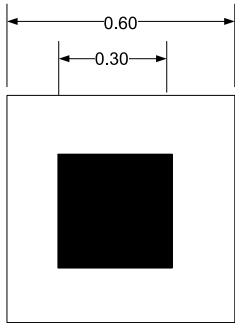
- Πεδίο ελέγχου **Bedburg**

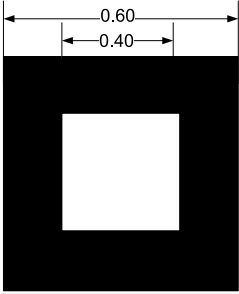
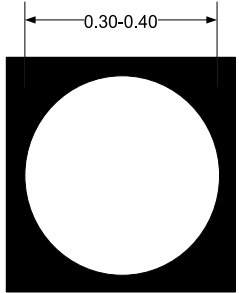
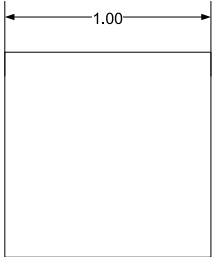
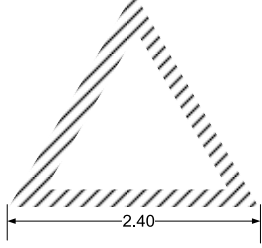
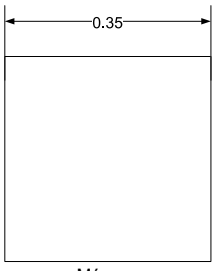
Αυτό βρίσκεται στο *Bedburg* κοντά στην Κολωνία της Γερμανίας. Καταλαμβάνει μια έκταση $1.5 \times 6 \text{ km}^2$ και διαθέτει 109 προσημασμένα σημεία, που είναι λευκά τετράγωνα διαστάσεων $45 \times 45 \text{ cm}^2$.

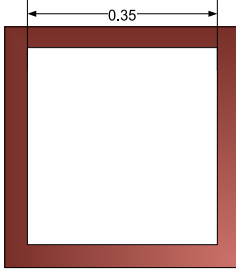
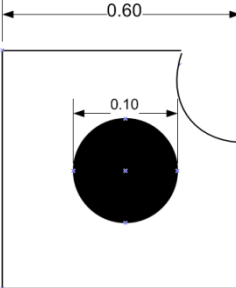
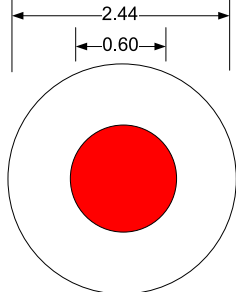
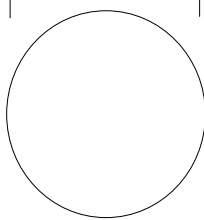
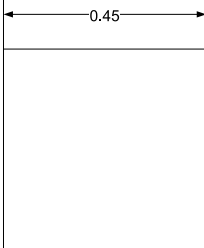
- Πεδίο ελέγχου **Elchingen** (Dörstel, 2003)
- Πεδίο ελέγχου **Herbrugg** (Tempelman et al., 2003)
- Πεδίο ελέγχου **GSI**
- Πεδίο ελέγχου **Yoriichio**
- Πεδίο ελέγχου **Hambach**
- Πεδίο ελέγχου **Malmi Helsinki**
- Πεδίο ελέγχου **Oberpfaffenhofen** στη Γερμανία (Holzwarth et al., 2005).
- Πεδίο ελέγχου **Bern/Thun** στην Ελβετία από το *ETH Zurich*.
- Πεδίο ελέγχου **Okazaki**, στη περιοχή Aichi, στο νησί *Honshu* της Ιαπωνίας.
- Πεδίο ελέγχου **Zurich/Winterthur**, το οποίο έχει ιδρυθεί από την *IGP, ETH*.
- Η *FGI* εκτός από το πεδίο της *Sjokulla*, διατηρεί και ένα μικρότερο πεδίο ελέγχου ως συμπληρωματικό, αυτό της *Jamsa* με 20 *GCP* με ακρίβεια κάτω των 5cm.

5.1.13 Συγκεντρωτικός πίνακας στοιχείων υπάρχοντων πεδίων

Παρατίθεται στη συνέχεια ένας συγκεντρωτικός πίνακας βασικών στοιχείων στα κατασκευασμένα πεδία ελέγχου που βρέθηκαν.

Πεδίο Ελέγχου	Χώρα	Έκταση (km ²)	Αριθμός σημείων	Ακρίβεια (cm) $\sigma_{x,y} - \sigma_z$		Φορέας	Στόχος
Willunga	Αυστραλία	5.8x5.8	96	2.5	3.0	-	
Karunda	Αυστραλία	24x24	43	4.0	4.0	-	
Jamijarvi (small)	Φινλανδία	0.8x0.8	180	5	0.6 (mm/km)	-	
Jamijarvi (large)	Φινλανδία	2x2	121	3	0.6 (mm/km)	-	
Vaihingen/Enz	Γερμανία (Στουτγάρδη)	7.5x4.7	200 (μόνιμοι)	2	2	Institut für Photogrammetrie - Universität Stuttgart (Δυνατότητα και για ραδιομετρική βαθμονόμηση)	

Πεδίο Ελέγχου	Χώρα	Έκταση (km ²)	Αριθμός σημείων	Ακρίβεια (cm) $\sigma_{x,y} - \sigma_z$		Φορέας	Στόχος
Fredrikstad	Νορβηγία (Όσλο)	5x6	51	1	1	Department of Mapping Sciences (IKF)- Agricultural University of Norway	
Sjökulla	Φινλανδία (Sjökulla)	1 x 1	42 κυκλ.	1	2	Finnish Geodetic Institute (Δυνατότητα και για ραδιομετρική και χωρικής ανάλυσης βαθμονόμηση)	
			2 τετρ.				
		4 x 5	10 τετρ.	1	2		
			2 τριγ.	1	5		
			14 τετρ.	1	2		
10x10	9 τριγ.	5	5				
	Madison	ΗΠΑ (Οχάιο)	1.6x2.6	100 (μόνιμοι)	<2	<2	Office of Aerial Engineering of the Ohio Department of Transportation -ODOT
Pavia	Ιταλία (Pavia)	6x4.5	231	Static GPS		Geomatics Laboratory, University of Pavia, Italy	 Μόνιμοι

Πεδίο Ελέγχου	Χώρα	Έκταση (km ²)	Αριθμός σημείων	Ακρίβεια (cm) $\sigma_{x,y} - \sigma_z$		Φορέας	Στόχος
							 <p>Μεταφερόμενοι</p>
Gleisdorf	Αυστρία (Graz)	5x7	46	3	3	-	-
Valladolid	Ισπανία (Valladolid)	3.6x3.6	19	Static GPS		Instituto Tecnológico Agrario (itacyl).	
Franklin Mill	ΗΠΑ (Φιλαδέλφεια)		42	<2	<2.5	Bae Systems	Διασταυρώσεις γραμμών οδοποιίας
Stennis Space Center	ΗΠΑ (Mississippi)	55	45	3	9	NASA (Δυνατότητα και για ραδιομετρική και χωρική ανάλυσης βαθμονόμηση)	
			136				
Bedburg	Γερμανία (Bedburg)	1.5x6	109	4	9	-	

Πίνακας 5-6: Κύρια χαρακτηριστικά υπαρχόντων πεδίων ελέγχου

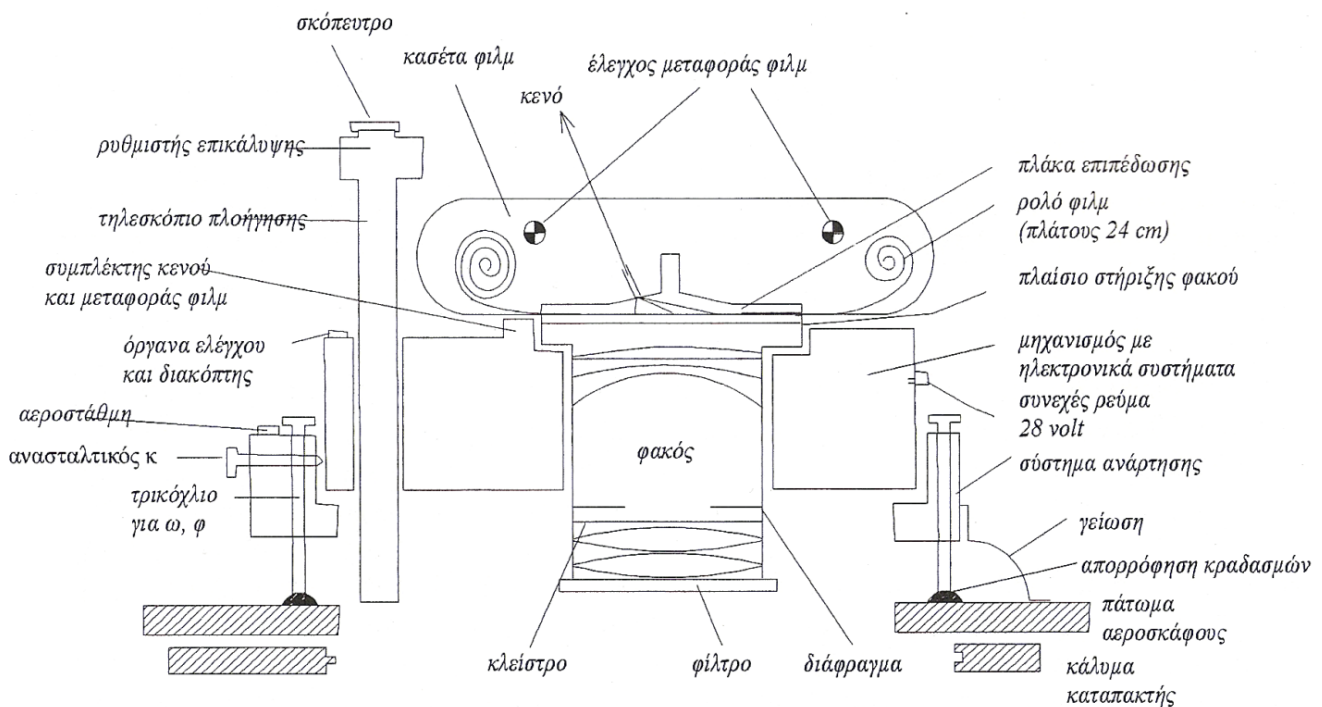
6. ΥΛΙΚΟ - ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα μέσα σε υλικό και λογισμικό, που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας.

6.1 Φωτογράφιση Πεδίου

Το πεδίο ελέγχου φωτογραφήθηκε από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού με τη διάθεση, όσον αφορά το υλικό, φωτομηχανής και πτητικού μέσου.

6.1.1 Βασικά μέρη μηχανών αεροφωτογράφισης – Γενικά



Σχήμα 6-1: Σκαρίφημα μιας μετρητικής μηχανής εναέριων λήψεων

Πηγή: Kraus, 2003

Τα βασικά μέρη μιας αναλογικής φωτομηχανής εναέριων λήψεων είναι (Μπαντέκας, 1980):

- Η βάση στήριξης
- Η αποθήκη του φωτογραφικού υλικού
- Ο κώνος του θαλάμου

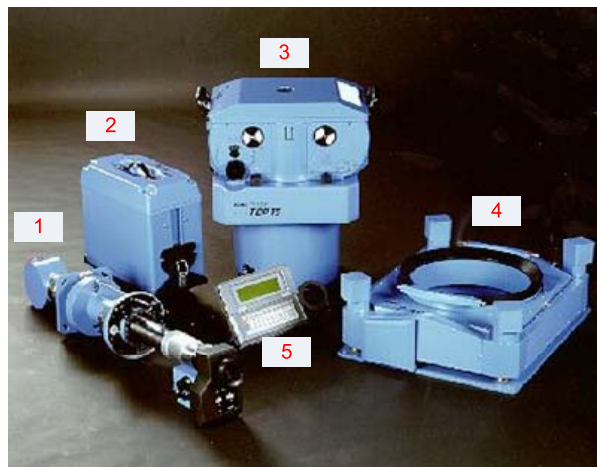
Ο **κώνος του θαλάμου** είναι μεταλλικός και στο ένα του άκρο υπάρχει το σύστημα του φακού με το κλείστρο και το φίλτρο, ενώ στο άλλο, το πλαίσιο που ορίζει το επίπεδο φωτογράφισης και το οποίο είναι κατάλληλα διαμορφωμένο για την αποτύπωση στο φιλμ των βοηθητικών στοιχείων της λήψης. Η βασική αποστολή του κώνου, είναι να εξασφαλίζει ότι το μόνο φως που φτάνει στο εστιακό επίπεδο, είναι μόνο αυτό που διέρχεται από τον φακό κατά το διάστημα του ρυθμιζόμενου ανοίγματος αυτού. Η δεύτερη βασική του αποστολή, είναι με την κατασκευή του να εξασφαλίζει τη σταθερότητα της θέσης μεταξύ φακού και εστιακού επιπέδου.

Η **αποθήκη του φωτογραφικού υλικού** είναι ένας θάλαμος αποθήκευσης του φωτογραφικού υλικού και διαθέτει τον κατάλληλο χώρο για αυτή την αποθήκευση, ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνει το μηχανισμό εναλλαγής του φιλμ, τον δείκτη εναλλαγής και τον μετρητή του κενού. Η απαιτούμενη επιπεδότητα του φιλμ εξασφαλίζεται είτε δια της δημιουργίας κενού, που το εξαναγκάζει να πιεστεί προς την επίπεδη πλάτη της αποθήκης του φωτογραφικού υλικού, είτε με γυάλινη πλάκα πίεσης.

Η **βάση στήριξης** προσαρμόζεται πάνω από το άνοιγμα του αεροπλάνου (καταπακτή) και πάνω σε αυτή εδράζεται η μηχανή. Μπορεί να οριζοντιωθεί είτε με τη βοήθεια ειδικών κοχλιών, είτε με τηλεχειρισμό από ένα τηλεσκόπιο πλοήγησης, είτε αυτομάτως μέσω γυροσκοπικού συστήματος έλεγχου. Η βάση, με τη βοήθεια ελαστικών συνδέσμων στήριξης, χρησιμεύει επίσης για την απορρόφηση των κραδασμών του αεροσκάφους. Στην ίδια βάση, βρίσκεται επίσης ο μηχανισμός που εξασφαλίζει την επιθυμητή συχνότητα φωτογράφισης και ο μικροκινητήρας στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα (στροφή κ).

6.1.2 Χρησιμοποιούμενη φωτομηχανή

Η χρησιμοποιούμενη αναλογική μηχανή αεροφωτογράφισης ήταν η **RMK TOP15**. Προέρχεται από την κατασκευάστρια εταιρεία *Zeiss Oberkochen*, σήμερα πλέον τμήμα της ενοποιημένης *Zeiss*, η οποία διαθέτει το σύστημα μετρητικών μηχανών εναερίων λήψεων *RMK TOP* με γυροσκοπική ανάρτηση, καθώς και με δυνατότητα σύνδεσης με δέκτη *GPS* και ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 6-1: Η μηχανή RMK TOP15

- (1) Τηλεσκόπιο πλοήγησης T-NT
- (2) Μονάδα χειρισμού T-CU
- (3) Σώμα μηχανής με θάλαμο φιλμ T-MC
- (4) Βάση τοποθέτησης με γυροσκοπική ανάρτηση T-AS
- (5) Τερματικό ελέγχου T-TL

Οι μηχανές αυτές διαθέτουν αυτόματη μέτρηση και ρύθμιση φωτισμού και, από το 1984, μηχανισμό αντιστάθμισης της πρόσθιας κίνησης της εικόνας (FMC). Το σύστημα έχει δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης της κατά μήκος επικάλυψης και της απόκλισης, καθώς επίσης και αυτόματης οριζοντίωσης κατά φ , έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνο από τον κυβερνήτη του αεροσκάφους (Γεωργόπουλος & Χλιβερού, 2003).

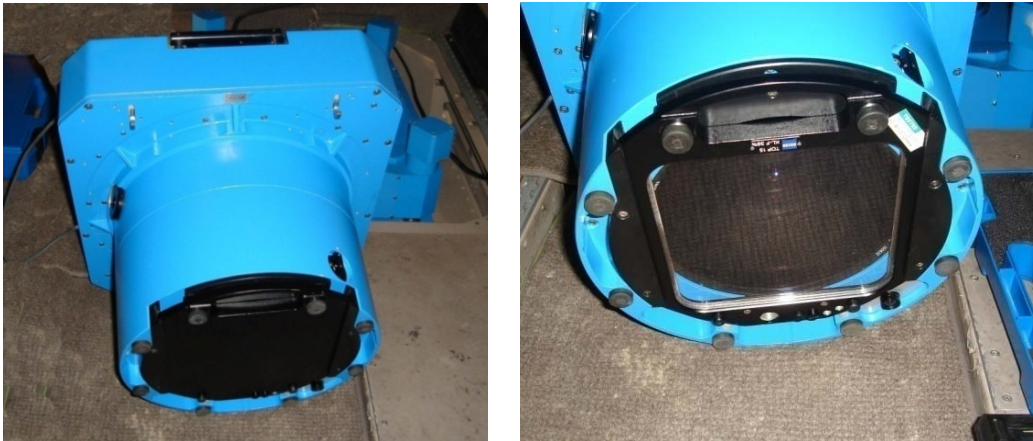
Τα **χαρακτηριστικά** του συστήματος έχουν ως εξής:

☞ Σώμα Μηχανής

- Φακός: Ευρυγώνιος φακός *Pleogon A3*, εστιακής απόστασης 153mm, οπτικού πεδίου 93° , διάφραγμα f/4-f/22 συνεχόμενα και διαστροφής $\pm 3 \mu\text{m}$.
- Κλείστρο: Περιστρεφόμενο κλείστρο με 50ms σταθερό χρόνο έκθεσης
- Εικονοσήματα: 8 εικονοσήματα (στις γωνίες και τα μέσα των πλευρών), αποτελούμενα από γραμμές σχήματος σταυρού με πάχος γραμμής 50 μm και με κέντρο ένα σημείο διαμέτρου 100 μm .
- Βοηθητικά στοιχεία: Αποτυπώνονται σε περιοχή 210mm x 10mm, που βρίσκεται στην κατεύθυνση της πτήσης στο πάνω μέρος του πλαισίου. Εκεί υπάρχουν: Μετρητής

εικόνων τεσσάρων ψηφίων, επισήμανση λειτουργίας *FMC*, ένδειξη τύπου μηχανής και σειριακού αριθμού της και δυο σειρές, προγραμματιζόμενων από τον χρήστη, 48 αλφαριθμητικών χαρακτήρων.

- Μετρητές: Ωρών λειτουργίας και αριθμού εκθέσεων.
- Δυνατότητα προσαρμογής φίλτρων. Για τη συγκεκριμένη φωτογράφιση, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο τύπου B.
- Βάρος: 60 Kg.



Εικόνα 6-2: Σώμα μηχανής RMK TOP15

☞ Τερματικό Ελέγχου T-TL

Μικρός, συμπαγής υπολογιστής με 1MB μνήμη *RAM*, αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο εισαγωγής στοιχείων και οθόνη 8 γραμμών των 40 χαρακτήρων η κάθε μια. Διαθέτει επίσης δυο σειριακές θύρες *RS-232*, μέσω των οποίων γίνεται η διασύνδεση με *H/Y* για την ανταλλαγή δεδομένων. Το βάρος του είναι 1,7 Kg.

☞ Αποθήκη φωτογραφικού υλικού (φίλμ) T-MC

Η «αποθήκη» αυτή δέχεται φιλμ πλάτους 240mm και μήκους 150m, για πάχος φιλμ 0,10 mm. Η ένδειξη διαθεσιμότητας είναι αναλογική στο μηχανισμό αποθήκευσης (επάνω μέρος) και ψηφιακή στο τερματικό της μηχανής. Η επιπεδότητα εξασφαλίζεται με πλάκα πίεσης και με μια ακρίβεια $\pm 5 \mu\text{m}$. Στο ίδιο τμήμα βρίσκεται και ο μηχανισμός αντιστάθμισης της πρόσθιας κίνησης (*FMC*) με ένα εύρος ταχύτητας 0-64mm/s. Το βάρος του θαλάμου χωρίς φιλμ είναι 21 Kg και με φιλμ 150m ανέρχεται στα 28,9 Kg. Για τη συγκεκριμένη φωτογράφιση χρησιμοποιήθηκε παγχρωματικό φιλμ τύπου *AniaphotPan 80* με πάχος βάσης 0.10mm.



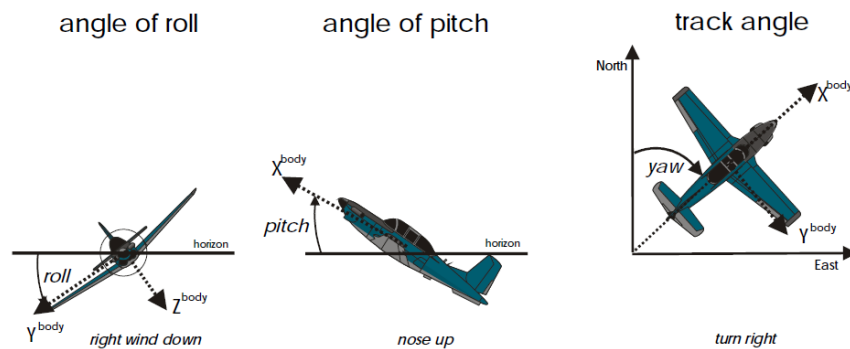
Εικόνα 6-3: Αποθήκη φωτογραφικού υλικού T-MC

☞ Βάση σταθεροποίησης T-AS

Οι γωνίες κίνησης της βάσης για αποκατάσταση της οριζοντίωσης της μηχανής, έχουν ως εξής: *Drift: ±30°, Pitch: ±5°, Roll: ±5°*. Το είδος των γωνιών αυτών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-5, που ακολουθεί. Η ταχύτητα αποκατάστασης τους, κυμαίνεται στις 10°/sec, ενώ ένας τυπικός παράγοντας σταθεροποίησης της βάσης είναι 1:30. Το βάρος της κυμαίνεται στα 20,5 Kg.

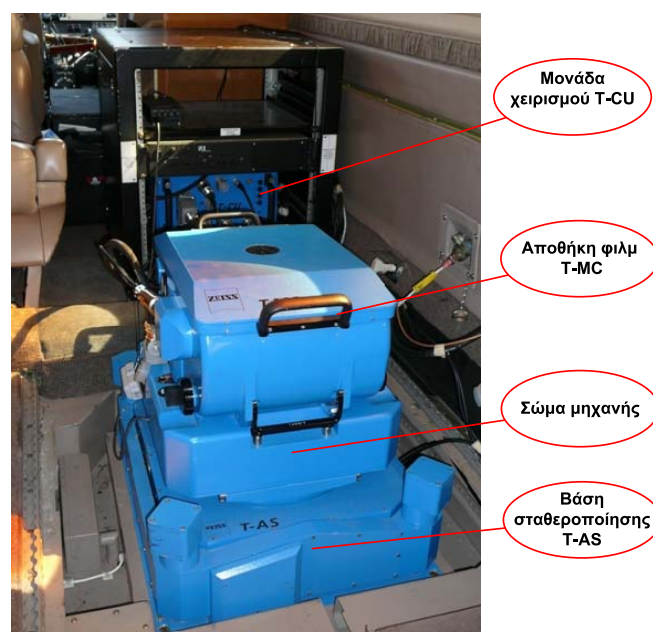


Εικόνα 6-4: Βάση σταθεροποίησης T-AS



Εικόνα 6-5: Γωνίες αεροσκάφους, που καλείται να αποκαταστήσει η βάση

☞ Μονάδα χειρισμού T-CU



Εικόνα 6-6: Τοποθέτηση μηχανής στο αεροσκάφος

Μέσω αυτής επιτυγχάνεται ο κεντρικός έλεγχος του συστήματος, διαθέτοντας μονάδα

υποστήριξης και διεπαφής με μικροεπεξεργαστή. Από αυτή γίνεται η διασύνδεση με Η/Υ, καθώς και η ηλεκτρική τροφοδοσία του συστήματος με μια τάση λειτουργίας 24-30.5 Volt DC. Το βάρος της είναι 11,7 Kg.

Το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος, λαμβανομένων υπ' όψη όλων των παρελκόμενων του, κυμαίνεται από -20° C έως +50° C, ενώ η θερμοκρασία αποθήκευσης του από -40° C έως +70° C. Το συνολικό βάρος όλων των εξαρτημάτων κυμαίνεται στα 175,3 Kg περίπου.

☞ Διασύνδεση με Η/Υ

Όπως αναφέρθηκε, η μηχανή διαθέτει τη δυνατότητα διασύνδεσης με Η/Υ και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, η οποία μέσω κατάλληλου λογισμικού και παράλληλη χρήση GPS επιτρέπει τη λήψη εικόνων βάσει του προγραμματισμού πτήσης σε προκαθορισμένες θέσεις. Με αυτόν τον τρόπο εκτελέστηκε η φωτογράφιση του πεδίου, καθώς η ΓΥΣ δεν διαθέτει INS.



Εικόνα 6-7: Χρήση Η/Υ κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης

6.1.3 Πτητικά μέσα αεροφωτογραφήσεων - Γενικά

Τα αεροπλάνα που προορίζονται για αποστολές αεροφωτογραφήσεων, θα πρέπει να διαθέτουν κάποια γενικά χαρακτηριστικά, ώστε να διασφαλίζονται τα επιθυμητά αποτελέσματα στις αεροφωτογραφίες. Κάποια από αυτά είναι:

- Μεγάλα ύψη πτήσης για αεροφωτογραφίες σε μικρές κλίμακες (οπότε αναγκαστικά οι θάλαμοι του αεροπλάνου είναι υπό πίεση).
- Μεγάλη σταθερότητα πτήσης, ειδικά σε χαμηλές πτήσεις και ελάχιστες δυνατές δονήσεις.
- Δυνατότητες μεγάλης διαφοράς στις ταχύτητες πτήσης: μικρή ταχύτητα για μεγάλες κλίμακες και το αντίθετο, έτσι ώστε να μειώνεται ο χρόνος πτήσης και να εκμεταλλευόμαστε το περισσότερο δυνατό τις κατάλληλες ατμοσφαιρικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, καθαρότητα, κλπ.).
- Μεγάλη αυτονομία πτήσεων.
- Δυνατότητα περισσότερων ανοιγμάτων στο κέλυφος του αεροπλάνου, έτσι ώστε να εγκαθίστανται περισσότερες φωτογραφικές μηχανές που φωτογραφίζουν ταυτόχρονα, αλλά με φιλμ διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Επειδή είναι αρκετά δύσκολο στον ίδιο οργανισμό να διαθέτει αεροπλάνα με όλες αυτές τις δυνατότητες, χρησιμοποιούνται διαφόρων τύπων αεροπλάνα, όπως με έλικες για χαμηλές πτήσεις και συνεπώς για μεγάλες κλίμακες και με τουρμπίνες για υψηλές πτήσεις.

6.1.4 Χρησιμοποιούμενο πτητικό μέσο

Για την εκτέλεση της αεροφωτογράφισης, χρησιμοποιήθηκε αεροσκάφος τύπου **C-12** της Αεροπορίας Στρατού (Εικόνα 6-8). Το C-12 είναι η στρατιωτική έκδοση του *Beechcraft Super King Air*, κατασκευασμένο από την *Raytheon Aircraft Company (RAC)*. Το 1976 παρελήφθη από την ελληνική Αεροπορία Στρατού ένα Α/Φ C-12A το οποίο εκσυγχρονίστηκε το 1998 στη Γερμανία στην έκδοση "C". Το 1999 υπεγράφη η σύμβαση για την προμήθεια 2 Α/Φ C-12RA/P και ενός συγχρόνου συστήματος φωτομηχανής τύπου *RMK TOP* για την

κάλυψη των αναγκών της αεροφωτογράφισης των Ενόπλων Δυνάμεων. Η βασική αποστολή του τύπου "C", είναι η μετακίνηση της πολιτικοστρατιωτικής ηγεσίας ενώ του τύπου "R/AP", το οποίο μπορεί να έχει διπλή διαμόρφωση, είναι η εκτέλεση αεροφωτογράφισης.

Επιχειρησιακή Χρησιμοποίηση	Μετακίνηση Ηγεσίας/Αεροφωτογράφιση
Εταιρεία κατασκευής	Raytheon Aircraft (Beech)
Κινητήρες	2 Pratt & Whitney PT-6A-42 turboprop; 850 HP έκαστος
Μήκος	43 feet 10 inc (13,3m)
Υψος	15 feet (4,57m)
Πλήρωμα	2 Χειριστές, 1 Μηχανοσυνθέτης
Επιβάτες	7 ("C" Model) /6("R" Model)/1 φωτοναυτίλος("R" Model)
Μέγιστη ταχύτητα	260 knots (480km/h)
Ταχύτητα πλεύσης	220 knots (407km/h)
Οροφή	31.000 feet ("C" Model) /35.000 feet ("R" Model)
Ακτίνα δράσης	1710 Nm (3.170km) (α)
Αυτονομία	5 ώρες 30 λεπτά (α)
Παρατηρήσεις	(α) Ενδεικτικά. Ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες και το ύψος πτήσης

Πίνακας 6-1: Χαρακτηριστικά αεροσκάφους C-12

Πηγή: www.army.gr



Εικόνα 6-8: Αεροσκάφος C-12

Πηγή: www.army.gr

6.1.5 Λογισμικό

Το απαιτούμενο λογισμικό για τη φωτογράφιση του πεδίου ήταν αυτό του προγραμματισμού πτήσης: *Z/I mission* και το λογισμικό συνεργασίας της μηχανής με Η/Υ για την παρακολούθηση και έλεγχο της φωτογράφισης.

6.2 Επεξεργασία Εικόνων

6.2.1 Υλικό σάρωσης

Για τη **σάρωση του φιλμ** χρησιμοποιήθηκε ο φωτογραμμετρικός σαρωτής της ΓΥΣ, τύπου *Leica DSW700*, σε συνεργασία με συνδεδεμένο Η/Υ με κατάλληλο λογισμικό.



Εικόνα 6-9: Φωτογραμμετρικός σαρωτής Leica DSW700

Πηγή: www.gis.leica-geosystems.com

Ο σαρωτής έχει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- Δυνατότητα απευθείας σάρωσης θετικού ή αρνητικού φιλμ ή γυάλινης πλάκας οποιουδήποτε πάχους με υψηλή ταχύτητα έγχρωμα ή ασπρόμαυρα και διαστάσεων πάνω από 260x260 mm².
- Διάταξη αισθητήρων CCD μεγάλου φορμάτ 12-bit. Σε συνδυασμό με τον 120mm χρωματικά διορθωμένο φακό του, μπορεί να σαρώσει οπτικά και χωρίς παρεμβολή με ένα μέγεθος εικονοψηφίδας από 4.5μm-22μm, μέγεθος που μπορεί να φτάσει ως τα 3μm, αν χρησιμοποιηθεί ο φακός των 80mm.
- Ισχυρή μηχανική κατασκευή, που εξασφαλίζει την κίνηση του φιλμ κατά τις x,y διευθύνσεις κάτω από τη πηγή φωτός και πάνω από το φακό και το CCD.

6.2.2 Υλικό επεξεργασίας εικόνων

Για τη μετέπειτα επεξεργασία και εκτέλεση εργασιών επί των εικόνων, χρησιμοποιήθηκαν προσωπικοί Η/Υ εξοπλισμένοι με το απαραίτητο λογισμικό, καθώς η ποικιλία των λειτουργικών συστημάτων δεν επέτρεπε τη λειτουργία του απαιτούμενου κάθε φορά λογισμικού σε έναν μόνο υπολογιστή.

6.2.3 Λογισμικό σάρωσης

Απαραίτητη για τη λειτουργία του σαρωτή ήταν η συνεργασία με Η/Υ με πλατφόρμα Windows® XP Professional και η ύπαρξη των προγραμμάτων: *Leica SCAN*, *Image Utilities* και *FastDODGE*, τα οποία συνόδευαν τον σαρωτή.

6.2.4 Λογισμικό επεξεργασίας ραδιομετρίας εικόνων

Πραγματοποιήθηκε επεξεργασία ιστογράμματος κάθε μιας εικόνας στο *photoshop*, ώστε να βελτιωθεί η αντίθεσή της, για τον ευκολότερο εντοπισμό των στόχων.

6.2.5 Λογισμικό εκτέλεσης προσανατολισμών, μέτρησης συντεταγμένων στο σύστημα της εικόνας και αεροτριγωνισμού

Για τις εργασίες αυτές, χρησιμοποιήθηκε το *LPS (Leica Photogrammetric Suite)* της *ERDAS IMAGINE (v9.2)*. Το *LPS* αποτελεί ένα εύχρηστο και ολοκληρωμένο ψηφιακό φωτογραμμετρικό πακέτο που επιτρέπει με ακρίβεια και ταχύτητα, την εκτέλεση τριγωνισμού και ορθοαναγωγής εικόνων, που έχουν συλλεχθεί με τη βοήθεια διαφόρων τύπων δεκτών, συμπεριλαμβανομένων και των δορυφορικών.

Η συγκεκριμένη έκδοση χρησιμοποιεί επίσης τη μέθοδο της συνόρθωσης δέσμης με αυτοβαθμονόμηση στη διαδικασία του αεροτριγωνισμού, προσδιορίζοντας έτσι την

εσωτερική γεωμετρία κάθε εικόνας. Το *LPS* όμως χαρακτηρίζεται από την κατασκευάστρια εταιρεία, ως ένα καθαρά ψηφιακό φωτογραμμετρικό λογισμικό και **όχι** ως λογισμικό βαθμονόμησης μηχανών. Ωστόσο ενσωματώνει πέντε διαφορετικές ομάδες επιπρόσθετων παραμέτρων, για την αποκατάσταση των σφαλμάτων των εικόνων μιας **αναλογικής μηχανής**, με τη μία από αυτές να δίνει τις παραμέτρους της διαστροφής των φακών. Αυτές όμως αναμένεται να είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες ενός πιστοποιητικού βαθμονόμησης, λόγω των διαφορετικών επιπέδων ακρίβειας και του συνόλου των ρυθμίσεων που επιλέγονται.

Λόγω της χρήσης επιπλέον λογισμικού για την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού και βαθμονόμησης, το *LPS* αποδείχτηκε απαραίτητο **μόνο** για τις διαδικασίες των προσανατολισμών και της μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων των σημείων. Τα αποτελέσματα αεροτριγωνισμού και βαθμονόμησης εξήχθησαν για σύγκριση με τα αντίστοιχα ενός περισσότερο προσανατολισμένου προς τις απαιτήσεις αυτές, λογισμικού και η αξιολόγηση της αξιοπιστίας τους ή όχι μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο έρευνας σε άλλη εργασία μελλοντικά.

6.2.6 Λογισμικό συνόρθωσης

Η εξαγωγή των παραμέτρων βαθμονόμησης, πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα *BINGO-F* (v 5.0). Το *BINGO-F* είναι ένα από τα πιο πλήρη και αποτελεσματικά συστήματα για τον προσδιορισμό φωτογραμμετρικών και τοπογραφικών σημείων. Με το πρόγραμμα αυτό μπορούν να εκτελεστούν εργασίες επίγειας φωτογραμμετρίας, αεροτριγωνισμού καθώς και συνορθώσεις γεωδαιτικών τρισδιάστατων δικτύων. Στον σχεδιασμό του έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία ενός αυστηρού μαθηματικού μοντέλου με ιδιαίτερη ευελιξία στην εφαρμογή όλων των δυνατών συναρτήσεων, καθώς και στην δημιουργία ενός διαφοροποιημένου στοχαστικού μοντέλου.

Το *BINGO-F* είναι μια ευέλικτη εφαρμογή επίλυσης αεροτριγωνισμού και φωτοτριγωνισμού, καθώς έχει τη δυνατότητα συνόρθωσης με πολλών ειδών δεδομένα. Μπορεί να συνορθώσει εικόνες με ασυνήθιστες γωνίες ω , φ και κ καθώς και μεγάλες διαφορές γωνιών $\Delta\varphi$, $\Delta\omega$ και $\Delta\kappa$ μεταξύ διαφορετικών εικόνων. Έχει επίσης την δυνατότητα ταυτόχρονης επίλυσης του γεωδαιτικού δικτύου των φωτοσταθερών μαζί με το φωτογραμμετρικό δίκτυο και με μετρήσεις από *GPS*, το οποίο είναι τοποθετημένο στο αεροσκάφος που κάνει τις λήψεις και υπολογίζει τις συντεταγμένες των κέντρων προβολής. Το πρόγραμμα εφαρμόζει τη μέθοδο συνόρθωσης κατά δέσμες. Είναι γραμμένο σε γλώσσα *FORTRAN* και λειτουργεί μέσα από παραθυρικό περιβάλλον σε *WINDOWS* ή μέσα από παράθυρο *DOS prompt* για εξειδικευμένους χρήστες. Η γλώσσα πάνω στην οποία αναπτύχθηκε θέτει από μόνη της κάποιους περιορισμούς. Ο βασικότερος περιορισμός είναι η ανάγνωση δεδομένων τα οποία θα έχουν συγκεκριμένη μορφή και στοιχειοθεσία, ώστε να είναι δυνατή η προσπέλασή τους. Οι απαιτήσεις του σε υπολογιστική ισχύ από το σύστημα είναι μικρές.

Επιπρόσθετα σε αυτό χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα *DGAP*, το οποίο είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα, του Ινστιτούτου Φωτογραμμετρίας του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης. Ενσωματώνει και αυτό τη μέθοδο της συνόρθωσης κατά δέσμες, δίνει τη δυνατότητα επιλογής επιπρόσθετων παραμέτρων διαφόρων τύπων για τη βαθμονόμηση της μηχανής (ψηφιακής ή και αναλογικής), χωρίς ωστόσο να έχει την αναγνωριστικότητα του *BINGO-F*. Αποτελεί όμως ένα εργαλείο, με πρόσβαση στον καθένα για εργασίες αυτού του είδους, στοιχείο που θα αξιολογηθεί στην παρούσα εργασία.

7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μέθοδος βαθμονόμησης, που επιλέχθηκε να εφαρμοστεί στη παρούσα διπλωματική εργασία. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση του πεδίου ελέγχου που φωτογραφήθηκε και αναλύονται όλες οι διαδικασίες που αφορούν την προετοιμασία για τη λήψη και τη σάρωση των εικόνων, τις μετρήσεις σε αυτές και την εκτέλεση των προγραμμάτων εξαγωγής των παραμέτρων βαθμονόμησης.

7.1 Επιλεγείσα Μέθοδος Βαθμονόμησης

Στο Κεφάλαιο 4 έγινε μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης και συνοπτικής παρουσίασης των περισσότερο γνωστών μεθόδων βαθμονόμησης. Εδώ θα αναλυθεί η επιλεγείσα προς εφαρμογή μέθοδος, που είναι η **συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση**.

Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζονται στη συνέχεια οι βασικές αρχές της μεθόδου της συνόρθωσης δέσμης, που αποτελεί μια από τις μεθόδους αεροτριγωνισμού και η οποία με την εισαγωγή στις εξισώσεις παρατήρησης διορθωτικών πολυωνύμων, των οποίων οι συντελεστές προσδιορίζονται κατά την επίλυση, καλείται **συνόρθωση μπλοκ κατά δέσμες με πρόσθετες παραμέτρους ή συνόρθωση μπλοκ κατά δέσμες με αυτοβαθμονόμηση** (Kraus, 2003).

7.1.1 Μαθηματικό μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου της **συνόρθωσης δέσμης με αυτοβαθμονόμηση (self-calibration)**, ενσωματώνει την αναλυτική προσέγγιση της χρήσης της **εξίσωσης της συγγραμμικότητας**, όπου έχουν εισαχθεί πρόσθετες παράμετροι, προκειμένου να περιγράψουν τις αποκλίσεις από την ιδανική κεντρική προβολή, όπως για παράδειγμα η διαστροφή του φακού (Παράγραφος 3.7).

☞ Απλοποιημένη Προσέγγιση Συνθήκης Συγγραμμικότητας

Οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας, **στην απλούστερή τους μορφή**, έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} x &= x_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} = x_o - \frac{A_1}{\Pi} \\ y &= y_o - c \frac{r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} = y_o - \frac{A_2}{\Pi} \end{aligned} \quad (7.1-1)$$

Για τις ανάγκες της συνόρθωσης των φωτογραμμετρικών παρατηρήσεων απαιτείται να γραμμικοποιηθούν οι εξισώσεις αυτές, πράγμα που γίνεται με ανάπτυξη τους σε σειρά κατά *Taylor*. Οι (7.1-1) εκφράζονται ως:

$$\begin{aligned} x &= f_x(c, x_o, y_o, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa, X, Y, Z) \\ y &= f_y(c, x_o, y_o, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa, X, Y, Z) \end{aligned} \quad (7.1-2)$$

Εάν $c^o, x_o^o, y_o^o, X_o^o, Y_o^o, Z_o^o, \omega^o, \phi^o, \kappa^o, X^o, Y^o, Z^o$ είναι προσεγγιστικές τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων, η γραμμικοποιημένη κατά *Taylor* μορφή των (7.1-1) είναι:

$$x = f_x^o + \frac{\partial f_x}{\partial X_o} \delta X_o + \frac{\partial f_x}{\partial Y_o} \delta Y_o + \frac{\partial f_x}{\partial Z_o} \delta Z_o + \frac{\partial f_x}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial f_x}{\partial \phi} \delta \phi + \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} \delta \kappa +$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial X} \delta X + \frac{\partial f_x}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial f_x}{\partial Z} \delta Z + \frac{\partial f_x}{\partial x_o} \delta x_o + \frac{\partial f_x}{\partial y_o} \delta y_o + \frac{\partial f_x}{\partial c} \delta c \Rightarrow \quad (7.1-3)$$

$$x = f_x^o + a_1 \delta X_o + a_2 \delta Y_o + a_3 \delta Z_o + a_4 \delta \omega + a_5 \delta \phi + a_6 \delta \kappa + a_7 \delta X + a_8 \delta Y + a_9 \delta Z$$

$$+ a_{10} \delta x_o + a_{11} \delta y_o + a_{12} \delta c$$

$$y = f_y^o + \frac{\partial f_y}{\partial X_o} \delta X_o + \frac{\partial f_y}{\partial Y_o} \delta Y_o + \frac{\partial f_y}{\partial Z_o} \delta Z_o + \frac{\partial f_y}{\partial \omega} \delta \omega + \frac{\partial f_y}{\partial \phi} \delta \phi + \frac{\partial f_y}{\partial \kappa} \delta \kappa +$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial X} \delta X + \frac{\partial f_y}{\partial Y} \delta Y + \frac{\partial f_y}{\partial Z} \delta Z + \frac{\partial f_y}{\partial x_o} \delta x_o + \frac{\partial f_y}{\partial y_o} \delta y_o + \frac{\partial f_y}{\partial c} \delta c \Rightarrow \quad (7.1-4)$$

$$y = f_y^o + \beta_1 \delta X_o + \beta_2 \delta Y_o + \beta_3 \delta Z_o + \beta_4 \delta \omega + \beta_5 \delta \phi + \beta_6 \delta \kappa + \beta_7 \delta X + \beta_8 \delta Y + \beta_9 \delta Z$$

$$+ \beta_{10} \delta x_o + \beta_{11} \delta y_o + \beta_{12} \delta c$$

Για κάθε ζεύγος παρατηρήσεων ενός σημείου i στην φωτογραφία j , οι παραπάνω γραμμικοποιημένες εξισώσεις παρατηρήσεων γράφονται υπό μορφή πινάκων:

$$b_{ji} = \dot{A}_{ji} \dot{x}_j + \ddot{A}_{ji} \ddot{x}_i + D_{ji} y + v_{ji} \quad (7.1-5)$$

Όπου το διάνυσμα με μια τελεία \dot{x}_j αναφέρεται στα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, με δυο τελείες \ddot{x}_i στις συντεταγμένες των σημείων του αντικειμένου και το διάνυσμα y στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού.

Οι πίνακες της (7.1-5) αναλύονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x' - x_o \\ y' - y_o \end{bmatrix}_{ji} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial X_o} & \frac{\partial f_x}{\partial Y_o} & \frac{\partial f_x}{\partial Z_o} & \frac{\partial f_x}{\partial \omega} & \frac{\partial f_x}{\partial \phi} & \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial f_y}{\partial X_o} & \frac{\partial f_y}{\partial Y_o} & \frac{\partial f_y}{\partial Z_o} & \frac{\partial f_y}{\partial \omega} & \frac{\partial f_y}{\partial \phi} & \frac{\partial f_y}{\partial \kappa} \end{bmatrix}_{ji} \begin{bmatrix} \delta X_o \\ \delta Y_o \\ \delta Z_o \\ \delta \omega \\ \delta \phi \\ \delta \kappa \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \end{bmatrix}_{ji} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}_i \quad (7.1-6)$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x_o} & \frac{\partial f_x}{\partial y_o} & \frac{\partial f_x}{\partial c} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x_o} & \frac{\partial f_y}{\partial y_o} & \frac{\partial f_y}{\partial c} \end{bmatrix}_{ji} \begin{bmatrix} \delta x_o \\ \delta y_o \\ \delta c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{ji}$$

Η έκφραση των παραγώγων, που εμφανίζονται στις (7.1-3) και (7.1-4) έχουν ως εξής:

$$\alpha_1 = \frac{\partial F_x}{\partial X_o} = \frac{c}{\Pi^2} (-A_1 r_{31} + \Pi r_{11})$$

$$\alpha_2 = \frac{\partial F_x}{\partial Y_o} = \frac{c}{\Pi^2} (-A_1 r_{32} + \Pi r_{12}) \quad (7.1-7)$$

$$\alpha_3 = \frac{\partial F_x}{\partial Z_o} = \frac{c}{\Pi^2} (-A_1 r_{33} + \Pi r_{13})$$

$$\alpha_4 = \frac{\partial F_x}{\partial \omega} = -\frac{c}{\Pi^2} [\Pi(-r_{13}(Y - Y_o) + r_{12}(Z - Z_o)) - A_1(-r_{33}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o))]$$

$$\begin{aligned}
\alpha_5 &= \frac{\partial F_x}{\partial \phi} = -\frac{c}{\Pi^2} [\Pi(f_{11}(X - X_o) + f_{12}(Y - Y_o) + f_{13}(Z - Z_o)) \\
&\quad - A_1(f_{31}(X - X_o) + f_{32}(Y - Y_o) + f_{33}(Z - Z_o))] \\
\alpha_6 &= \frac{\partial F_x}{\partial k} = -\frac{c}{\Pi^2} [r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)] \\
\alpha_7 &= \frac{\partial F_x}{\partial X_i} = -\frac{\partial F_x}{\partial X_o} = -\alpha_1 \quad \alpha_8 = \frac{\partial F_x}{\partial Y_i} = -\frac{\partial F_x}{\partial Y_o} = -\alpha_2 \quad \alpha_9 = \frac{\partial F_x}{\partial Z_i} = -\frac{\partial F_x}{\partial Z_o} = -\alpha_3 \\
\alpha_{10} &= \frac{\partial F_x}{\partial x_o} = 1 \quad \alpha_{11} = \frac{\partial F_x}{\partial y_o} = 0 \quad \alpha_{12} = \frac{\partial F_x}{\partial c} = -\frac{A_1}{\Pi} \\
\beta_1 &= \frac{\partial F_y}{\partial X_o} = \frac{c}{\Pi^2} (-A_2 r_{31} + \Pi r_{21}) \\
\beta_2 &= \frac{\partial F_y}{\partial Y_o} = \frac{c}{\Pi^2} (-A_2 r_{32} + \Pi r_{22}) \\
\beta_3 &= \frac{\partial F_y}{\partial Z_o} = \frac{c}{\Pi^2} (-A_2 r_{33} + \Pi r_{23}) \\
\beta_4 &= \frac{\partial F_y}{\partial \omega} = -\frac{c}{\Pi^2} [\Pi(-r_{23}(Y - Y_o) + r_{22}(Z - Z_o)) - A_2(-r_{33}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o))] \\
\beta_5 &= \frac{\partial F_y}{\partial \phi} = -\frac{c}{\Pi^2} [\Pi(f_{21}(X - X_o) + f_{22}(Y - Y_o) + f_{23}(Z - Z_o)) \\
&\quad - A_2(f_{31}(X - X_o) + f_{32}(Y - Y_o) + f_{33}(Z - Z_o))] \\
\beta_6 &= \frac{\partial F_y}{\partial k} = -\frac{c}{\Pi^2} [-r_{11}(X - X_o) - r_{12}(Y - Y_o) - r_{13}(Z - Z_o)] \\
\beta_7 &= \frac{\partial F_y}{\partial X_i} = -\frac{\partial F_y}{\partial X_o} = -\beta_1 \quad \beta_8 = \frac{\partial F_y}{\partial Y_i} = -\frac{\partial F_y}{\partial Y_o} = -\beta_2 \quad \beta_9 = \frac{\partial F_y}{\partial Z_i} = -\frac{\partial F_y}{\partial Z_o} = -\beta_3 \\
\beta_{10} &= \frac{\partial F_y}{\partial x_o} = 0 \quad \beta_{11} = \frac{\partial F_y}{\partial y_o} = 1 \quad \beta_{12} = \frac{\partial F_y}{\partial c} = -\frac{A_2}{\Pi}
\end{aligned} \tag{7.1-8}$$

☞ Συνθήκη Συγγραμμικότητας με Πρόσθετες Παραμέτρους

Στην Παράγραφο 3.7.2 αναλύθηκε το θέμα της επιλογής των επιπρόσθετων παραμέτρων και της εισαγωγής τους στη συνθήκη συγγραμμικότητας. Θεωρώντας την απλή περίπτωση ενός παραμετρικού μοντέλου a_q πλήθους συντελεστών, η εξίσωση (7.1-1) λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
x &= x_o - c \frac{A_1}{\Pi} + \Delta x \\
y &= y_o - c \frac{A_2}{\Pi} + \Delta y
\end{aligned} \tag{7.1-9}$$

Για κάθε ζεύγος παρατηρήσεων ενός σημείου i στην φωτογραφία j , **όμοια προς την (7.1-5)**: $b_{ji} = \dot{A}_{ji} \dot{x}_j + \ddot{A}_{ji} \ddot{x}_i + D_{ji} y + v_{ji}$, δημιουργούνται οι παρακάτω γραμμικοποιημένες εξισώσεις παρατηρήσεων:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x'-x_o \\ y'-y_o \end{bmatrix}_{ji} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial X_o} & \frac{\partial f_x}{\partial Y_o} & \frac{\partial f_x}{\partial Z_o} & \frac{\partial f_x}{\partial \omega} & \frac{\partial f_x}{\partial \phi} & \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial f_y}{\partial X_o} & \frac{\partial f_y}{\partial Y_o} & \frac{\partial f_y}{\partial Z_o} & \frac{\partial f_y}{\partial \omega} & \frac{\partial f_y}{\partial \phi} & \frac{\partial f_y}{\partial \kappa} \end{bmatrix}_{ji} \begin{bmatrix} \delta X_o \\ \delta Y_o \\ \delta Z_o \\ \delta \omega \\ \delta \phi \\ \delta \kappa \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial x}{\partial Z} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Z} \end{bmatrix}_{ji} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x_o} & \frac{\partial f_x}{\partial y_o} & \frac{\partial f_x}{\partial c} & \frac{\partial f_x}{\partial a_1} & \frac{\partial f_x}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial a_q} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x_o} & \frac{\partial f_y}{\partial y_o} & \frac{\partial f_y}{\partial c} & \frac{\partial f_y}{\partial a_1} & \frac{\partial f_y}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_y}{\partial a_q} \end{bmatrix}_{ji} \begin{bmatrix} \delta x_o \\ \delta y_o \\ \delta c \\ \delta a_1 \\ \delta a_2 \\ \vdots \\ \delta a_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{ji}
\end{aligned} \tag{7.1-10}$$

Αν για παράδειγμα υιοθετηθεί το σύνηθες μοντέλο των επιπρόσθετων παραμέτρων, που δίνει την επίδραση για ακτινική και εφαπτομενική διαστρόφη με τις παραμέτρους a_q να παίρνουν την τιμή a_1 έως a_4 (K_1, K_2, P_1, P_2) όπως στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
\Delta x_r &= (x - x_o)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \\
\Delta y_r &= (y - y_o)(K_1 r^2 + K_2 r^4) \\
\Delta x_d &= P_1(r^2 + 2(x - x_o)^2) + 2P_2(x - x_o)(y - y_o) \\
\Delta y_d &= 2P_1(x - x_o)(y - y_o) + P_2(r^2 + 2(y - y_o)^2)
\end{aligned} \tag{7.1-11}$$

Οι (7.1-3) και (7.1-4) γίνονται αντίστοιχα:

$$\begin{aligned}
x &= f_x^o + a_1 \delta X_o + a_2 \delta Y_o + a_3 \delta Z_o + a_4 \delta \omega + a_5 \delta \phi + a_6 \delta \kappa + a_7 \delta X + a_8 \delta Y + a_9 \delta Z \\
&+ a_{10} \delta x_o + a_{11} \delta y_o + a_{12} \delta c + a_{13} \delta K_1 + a_{14} \delta K_2 + a_{15} \delta P_1 + a_{16} \delta P_2
\end{aligned} \tag{7.1-12}$$

$$\begin{aligned}
y &= f_y^o + \beta_1 \delta X_o + \beta_2 \delta Y_o + \beta_3 \delta Z_o + \beta_4 \delta \omega + \beta_5 \delta \phi + \beta_6 \delta \kappa + \beta_7 \delta X + \beta_8 \delta Y + \beta_9 \delta Z \\
&+ \beta_{10} \delta x_o + \beta_{11} \delta y_o + \beta_{12} \delta c + \beta_{13} \delta K_1 + \beta_{14} \delta K_2 + \beta_{15} \delta P_1 + \beta_{16} \delta P_2
\end{aligned} \tag{7.1-13}$$

Σε αυτές τις σχέσεις οι συντελεστές a_1 - a_9, a_{12} και β_1 - β_9, β_{12} παραμένουν ως έχουν στις ομάδες εξισώσεων (7.1-7) και (7.1-8). Οι a_{10}, a_{11}, a_{13} - a_{16} και $\beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{13}$ - β_{16} , δίνονται πλέον από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}
a_{10} &= \frac{\partial F_x}{\partial x_o} = 1 - K_1 [3(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2] - K_2 [5(x - x_o)^4 - 6(x - x_o)^2(y - y_o)^2 \\
&- (y - y_o)^4] - 6P_1(x - x_o) - 2P_2(y - y_o) \\
a_{11} &= \frac{\partial F_x}{\partial y_o} = -2K_1(x - x_o)(y - y_o) - 4K_2 [(x - x_o)^3(y - y_o) + (x - x_o)(y - y_o)^3] \\
&- 2P_2(x - x_o) - 2P_1(y - y_o) \\
a_{13} &= \frac{\partial F_x}{\partial K_1} = r^2(x - x_o)^2 \quad a_{14} = \frac{\partial F_x}{\partial K_2} = r^4(x - x_o) \\
a_{15} &= \frac{\partial F_x}{\partial P_1} = r^2 + 2(x - x_o)^2 \quad a_{16} = \frac{\partial F_x}{\partial P_2} = 2(x - x_o)(y - y_o)
\end{aligned} \tag{7.1-14}$$

$$\begin{aligned}
\beta_{10} &= \frac{\partial F_y}{\partial x_o} = -2K_1(x-x_o)(y-y_o) - 4K_2[(x-x_o)^3(y-y_o) + (x-x_o)(y-y_o)^3] \\
&\quad - 2P_2(x-x_o) - 2P_1(y-y_o) \\
\beta_{11} &= \frac{\partial F_y}{\partial y_o} = 1 - K_1[3(y-y_o)^2 + (x-x_o)^2] - K_2[5(y-y_o)^4 - 6(x-x_o)^2(y-y_o)^2 \\
&\quad - (x-x_o)^4] - 2P_1(x-x_o) - 6P_2(y-y_o) \\
\beta_{13} &= \frac{\partial F_y}{\partial K_1} = r^2(y-y_o)^2 \quad \beta_{14} = \frac{\partial F_y}{\partial K_2} = r^4(y-y_o) \\
\beta_{15} &= \frac{\partial F_y}{\partial P_1} = 2(x-x_o)(y-y_o) \quad \beta_{16} = \frac{\partial F_v}{\partial P_2} = r^2 + 2(y-y_o)^2
\end{aligned} \tag{7.1-15}$$

Σε κάθε περίπτωση με πρόσθετες παραμέτρους (και όσες είναι αυτές) ή όχι, για την επίλυση της (7.1-5): $b_{ji} = \dot{A}_{ji}\dot{x}_j + \ddot{A}_{ji}\ddot{x}_i + D_{ji}y + v_{ji}$ ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Όλες οι μερικές παράγωγοι των πινάκων: $\dot{A}_{ji} - \ddot{A}_{ji} - D_{ji}$, υπολογίζονται με τις προσεγγιστικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων, που μπορούν να προκύψουν αν δεν υπάρχει κάποιος άλλος τρόπος γνώσης τους (π.χ. *IMU* για τον εξωτερικό προσανατολισμό) με μεθοδολογίες όπως με εμπροσθοτομίες, οπισθοτομίες και *DLT*. Τα διανύσματα: $\dot{x}_j - \ddot{x}_i - y$, εκφράζουν τις διορθώσεις στις τιμές αυτές.

Κατόπιν των παραπάνω η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων παρατήρησης διαμορφώνεται υπό μορφή πινάκων ως εξής:

$$b = Ax + v \tag{7.1-16}$$

$$\begin{aligned}
x &= (A^T P A)^{-1} (A^T P b) \\
x &= N^{-1} u
\end{aligned} \tag{7.1-17}$$

Όπου:

x Το διάνυσμα που περιέχει τις διορθώσεις για τις άγνωστες παραμέτρους

A Ο πίνακας που περιέχει τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων παρατήρησης (εξισώσεις συγγραμμικότητας), ως προς τους αγνώστους

P Ο πίνακας βαρών

b Το διάνυσμα των παρατηρήσεων

Επειδή το μέγεθος του πίνακα N προκύπτει ιδιαίτερα μεγάλο, με συνέπεια υπολογιστικό φόρτο, αναπτύχθηκαν παράλληλα με τη μέθοδο της δέσμης, τεχνικές διαίρεσης και επιμέρους αναστροφής του, χωρίζοντάς τον σε υποπίνακες (Brown, 1989).

7.1.2 Ακρίβειες

Τα σφάλματα στον αεροτριγωνισμό γενικότερα, υπεισέρχονται σε κάθε βήμα της διαδικασίας του. Ειδικότερα για τις επιλύσεις αεροτριγωνισμού με αυτοβαθμονόμηση, οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των επιλύσεων είναι (Ιωαννίδης, 2008):

- Ο αριθμός, το είδος και ο τρόπος επιλογής των επιπρόσθετων παραμέτρων, καθώς μεγάλος αριθμός παραμέτρων απαιτεί πολλές παρατηρήσεις και συνεπάγεται πολλές φορές τη δημιουργία ανώμαλων ή μαθηματικά ασθενών συστημάτων κανονικών εξισώσεων με μεγάλους συντελεστές συσχέτισης των αγνώστων. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με προσθαφαίρεση παραμέτρων και στατιστικούς ελέγχους.
- Ο αριθμός και η κατανομή των σημείων γνωστών συντεταγμένων, που πρέπει να

βρίσκονται και στο εσωτερικό του μπλοκ.

- Η κατά πλάτος επικάλυψη των εικόνων, που αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο παράγοντα που καθορίζει την αποτελεσματικότητα εξάλειψης των συστηματικών παραμορφώσεων. Όταν αυξάνεται στο 60%, η εξάλειψη των συστηματικών σφαλμάτων είναι περίπου διπλάσια.
- Η φωτογραφική κάλυψη της περιοχής, με διπλά μπλοκ δηλαδή με πτήσεις που έχουν κάθετους άξονες, όπου η ακρίβεια μετά την επίλυση με πρόσθετες παραμέτρους αυξάνεται κατά 50% κατά μέσο όρο, σε σύγκριση με την επίλυση σε απλό μπλοκ.
- Η μέθοδος επίλυσης του αεροτριγωνισμού, καθώς στην επίλυση με πρόσθετες παραμέτρους και τη μέθοδο της δέσμης, ο έλεγχος των συστηματικών παραμορφώσεων είναι πιο εύκολος απ' ότι στην επίλυση με ανεξάρτητα μοντέλα.
- Η ύπαρξη χονδροειδών σφαλμάτων στα σημεία γνωστών συντεταγμένων, που όταν αυτό συμβαίνει η εφαρμογή επίλυσης με πρόσθετες παραμέτρους πρέπει να αποφεύγεται, καθώς θα επηρεαστούν με συστηματικό τρόπο τα αποτελέσματα επίλυσης του μπλοκ, οδηγώντας στην χειροτέρευση των αποτελεσμάτων.

Και ενώ η διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων, κατά την επίλυση με πρόσθετες παραμέτρους γίνεται κατά τη διάρκεια της συνόρθωσης, ο προσδιορισμός και η αντιμετώπιση των **χονδροειδών** σφαλμάτων, γίνεται είτε με εμπειρικές μεθόδους, είτε με αυτόματες, που βασίζονται σε στατιστικούς ελέγχους.

Οι εμπειρικές μέθοδοι, βασίζονται κυρίως στον έλεγχο των εναπομένων σφαλμάτων, η επίδραση των οποίων όμως κατανέμεται σε πολλές παρατηρήσεις. Η δυνατότητα αυτόματης ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων υλοποιείται με διάφορες μεθόδους, με σημαντικότερη όμως τη μέθοδο σάρωσης δεδομένων (*data snooping*), που ενσωματώνουν αρκετά φωτογραμμετρικά προγράμματα (π.χ. *BINGO-F*) και αποτελεί μια εφαρμογή στη φωτογραμμετρία της μεθόδου του *Baarda* για τα γεωδαιτικά δίκτυα. Σε αυτή ελέγχεται η μηδενική υπόθεση H_0 που θεωρεί ότι δεν υπάρχουν χονδροειδή σφάλματα στις παρατηρήσεις, ως προς την εναλλακτική υπόθεση H_a που θεωρεί ότι μια παρατήρηση είναι επηρεασμένη από χονδροειδές σφάλμα (Ιωαννίδης, 2008).

Ένα μέτρο ακρίβειας είναι η **μεταβλητότητα** σ^2 (δηλ. η διασπορά m άπειρου δείγματος), δηλαδή η μέση τιμή της διασποράς των τιμών των παρατηρήσεων και των εκτιμήσεων που προκύπτουν από αυτές. Η χρήση της μεταβλητότητας είναι κατάλληλη μόνο όταν η προσδοκία της εκτίμησης μιας παραμέτρου (η μέση τιμή της σε άπειρες επαναλήψεις του πειράματος), ταυτίζεται με την πραγματική της τιμή. Στην περίπτωση αυτή η εκτίμηση ονομάζεται ανεπηρέαστη. Ένα ικανοποιητικό μέτρο της ακρίβειας είναι η μέση τυπική απόκλιση, που είναι ίση με τη ρίζα της διασποράς. Η μέση τυπική απόκλιση ονομάζεται **μέσο τετραγωνικό σφάλμα**, όταν σχετίζεται με τη διασπορά γύρω από την πραγματική τιμή αντί της μέσης. Η **τυπική απόκλιση** σ , αφορά τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας (άπειρο δείγμα).

Έτσι η **θεωρητική προσέγγιση** υπολογισμού της ακρίβειας στον αεροτριγωνισμό, στηρίζεται στον αναλυτικό υπολογισμό των μεταβλητοτήτων και συμμεταβλητοτήτων των εκτιμήσεων των αγνώστων παραμέτρων. Με βάση την υπόθεση ότι όλες οι μετρήσεις είναι ανεξάρτητες, ο πίνακας συμμεταβλητότητας του συνόλου των αγνώστων παραμέτρων, δίνεται από τη σχέση (Δερμάνης, 1986):

$$C_x = \sigma^2 N^{-1} \quad (7.1-18)$$

$$\sigma^2 = \frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v}}{n - m} \quad (7.1-19)$$

Όπου:

n ο αριθμός των παρατηρήσεων

m ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων και

\mathbf{v} οι εκτιμήσεις των σφαλμάτων των παρατηρήσεων, που δίνονται από την: $\mathbf{v} = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}$

Ωστόσο στον αεροτριγωνισμό χρησιμοποιείται και μια **εμπειρική προσέγγιση** για τον προσδιορισμό της ακρίβειας. Σε αυτή, οι συντεταγμένες ενός αριθμού σημείων (σημεία ελέγχου), που προσδιοριστήκαν φωτογραμμετρικά, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τους συντεταγμένες, που έχουν προκύψει από άλλες μετρήσεις υψηλότερης ακρίβειας, π.χ. με *GPS*. Δίνεται έτσι μια ρεαλιστική εκτίμηση της συνολικής μέσης ακρίβειας προσδιορισμού θέσης, με το μειονέκτημα όμως να μην δίνει πληροφορίες για την κατανομή της ακρίβειας και του τρόπου επηρεασμού της από τη γεωμετρία των λήψεων.

7.1.3 Αξιοπιστία

Εκτός από την ακρίβεια και η αξιοπιστία είναι ένας σημαντικός δείκτης, κατά τον ποιοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων του αεροτριγωνισμού. Η κεντρική της ιδέα είναι ο καθορισμός κατώτατων ορίων του μεγέθους των σφαλμάτων, που μπορούν να προσδιοριστούν με στατιστικούς ελέγχους, όπως ελέγχους εναλλακτικών υποθέσεων με τη μέθοδο του «*data snooping*». Οπότε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, εξαρτάται από την επίδραση, επί των γεωδαιτικών συντεταγμένων των αγνώστων σημείων, των μη προσδιοριζόμενων σφαλμάτων των μετρήσεων.

Η αξιοπιστία εξαρτάται από:

- Τη θέση των παρατηρούμενων σημείων, καθώς τα εσωτερικά σημεία του μπλοκ έχουν πολύ ομοιογενή και εσωτερική και εξωτερική αξιοπιστία, σε αντίθεση με αυτά της περιμέτρου.
- Τα μεγέθη που πρόκειται να μετρηθούν, καθώς τα μπλοκ με λίγα σημεία σύνδεσης ανά φωτογραφία, είναι λιγότερο αξιόπιστα, με εξάρτηση όμως από τη μέθοδο επίλυσης. Και αυτό γιατί στην επίλυση με δέσμες η μέτρηση περισσότερων σημείων σύνδεσης ή ζευγών σημείων δεν αυξάνει γενικά την αξιοπιστία. Αυτό οφείλεται στον καθορισμό των σημείων στο μέσον των λωρίδων από 2 ή 3 ομόλογες ακτίνες. Συνεπώς περισσότερα σημεία δεν αλλάζουν την κακή τοπική γεωμετρία. Οι λύσεις είναι είτε η δημιουργία μπλοκ με αυξημένη κατά πλάτος επικάλυψη των εικόνων (πχ 60%) είτε η χρήση δυο μπλοκ με 20% κατά πλάτος επικάλυψη και άξονες πτήσης κάθετους μεταξύ τους.

7.2 Πεδίο Ελέγχου

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του πεδίου ελέγχου που φωτογραφήθηκε με την *RMK* για τη βαθμονόμησή της. Λεπτομέρειες της διαδικασίας ίδρυσης και κατασκευής του πεδίου, παρουσιάζονται σε παράλληλη διπλωματική (Φιλίππου, 2010).

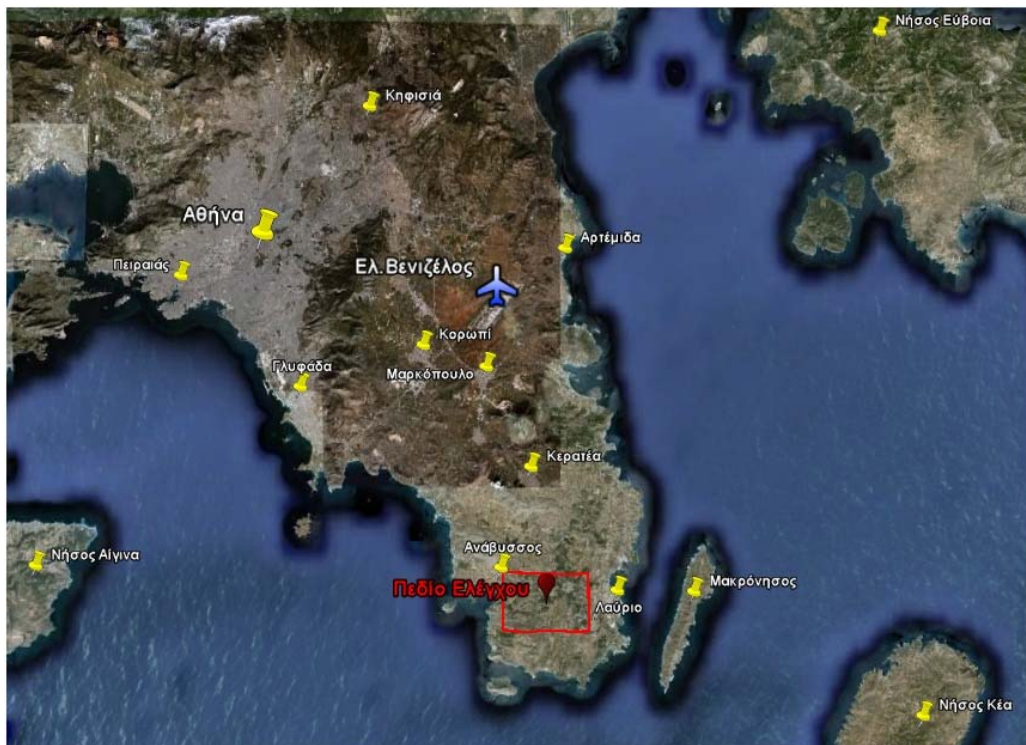
7.2.1 Περιοχή

Το πεδίο χωροθετείται στο νομό Αττικής με συντεταγμένες του κέντρου του περίπου: **37°42'47.67"Β** και **23°59'35.06"Α**. Βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του νομού (Εικόνα 7-1) σε απόσταση 38 km από την πόλη της Αθήνας, 25 km από τον διεθνή αερολιμένα «Ελευθέριος Βενιζέλος» και συνορεύει ανατολικά με το Λαύριο και δυτικά με την Ανάβυσσο και την Παλαιά Φώκαια.

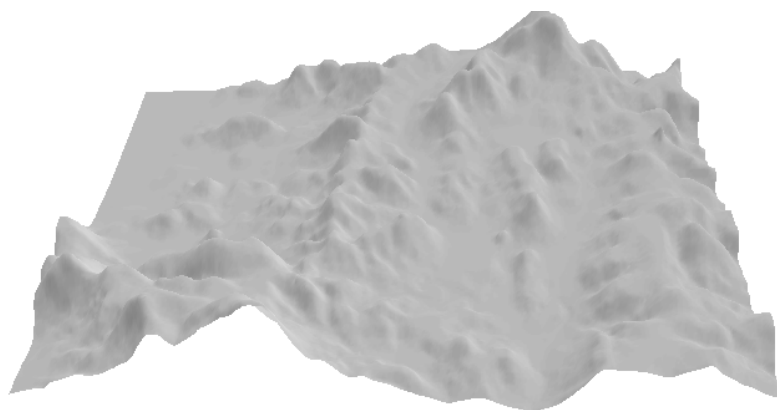
Κάποια από τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Έκταση **6 (E-W) x 4 (N-S) km²** περίπου.
- Καλύπτει μη-επίπεδο έδαφος με εναλλαγές χρήσεων γης, όπως αραιή αστική δόμηση, καλλιέργειες, δασικές εκτάσεις, χέρσα εδάφη κτλ. Το υψόμετρο της περιοχής, κυμαίνεται από **10 έως 345 περίπου μέτρα** πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, χωρίς ομοιόμορφες κλίσεις (Εικόνα 7-2).
- Διαθέτει κατάλληλες δυνατότητες πρόσβασης για την εξυπηρέτηση των αναγκών ίδρυσης, μέτρησης και συντήρησής του από τους χρήστες του.
- Χωροθετείται πέραν των 10 km από ελεγχόμενο εναέριο χώρο. Εντός της περιοχής δεν βρίσκονται κατακόρυφα εμπόδια ή εγκαταστάσεις που θα εμπόδιζαν την εκτέλεση

πτήσεων με την παραγωγή τυρβώδους ροής αέρα ή με παρακάλυψη των ελιγμών του αεροσκάφους.



Εικόνα 7-1: Περιοχή πεδίου ελέγχου



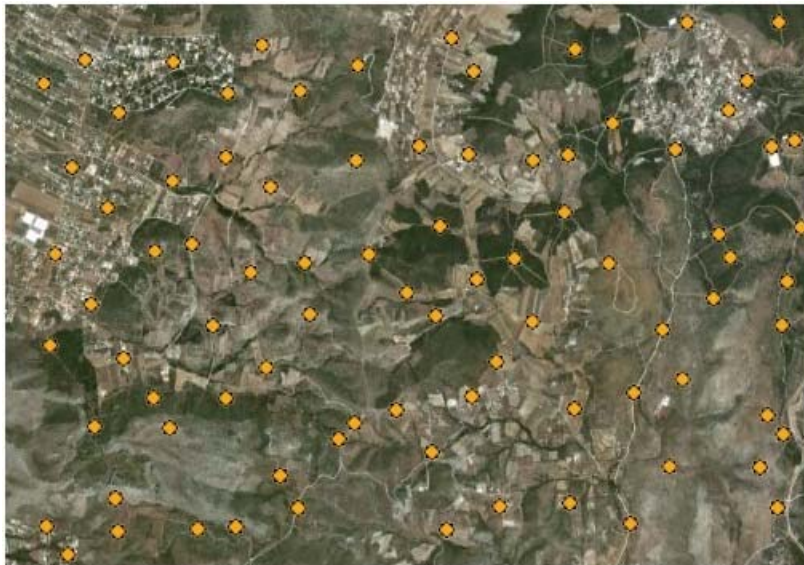
Εικόνα 7-2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής πεδίου

Η θέση των φωτοσταθερών στο πεδίο καθορίστηκε κατά την διάρκεια της προετοιμασίας του, με γνώμονα τη φωτογράφιση του σε κλίμακα 1:5000 με αναλογική (*RMK TOP15*) και ψηφιακή (*DMC*) μηχανή αεροφωτογράφισης (Εικόνα 7-3).

Τα φωτοσταθερά έπρεπε να βρίσκονται μέσα στα επικαλυπτόμενα τμήματα των μοντέλων και κάποια από αυτά έπρεπε να βρίσκονται σε τέτοιες θέσεις, ώστε να είναι στο κατά μήκος αλλά και στο κατά πλάτος επικαλυπτόμενο τμήμα των εικόνων, προκειμένου να συνδέουν τις λωρίδες μεταξύ τους. Η θέση τους τελικά ικανοποιούσε την απαίτηση που τέθηκε, ώστε **τουλάχιστον ένα σημείο** να βρίσκεται εντός κάθε μοντέλου των λήψεων τόσο της ψηφιακής όσο και της αναλογικής μηχανής. Επιπρόσθετα λήφθηκαν υπόψη και τα κλασικά κριτήρια της φωτογραμμετρίας, για την επιλογή της θέσης των φωτοσταθερών. Συνολικά επιλέχθηκαν θέσεις για **86 φωτοσταθερά σημεία** (Εικόνα 7-4).



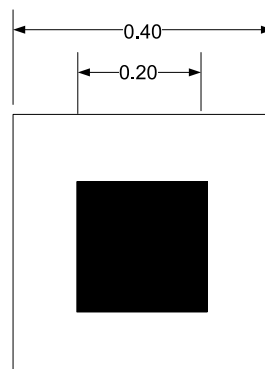
Εικόνα 7-3: Φωτογραφική κάλυψη πεδίου ελέγχου
(Γραμμές Πτήσης και Μπλε χρώμα: μηχανή RMK TOP 15 - Κόκκινο χρώμα: μηχανή DMC)



Εικόνα 7-4: Επιλογή θέσης φωτοσταθερών σημείων

7.2.2 Τύπος στόχου

Ο τύπος του στόχου στο πεδίο είναι ένα τετράγωνο διαστάσεων $40 \times 40 \text{ cm}^2$ λευκού χρώματος, με ένα τετράγωνο διαστάσεων $20 \times 20 \text{ cm}^2$ μαύρου χρώματος στο κέντρο του.



Σχήμα 7-1: Τύπος στόχου

Η υλοποίηση των στόχων γίνεται με δύο τρόπους: Μόνιμοι και μεταφερόμενοι στόχοι με τα γενικά τους χαρακτηριστικά να έχουν όπως παρακάτω:

➤ Μόνιμοι στόχοι

Οι θέσεις τους εντοπίζονται κυρίως επί ασφάλτινων δρόμων ή ακόμη και επί τεχνικών έργων (π.χ. πλάκες ταρατσών) ή και επί επίπεδων βράχων. Για την κέντρωσή των οργάνων μέτρησης στους στόχους χρησιμοποιείται καρφί και για το βάψιμο χρώματα οδοποιίας για μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο. Συνολικά υπάρχουν 41 στόχοι αυτού του είδους.



Εικόνα 7-5: Μόνιμοι στόχοι πεδίου

➤ Μεταφερόμενοι στόχοι

Συνολικά κατασκευάστηκαν 45 μεταφερόμενοι στόχοι. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε κόντρα πλακέ θαλάσσης πάχους 1.2 εκατοστών, στις διαστάσεις 40x40cm², το οποίο στη συνέχεια βάφτηκε με κατάλληλα χρώματα και διαδικασία. Στο κέντρο του στόχου ανοίχτηκε τρύπα διαμέτρου 5/8 της ίντσας, που είναι μια τυποποιημένη διάμετρος των τοπογραφικών παρελκομένων (ακόντια, βάσεις κεραιών κ.τ.λ.).



Εικόνα 7-6: Προετοιμασία κινητών στόχων

Για την τοποθέτηση των στόχων αυτών κατασκευάστηκαν βάρη από μπετόν διαμέτρου 20 εκατοστών με βίδα υποδοχής στο κέντρο τους από μπρούτζο διαμέτρου 5/8 της ίντσας, για αντοχή στη διάβρωση. Τα βάρη θεμελιώθηκαν σκάβοντας 30-40 εκατοστά, δημιουργώντας τη μορφή τους με πλαστικό καλούπι και οριζοντιώνοντας την βίδα υποδοχής, η οποία στο πάνω της μέρος φέρει πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα για το διάστημα που δεν χρησιμοποιείται. Η βίδα επιτρέπει την κέντρωση των οργάνων μέτρησης με μεγάλη ακρίβεια καθώς και των στόχων, σε μόνιμη θέση.



Εικόνα 7-7: Κατασκευή βάρων τοποθέτησης μεταφερόμενων στόχων

7.2.3 Γεωδαιτικές μετρήσεις

Η επίλυση του δικτύου έγινε με εκτέλεση **στατικών** μετρήσεων *GPS*. Οι συντεταγμένες των σημείων προσδιορίστηκαν αρχικά στο γεωκεντρικό σύστημα *WGS '84* και μετατράπηκαν στη συνέχεια στο προβολικό σύστημα *ΕΓΣΑ '87* με τυπική απόκλιση: $\sigma_x = \pm 0.00148$ m, $\sigma_y = \pm 0.0015$ m, $\sigma_z = \pm 0.00228$ m.



Εικόνα 7-8: Μέτρηση με δέκτη Spectra



Εικόνα 7-9: Μέτρηση με δέκτη Trimble

7.3 Λήψη Α/Φ

7.3.1 Προετοιμασία πεδίου

Από το χρόνο ολοκλήρωσης του πεδίου μέχρι το χρόνο φωτογράφισης, μεσολάβησε χρονικό διάστημα ενάμιση μήνα περίπου. Έτσι, ενώ το πεδίο ολοκληρώθηκε στις 17/05/2010, η φωτογράφησή του με την ψηφιακή μηχανή *DMC* της εταιρείας *Geomatics* πραγματοποιήθηκε στις 01/07/2010 και με τη μηχανή *RMK TOP15* της ΓΥΣ στις 05/07/2010.

Δεδομένου του χρόνου αυτού, των ενδιάμεσων καιρικών συνθηκών, αλλά και της μη εμπειρίας χρήσης ενός τέτοιου πεδίου, αποφασίστηκε η συντήρηση των μόνιμων στόχων πριν τη φωτογράφιση. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με την τοποθέτηση των κινητών στόχων, στα κατασκευασμένα βάθρα.



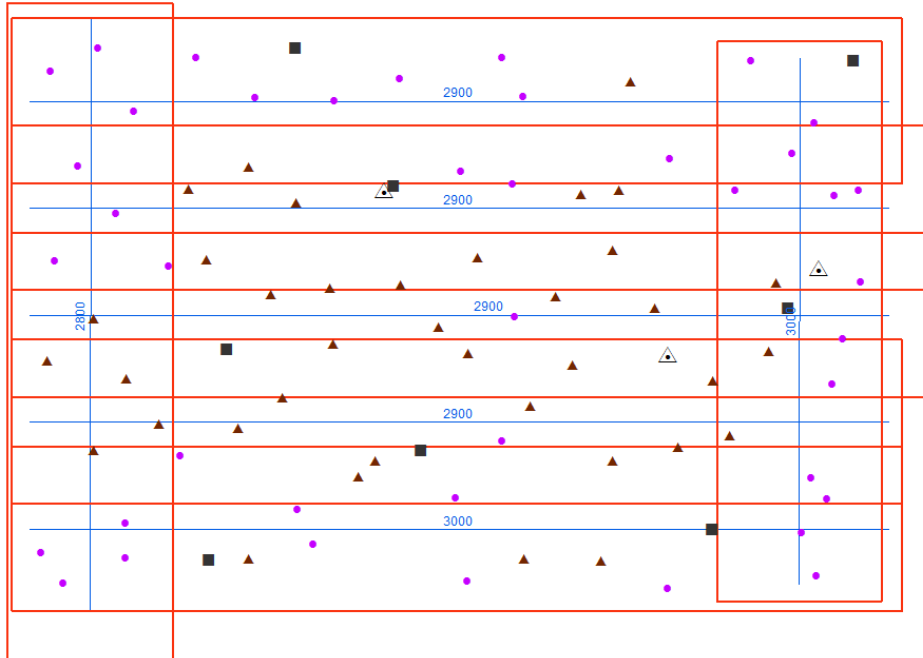
Εικόνα 7-10: Τοποθέτηση μεταφερόμενων στόχων στα βάθρα

Στο χρόνο που μεσολάβησε μεταξύ των δυο φωτογραφήσεων ένας από τους κινητούς στόχους καταστράφηκε, με αποτέλεσμα να φωτογραφηθούν οι υπόλοιποι 85. Επιπρόσθετα, μεσολάβησαν εργασίες διάνοιξης των υφιστάμενων χωματόδρομων, με αποτέλεσμα πολλοί από τους παρακείμενους μεταφερόμενους στόχους να σκονιστούν, κάτι που επέδρασε αισθητά στην απεικόνισή τους επί των εικόνων όσον αφορά τη ραδιομετρία τους, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια. Με την ολοκλήρωση της φωτογράφισης συλλέχθηκαν όλοι οι μεταφερόμενοι στόχοι για μελλοντική τους χρήση.

7.3.2 Φωτογράφιση

Η ώρα λήψης των εικόνων με τη μηχανή *RMK TOP15* ήταν μεταξύ 11:00-11:45 στις 5/7/2010, στοιχείο το οποίο είναι απαραίτητο, λόγω της εποχής του έτους και της ώρας

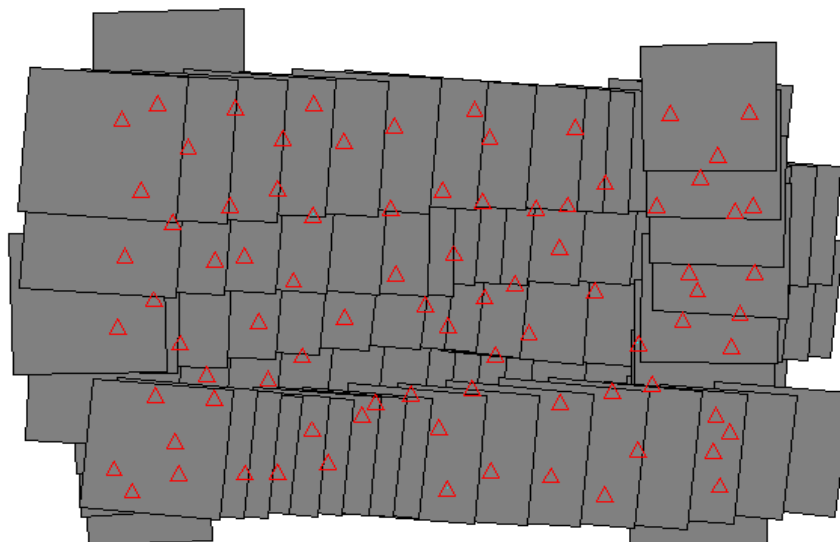
λήψης, για την εξαγωγή συμπερασμάτων εξαιτίας της επίδρασης της σκιάς. Η κατεύθυνση πτήσης όλων των οριζοντίων λωρίδων ήταν από Α-Δ και των δύο καθέτων από Ν-Β. Συνολικά ελήφθησαν 102 εικόνες σε πέντε οριζόντιες και δυο κάθετες λωρίδες. Ενώ όμως ο αρχικός προγραμματισμός πτήσης, που είχε εκτελεστεί από τη ΓΥΣ είχε όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-2, στην πράξη οι **δυνατοί άνεμοι** εκείνης της ημέρας **δεν** επέτρεπαν την **αυτόματη** λήψη των εικόνων στις προγραμματισμένες θέσεις, με αποτέλεσμα αρκετές εικόνες να τραβηχτούν **χειροκίνητα** από τους χειριστές της μηχανής.



- ▲ Τριγωνομετρικά ΓΥΣ
- Βασικοί Σταθμοί
- Μόνιμοι Στόχοι
- ▲ Βάθρα υποδοχής κινητών στόχων
- Εικόνες Λωρίδας
- Γραμμές Πτήσης με Υψόμετρο

Σχήμα 7-2: Αρχικός προγραμματισμός πτήσης για τη φωτογράφιση του πεδίου ελέγχου με τη μηχανή RMK TOP15 της ΓΥΣ

Μετά την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού και την εξαγωγή των ακριβών θέσεων λήψης, που θα παρουσιαστεί στα επόμενα, η κατανομή των φωτογραφιών που ελήφθησαν για την κάλυψη του πεδίου, είχε την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 7-3: Θέση εικόνων φωτογράφισης πεδίου

Η κατά μήκος επικάλυψη των εικόνων ήταν 60% ενώ η κατά πλάτος 35%. Για ενδεχόμενη εργασία εξαγωγής ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής, τραβήχτηκαν ενδιάμεσες εικόνες με κατά μήκος επικάλυψη 85%. Τελικά η μέση κλίμακα λήψης των εικόνων, όπως προέκυψε ήταν 1:5250 περίπου.

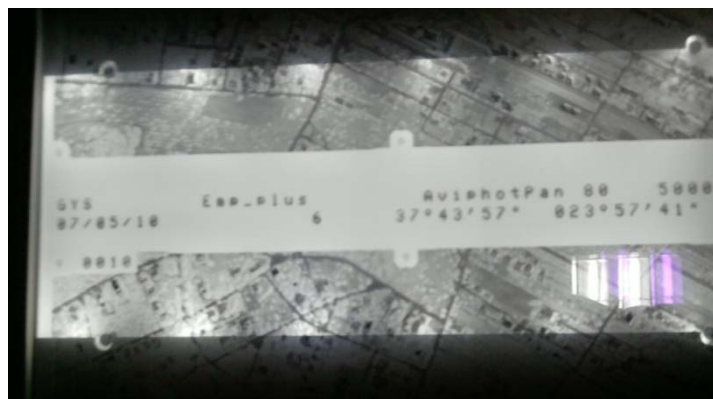
7.4 Σάρωση Φιλμ

Μετά την εμφάνιση του αρνητικού της αεροφωτογράφισης, ακολούθησε η σάρωσή του στον φωτογραμμετρικό σαρωτή *DSW700* της ΓΥΣ, καθώς η πρώτη διαδικασία για την εργασία σε ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό, είναι η μετατροπή των πρωτογενών αναλογικών εικόνων σε ψηφιακές μέσω της σάρωσής τους.

Το σημαντικότερο στοιχείο αυτής της διαδικασίας ήταν η επιλογή της ανάλυσης σάρωσης, καθώς και οι ραδιομετρικές ρυθμίσεις της. Φυσικά προηγήθηκαν και λοιπές ρυθμίσεις μέσω του λογισμικού υποστήριξης του σαρωτή, όπως η επιλογή μεγέθους σάρωσης, όπου επιλέχθηκε να μην σαρωθούν οι πληροφορίες περιθωρίου.



Εικόνα 7-11: Τοποθέτηση φιλμ στον σαρωτή DSW700



Εικόνα 7-12: Αρνητικό επί του σαρωτή με απεικόνιση προγραμματιζόμενων στοιχείων λήψης

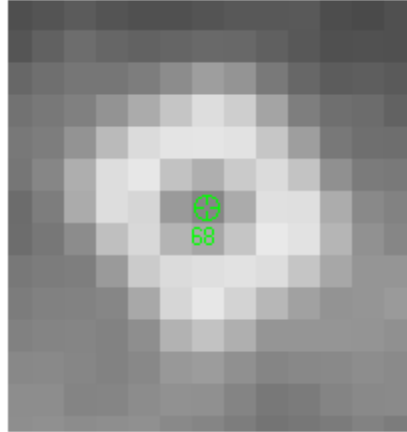
7.4.1 Ραδιομετρική ανάλυση

Η ραδιομετρική ανάλυση (βάθος χρώματος) σχετίζεται με το πλήθος των γκριζών τόνων (δεδομένου ότι πρόκειται για ασπρόμαυρη εικόνα), που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και παρουσίαση της εικόνας. Όσες περισσότερες αποχρώσεις χρησιμοποιούνται, τόσο οι διάφορες λεπτομέρειες απεικονίζονται εναργέστερα και συνεπώς είναι δυνατή η εκτέλεση μετρήσεων στην εικόνα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για τις ανάγκες της εργασίας επιλέχθηκε ο πλέον συνηθισμένος συνδυασμός για την αποθήκευση ψηφιακών εικόνων με 256 αποχρώσεις, για τις οποίες απαιτούνται **8 bit**. Ο αριθμός αυτός σχετίζεται τόσο με την δυνατότητα αποθήκευσης ενός εικονοστοιχείου σε ένα *byte*, όσο και με το φυσικό περιορισμό στη δυνατότητα του ανθρώπου να διακρίνει περισσότερους από 20-25 γκριζούς τόνους. Μεγαλύτερη τιμή από αυτή θα επιδρούσε αρνητικά στο μέγεθος και κατά συνέπεια στη διαχείριση των εικόνων.

7.4.2 Χωρική ανάλυση

Η χωρική ανάλυση μιας εικόνας σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος του εικονοστοιχείου, με την ακρίβεια των γεωμετρικών μετρήσεων σε αυτή, καθώς και με το μέγεθος του τελικού ψηφιακού αρχείου.

Δεδομένων των διαστάσεων $20 \times 20 \text{ cm}^2$ του κέντρου των στόχων, θεωρήθηκε σκόπιμο για την δυνατότητα ακριβούς σκοπεύσεώς του να απεικονίζεται με μέγεθος της τάξης των 9 pixel (περιοχή $3 \times 3 \text{ pixel}$, Εικόνα 7-13). Αυτό στην πράξη αποδείχτηκε ότι δεν συμβαίνει πάντα, καθώς το μέγεθος του κέντρου αλλάζει ανάλογα με τη γωνία λήψης του στόχου και σαν αποτέλεσμα παρεμβολής στην σύνθεση της εικόνας.



Εικόνα 7-13: Απεικόνιση κέντρου του στόχου σε $3 \times 3 \text{ pixel}$

Η απεικόνιση του κέντρου του στόχου σε $3 \times 3 \text{ pixel}$, σημαίνει μια εδαφοψηφίδα στα $20/3=6.66$ εκατοστά και δεδομένης της μέσης κλίμακας (1:5250), μέγεθος εικονοστοιχείου στην εικόνα: $12.69 \approx 13 \mu\text{m}$.

Τελικά επιλέχθηκε τιμή **12 μm** για το μέγεθος του εικονοστοιχείου, που αντιστοιχεί σε ανάλυση σάρωσης: $\frac{2.54}{12 \cdot 10^{-3}} = 2116 \text{ dpi}$.

Η τιμή αυτή του μεγέθους του εικονοστοιχείου στην εικόνα, δίνει αντίστοιχα εδαφοψηφίδα: $12 \cdot 5250 = 6.3 \text{ cm}$

Η **ελάχιστη** τιμή σάρωσης προκύπτει άλλωστε και βάσει της σχέσης που συνδέει τα μεγέθη: κλίμακα εικόνας, εδαφοψηφίδα και ανάλυση σάρωσης, όπως δίνεται από την (7.4-1):

$$N_{(dpi)} = \frac{25.4 \cdot k \cdot 10^{-3}}{D_{(m)}} \quad (7.4-1)$$

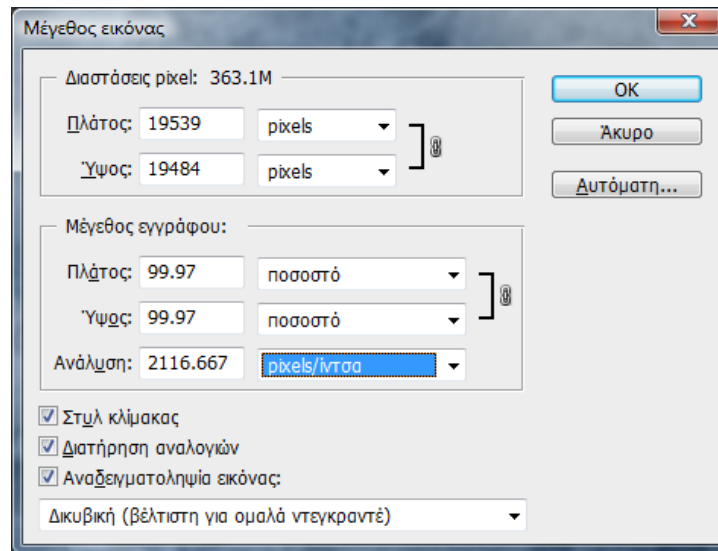
όπου:

- N ο αριθμός των στιγμών ανά ίντσα (dpi)
- k η κλίμακα της εικόνας
- D η εδαφοψηφίδα σε m .

Με την αρχική θεώρηση ο στόχος να απεικονίζεται σε μια περιοχή τουλάχιστον 9 pixel προκύπτει η **ελάχιστη** τιμή σάρωσης: $N_{(dpi)} = \frac{25.4 \cdot k \cdot 10^{-3}}{D_{(m)}} = \frac{25.4 \cdot 5250 \cdot 10^{-3}}{0.0666} \approx 2000 dpi$

Με την τελική επιλογή της ανάλυσης σάρωσης στα $12 \mu\text{m}$, οπότε και εδαφοψηφίδα 6.3 cm , η παραπάνω σχέση (7.4-1) δίνει 2116 dpi .

Το μέγεθος κάθε εικόνας που προέκυψε, ήταν της τάξης των 360 MB , με 19500 pixel περίπου στην κάθε πλευρά. Η αποθήκευση των σαρωμένων εικόνων έγινε κατά το πρότυπο *tiff* (*Tagged Image File Format*).



Εικόνα 7-14: Πληροφορίες σαρωμένης εικόνας

7.5 Επεξεργασία Εικόνων – Εφαρμογή LPS-ERDAS

Το στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε στο *LPS* και ακολούθησε η εκτέλεση του αεροτριγωνισμού με το ίδιο πρόγραμμα. Συγκεκριμένα έγιναν οι ακόλουθες εργασίες, που αναλύονται κατά σειρά και αφορούν:

- την δημιουργία νέου έργου και την ρύθμιση των απαραίτητων παραμέτρων
- την εισαγωγή εικόνων και την δημιουργία πυραμίδων
- την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων
- την χειροκίνητη και αυτόματη συλλογή σημείων σύνδεσης
- την σκόπευση φωτοσταθερών
- την επίλυση του αεροτριγωνισμού.

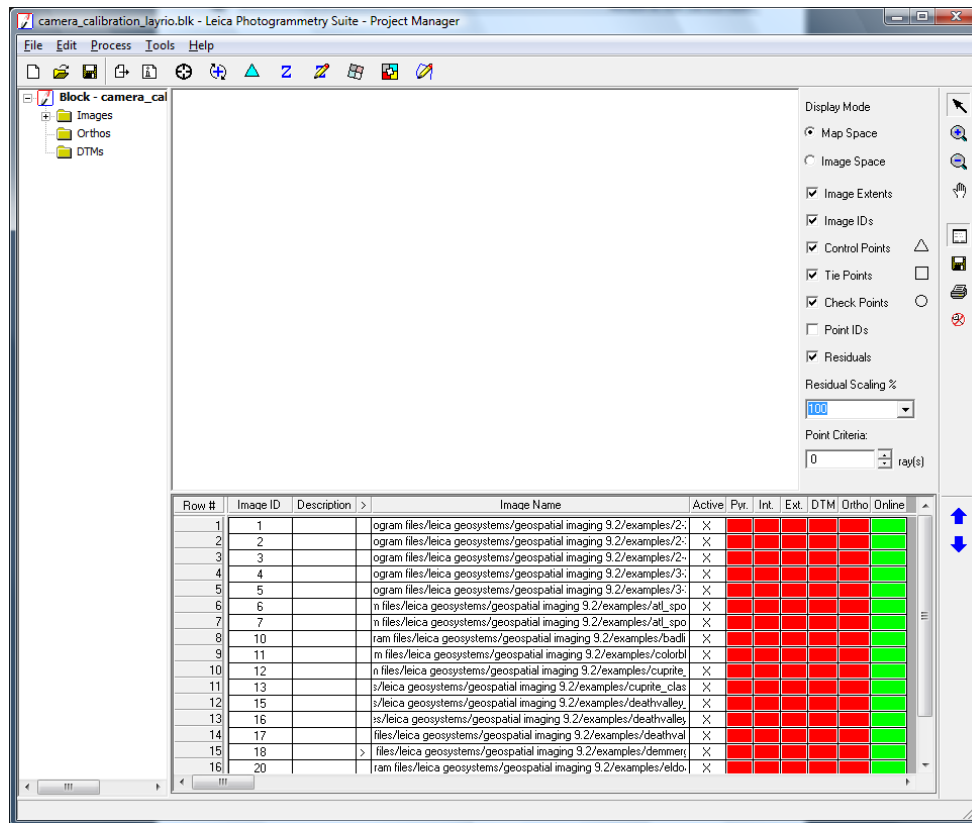
7.5.1 Δημιουργία νέου έργου (project) και ρύθμιση παραμέτρων

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα νέο *project*, στο οποίο κατά σειρά μέσω παραθύρων διεπαφής έγιναν οι ακόλουθες ρυθμίσεις:

- Ορισμός ονόματος εργασίας και διαδρομή αποθήκευσης.
- Ορισμός κατηγορίας μοντέλου, όπου επιλέχθηκε *Camera-Frame Camera*.
- Ορισμός συστήματος αναφοράς, όπου επιλέχθηκε το ΕΓΣΑ'87.
- Ορισμός συγκεκριμένων πληροφοριών, σχετικά με το μέσο υψόμετρο πτήσης, τη μονάδα μέτρησης των γωνιών και τη σειρά των στρωφών, καθώς και των ρυθμίσεων της μηχανής λήψης. Ειδικά για το τελευταίο, εισήχθησαν σε κατάλληλα πεδία τα στοιχεία της μηχανής *RMK TOP15* της ΓΥΣ, που αφορούσαν τη σταθερά της μηχανής, το πρωτεύον σημείο, τις εικονοσυντεταγμένες των εικονοσημάτων και τις τιμές της ακτινικής διαστρωφής σε συγκεκριμένες ακτινικές αποστάσεις. Τα στοιχεία αυτά, ελήφθησαν από το πιστοποιητικό βαθμονόμησής της, τα κύρια στοιχεία του οποίου παρατίθενται στο **Παράρτημα «Δ»**.

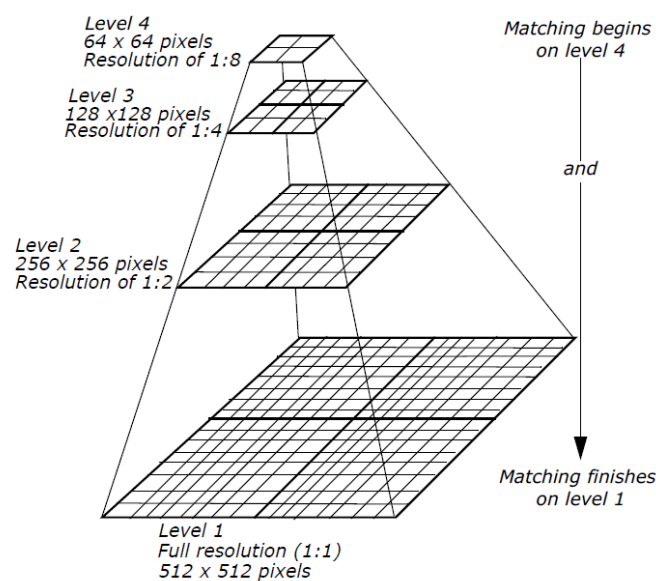
7.5.2 Εισαγωγή εικόνων και δημιουργία πυραμίδων

Ακολουθεί η εισαγωγή των εικόνων στο έργο από τη διαδρομή αποθήκευσής τους. Το πρόγραμμα προσφέρει τη δυνατότητα εισαγωγής περιγραφής για κάθε εικόνα σε κατάλληλο πεδίο μετά την εισαγωγή της. Στα δεξιά του ονόματος κάθε εικόνας εμφανίζονται πεδία που αφορούν σειρά διαδικασιών και απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα όταν αυτές δεν έχουν ολοκληρωθεί και με πράσινο όταν ολοκληρωθούν (Εικόνα 7-15).



Εικόνα 7-15: Εισαγωγή εικόνων στο project

Μετά την εισαγωγή των εικόνων, ο χρήστης μπορεί να τις ανοίξει με τον *viewer* που παρέχει το *ERDAS* και να εκμεταλλευθεί όλες τις λειτουργίες που προσφέρει αυτός. Για να είναι πιο γρήγορη η λειτουργία μεγέθυνσης – σμίκρυνσης είναι απαραίτητη η δημιουργία πυραμίδων για τις εικόνες. Η πυραμίδα της εικόνας είναι ένα σύνολο από όψεις εκθετικά μειούμενου μεγέθους, ξεκινώντας από το αρχικό μέγεθος. Όταν ο χρήστης μεγεθύνει - σμικρύνει την εικόνα στον *viewer*, αντί οι απαραίτητοι υπολογισμοί να γίνουν εκείνη την στιγμή, το πρόγραμμα απλά καλεί το κατάλληλο επίπεδο της πυραμίδας. Τις πυραμίδες των εικόνων εκμεταλλεύονται και οι αλγόριθμοι αυτόματης συνταύτισης για να επιταχύνουν σημαντικά την λειτουργία τους.



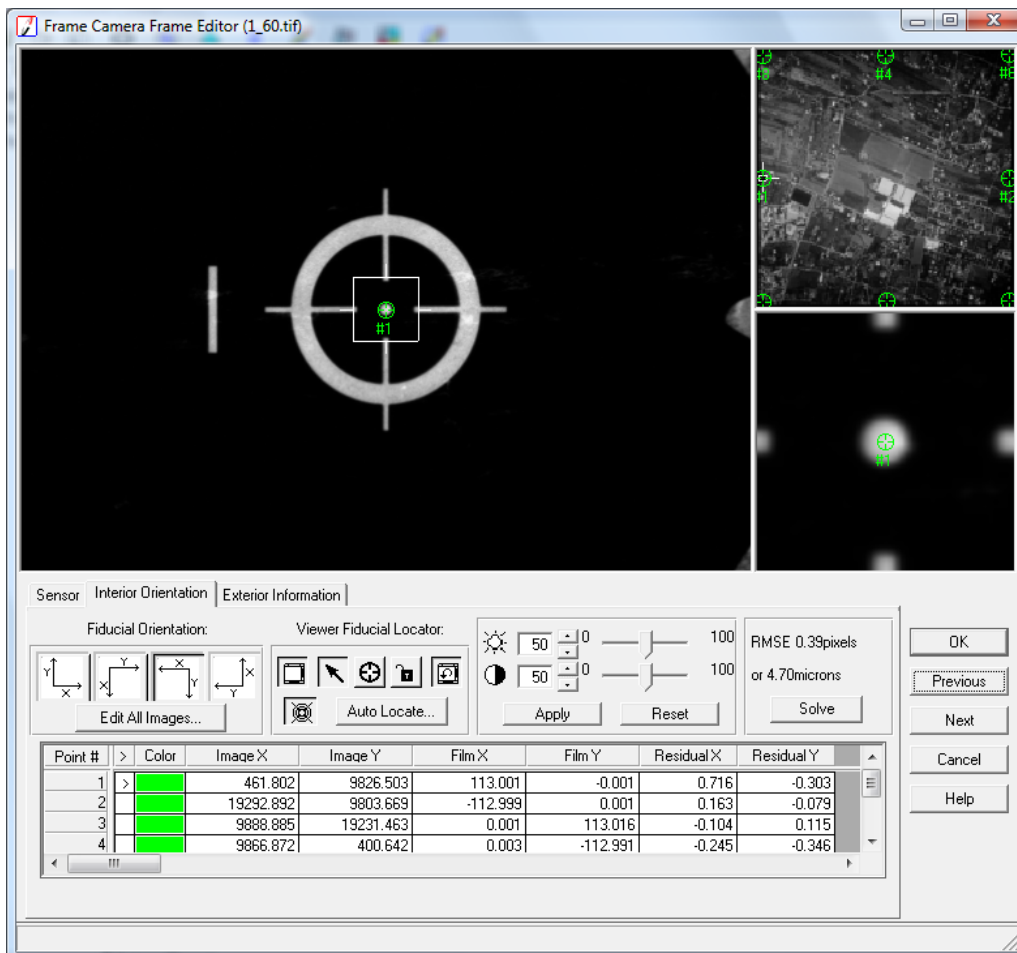
Εικόνα 7-16: Χειρισμός πυραμίδων εικόνας από το ERDAS

Η διαδικασία ολοκληρώνεται επιλέγοντας *edit-compute pyramid layers*, ζητώντας από το πρόγραμμα τη δημιουργία πυραμίδων για όλες τις εικόνες.

7.5.3 Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού

Η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού γίνεται με διαδοχικές στοχεύσεις των εικονοσημάτων της φωτομηχανής σε όλες τις διαθέσιμες εικόνες. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα της ψηφιακής εικόνας μετασχηματίζεται στο σύστημα της μηχανής. Ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιείται είναι ο αφινικός και η επίλυση γίνεται με MET.

Το παράθυρο στο οποίο ολοκληρώνεται η διαδικασία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 7-17. Εκεί σημειώνεται και το σφάλμα του εσωτερικού προσανατολισμού για κάθε εικόνα σε pixel και μm .

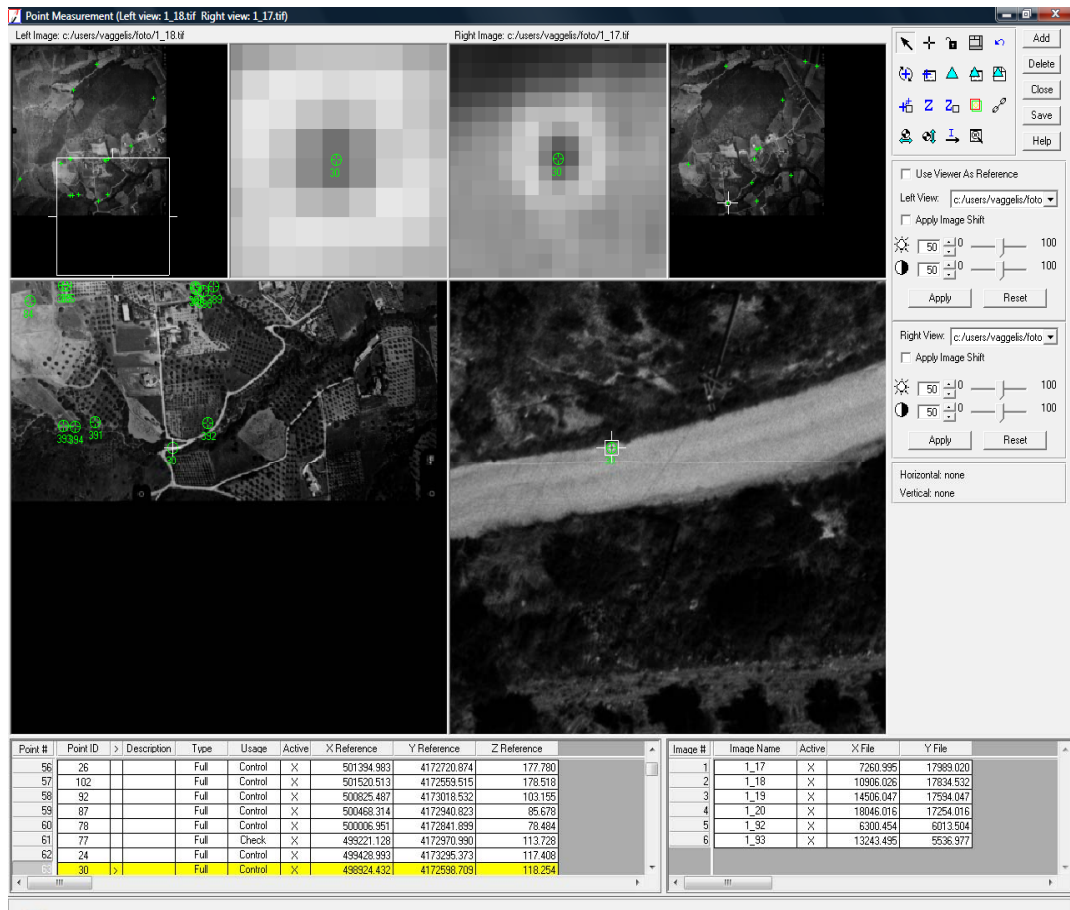


Εικόνα 7-17: Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού

7.5.4 Σκόπευση φωτοσταθερών

Η εργασία αυτή μπορεί να εκτελεστεί είτε σε αυτό το στάδιο είτε μετά την συλλογή των σημείων σύνδεσης. Χρησιμοποιώντας το *classic point measurement tool* (καθώς υπάρχει και η δυνατότητα του *Stereo point measurement tool*), γίνεται η σκόπευση των φωτοσταθερών σε κάθε εικόνα που αυτά απεικονίζονται, χρησιμοποιώντας ως βοήθημα τους αρχικούς ορθοφωτοχάρτες της περιοχής, για γρηγορότερο εντοπισμό τους. Το επίπεδο μεγέθυνσης προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με το μέγεθος (σε *pixel*) απεικόνισης του στόχου.

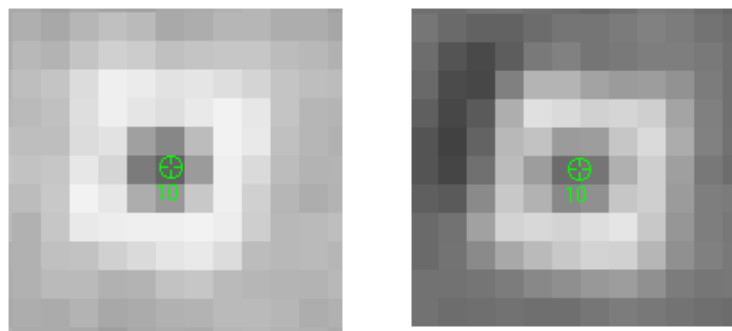
Αφού ολοκληρωθεί η σκόπευση όλων των φωτοσταθερών σε όλες τις εικόνες (ή και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας), εγγράφονται στα αντίστοιχα πεδία οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Παράλληλα υπάρχει και η δυνατότητα ενεργοποίησης ή όχι της συμμετοχής κάποιου σημείου ολικώς ή μερικώς σε κάποιες εικόνες από αντίστοιχη επιλογή (πεδίο *active*). Παρατηρήθηκε το φαινόμενο της οριακής εμφάνισης κάποιων στόχων από σκιές δέντρων ή οχήματα και μόνο για τους μόνιμους στόχους, που είχαν βαφτεί στο δρόμο. Αυτό οφειλόταν στους περιορισμούς κατασκευής και μέτρησης τους, ώστε να μην παρεμποδίζονται τα διερχόμενα οχήματα. Σημαντική ήταν επίσης και η διαφορετική απεικόνιση του ίδιου στόχου σε εικόνες διαφορετικών γραμμών πτήσης.



Εικόνα 7-18: Σκόπευση φωτοσταθερών και εισαγωγή γεωδαιτικών τους συντεταγμένων



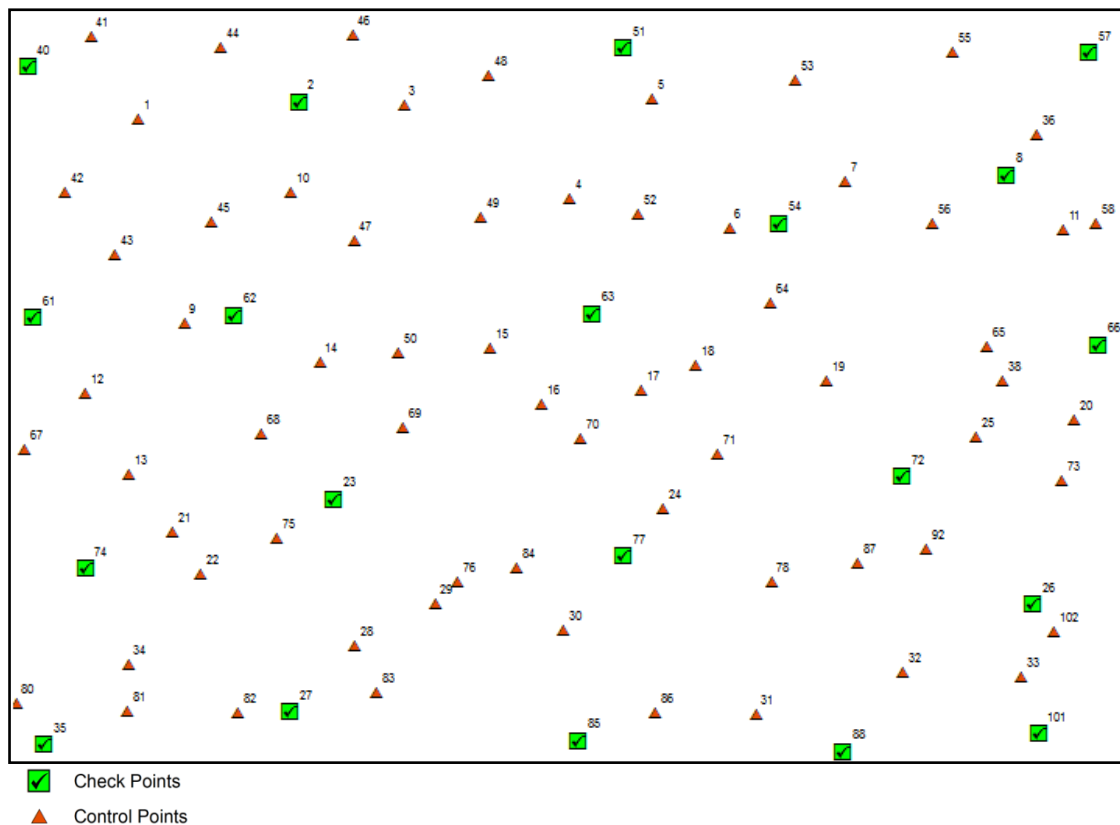
Εικόνα 7-19: Οριακή εμφάνιση φωτοσταθερών λόγω σκιάς και διερχόμενου οχήματος



Εικόνα 7-20: Διαφορετική απεικόνιση του ίδιου στόχου σε εικόνες διαφορετικών γραμμών πτήσης

Τέλος ορίζονται ποια σημεία θα συμμετέχουν στη διαδικασία του αεροτριγωνισμού ως σημεία ελέγχου (*check points*). Από τα συνολικά 85 διαθέσιμα σημεία, 65 από αυτά ορίζονται ως *control points* και 20 ως *check points*. Η επιλογή τους, που γίνεται με κριτήριο την κατά το δυνατόν ισοκατανομή τους σε ολόκληρη την περιοχή, εμφανίζεται όπως στην Εικόνα 7-21. Οι συντεταγμένες του συνόλου των σημείων, ανά κατηγορία, παρατίθενται στο Παράρτημα «Α», που αφορά και το τελικό αποτέλεσμα από την εφαρμογή του λογισμικού *BINGO-F* (αρχείο αναφοράς αεροτριγωνισμού: *bingo.lis*).

Το σύνολο των 85 σημείων έδωσε 918 παρατηρήσεις, καθώς έγιναν 459 σκοπεύσεις τους στις 102 εικόνες (εμφάνιση τεσσάρων με πέντε σημείων περίπου σε κάθε εικόνα). Από τις σκοπεύσεις αυτές, οι 112 αφορούσαν τα σημεία σύνδεσης.



Εικόνα 7-21: Κατανομή σημείων ελέγχου

7.5.5 Συλλογή σημείων σύνδεσης

Το στάδιο αυτό μπορεί να εκτελεστεί είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα. Επειδή η αυτόματη μέτρηση είναι αρκετά ακριβής και πολύ γρήγορη, η προσέγγιση που προτείνεται είναι να γίνει αρχικά αυτόματη εξαγωγή και στη συνέχεια ο χρήστης να ελέγξει τα αποτελέσματα και να κάνει τις απαραίτητες επεμβάσεις, προσθέτοντας, σβήνοντας ή διορθώνοντας σημεία.

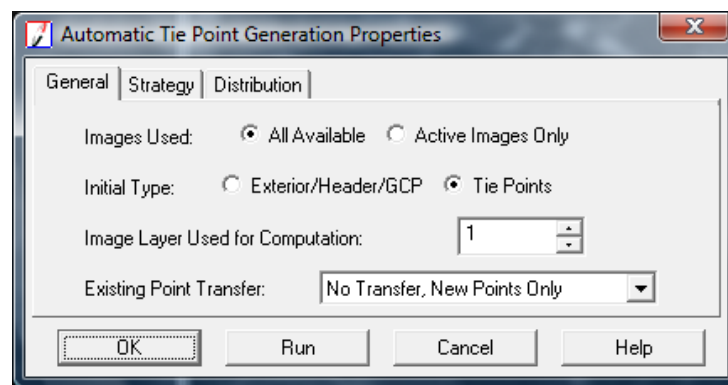
Για να γίνει αυτόματα η εξαγωγή των σημείων σύνδεσης είναι απαραίτητο το πρόγραμμα να έχει κάποια γνώση για την σχετική θέση των εικόνων στο μπλοκ. Έτσι μπορεί να περιορίσει σημαντικά τον χώρο αναζήτησης και να ολοκληρώσει την διαδικασία σε λίγο χρόνο. Αρχικά η σχετική θέση των εικόνων δεν είναι γνωστή και έτσι το πρόγραμμα προσφέρει δύο επιλογές για τον τρόπο που μπορεί να τη δηλώσει ο χρήστης.

Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει την χειροκίνητη στόχευση μερικών σημείων σύνδεσης σε όλες τις εικόνες. Ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός είναι δύο σημεία ανά εικόνα τα οποία θα πρέπει να την συνδέουν με τις γειτονικές της στο μπλοκ. Στην πράξη ο αριθμός των σημείων, που πρέπει να σκοπευθούν, είναι καλό να ξεπερνάει τα δύο προκειμένου να γίνεται καλύτερη σύνδεση. Αυτή η μέθοδος είναι αρκετά ακριβής, αλλά έχει αυξημένες απαιτήσεις χρόνου και κόπου.

Η δεύτερη μέθοδος που προσφέρεται είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού, με βάση κάποια στοιχεία για την πτήση, σε αυθαίρετο

γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Οι παράμετροι που θα υπολογιστούν σε αυτό το στάδιο τοποθετούν στο χώρο όλες τις λήψεις, με αποτέλεσμα να προκύπτουν και οι σχετικές τους θέσεις. Με τη μέθοδο αυτή εξοικονομείται χρόνος, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ωστόσο εάν το σχέδιο πτήσης παρουσιάζει έντονες αλλαγές διεύθυνσης του αεροσκάφους, απότομη εμφάνιση μεγάλων γωνιών στροφής και σημαντικές αυξομειώσεις των επικαλύψεων, τότε μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η δεύτερη προσέγγιση εμφάνισε προβλήματα, μη μπορώντας να εντοπίσει ομόλογα σημεία σε γειτονικές εικόνες, προφανώς λόγω της μεταβαλλόμενης κατά μήκος επικάλυψης (60-85%) και εξαιτίας των στροφών λόγω των ανέμων. Επειδή λοιπόν είχε προηγηθεί η σκόπευση των φωτοσταθερών, που στα επικαλυπτόμενα τμήματα των εικόνων ήταν πάνω από τρία (με εξαίρεση δυο ακραίες εικόνες, στις οποίες υπήρχαν δυο μόνο φωτοσταθερά), ακολουθήθηκε η πρώτη προσέγγιση συλλογής σημείων σύνδεσης, όπως φαίνεται και στην αντίστοιχη επιλογή της Εικόνα 7-22.



Εικόνα 7-22: Επιλογή τρόπου προσδιορισμού σχετικής θέσης εικόνων

Στο ίδιο παράθυρο επιλέχθηκε να μην αναζητηθούν τα υφιστάμενα εντοπισμένα σημεία και σε άλλες εικόνες (Επιλογή: *No Transfer, New Points Only*), καθώς δεν συστήνεται αυτός ο τρόπος αναζήτησης ομολόγων σημείων, με αυτό το εργαλείο.

Το λογισμικό για την αυτόματη αναγνώριση και μέτρηση ομολογιών, που βρίσκονται στις επικαλυπτόμενες περιοχές πολλών εικόνων, χρησιμοποιεί τη διαδικασία συνταύτισης. Αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εύρεση των ομολογιών:

- Αν γίνεται σύγκριση μεταξύ παραθύρων (υποπεριοχών) των εικόνων, τότε αναφερόμαστε σε **Επιφανειακή Συνταύτιση** (*Area Based Matching*).
- Αν πριν την προσπάθεια συνταύτισης έχουν εξαχθεί χαρακτηριστικά από την εικόνα (σημεία, γραμμές κ.α.) και γίνεται σε δεύτερο βήμα προσπάθεια να ταιριάξουν αυτά τα χαρακτηριστικά, τότε αναφερόμαστε σε **Συνταύτιση Χαρακτηριστικών** (*Feature Based Matching*).
- Αν η συνταύτιση γίνεται με βάση τις τοπολογικές σχέσεις των χαρακτηριστικών, τότε αναφερόμαστε σε **Σχεσιακή Συνταύτιση** (*Relational Matching*).

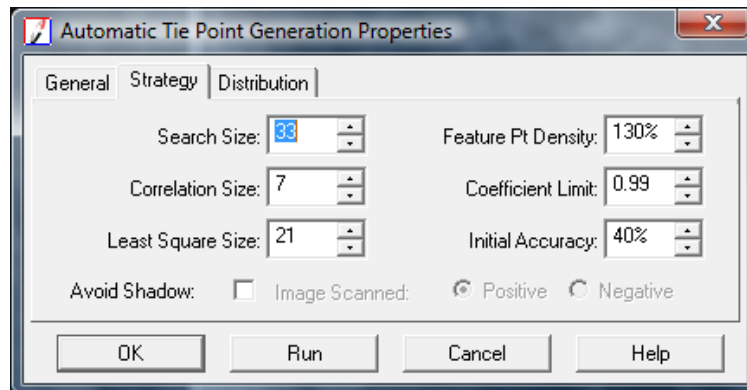
Το *ERDAS* βασίζει τους αλγορίθμους του στην **επιφανειακή συνταύτιση** (*Area Based Matching*), όπου οι οντότητες που συγκρίνονται είναι οι τιμές φωτεινότητας σε παράθυρα στις προς αναζήτηση γειτονικές εικόνες. Το ένα παράθυρο βρίσκεται στην πρώτη εικόνα και περικλείει το σημείο του οποίου ζητείται το ομόλογο στην δεύτερη εικόνα. Σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία παίζουν κυρίως: Η θέση του προτύπου, το μέγεθος του παραθύρου, η θέση της περιοχής αναζήτησης και το κριτήριο βέλτιστης συνταύτισης.

Οι βασικές μέθοδοι επιφανειακής συνταύτισης που εφαρμόζονται κατά σειρά από το λογισμικό *ERDAS* είναι:

- Συνταύτιση με συντελεστή συσχέτισης ρ και κριτήριο την τιμή του (*digital correlation*).

- Συνταύτιση με ελαχιστοτετραγωνική επίλυση (*least squares matching*) και κριτήριο την σύγκλιση του αλγορίθμου.

Οι ρυθμίσεις για τη διαδικασία της συνταύτισης, που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 7-23:



Εικόνα 7-23: Ρυθμίσεις αυτόματης εξαγωγής σημείων σύνδεσης

Από αυτές τροποποιήθηκαν σημαντικά, από τις προκαθορισμένες τιμές, οι ακόλουθες δυο:

- *Search Size*: Δόθηκε η τιμή 33, βάσει της σχέσης:

$$S_x = 250 \cdot (1 - p) \cdot \frac{Z_{max} - Z_{min}}{H} \quad (7.5-1)$$

Όπου στην εξίσωση (7.5-1): p είναι η κατά μήκος επικάλυψη, H το μέσο ύψος πτήσης και Z_i το μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο της περιοχής. Η σχέση αυτή προκύπτει από το χειρισμό των πυραμίδων και συστήνεται από το λογισμικό ως ο ορθός τρόπος υπολογισμού της τιμής για το πεδίο αυτό.

- *Coefficient Limit* (Για την συνταύτιση με τον συντελεστή συσχέτισης ρ): Τέθηκε το υψηλότερο όριο 0.99, που αποδίδει λιγότερα σημεία, αλλά και λιγότερα λάθη.

Ο υπολογισμός της τιμής του συντελεστή συσχέτισης ρ , βασίζεται στην παράσταση:

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_1(r,c) - \mu_1)(g_2(r,c) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_1(r,c) - \mu_1)^2 \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_2(r,c) - \mu_2)^2}} \quad (7.5-2)$$

όπου:

ρ	ο συντελεστής συσχέτισης
σ_{12}	η συσχετιστικότητα των παραθύρων στις δύο εικόνες
σ_1	η μεταβλητότητα της 1 ^{ης} εικόνας (πρότυπο)
σ_2	η μεταβλητότητα της 2 ^{ης} εικόνας (παραθύρου σύγκρισης)
$g_1(r,c)$	η τιμή του τόνου στην θέση (r,c) του προτύπου
μ_1	η μέση τιμή των τόνων στο πρότυπο
$g_2(r,c)$	η τιμή του τόνου στην θέση (r,c) του παραθύρου σύγκρισης
μ_2	η μέση τιμή των τόνων στο παράθυρο σύγκρισης
R, C	το πλήθος των γραμμών και στηλών στο πρότυπο

- *Least Square Size* (Για την συνταύτιση με ελαχιστοτετραγωνική επίλυση): Δόθηκε η τιμή 21, που αφορά το μέγεθος του παραθύρου σύγκρισης (21 x 21 pixel).

Στη μέθοδο αυτή δίνεται η δυνατότητα στο παράθυρο σύγκρισης να αλλάζει και θέση αλλά και μορφή. Οπότε το μοντέλο που συνήθως χρησιμοποιείται, δίνει την δυνατότητα μίας ραδιομετρικής μετάθεσης και αλλαγής της κλίμακας (φωτεινότητα και αντίθεση, αντίστοιχα) και έχει την μορφή:

Γεωμετρικός Μετασχηματισμός:

$$T_G: f(x,y) = g[T_G(x,y)]$$

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_g = a_{10} + a_{11}x_f + a_{12}y_f \\ y_g = a_{20} + a_{21}x_f + a_{22}y_f \end{cases} \quad (7.5-3)$$

Ραδιομετρικός Μετασχηματισμός:

$$T_R: f(x,y) = g[T_R(x,y)] \quad (7.5-4)$$

$$f = b + c \cdot g$$

Και με συνδυασμό των (7.5-3) και (7.5-4) προκύπτει:

$$f(x,y) = b + c \cdot g[(a_{10} + a_{11}x + a_{12}y), (a_{20} + a_{21}x + a_{22}y)] \quad (7.5-5)$$

Όπου:

$f(x,y)$ η συνάρτηση τόνων της πρώτης εικόνας (προτύπου)

$g(x,y)$ η συνάρτηση τόνων της δεύτερης εικόνας (παραθύρου σύγκρισης).

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία εξαγωγής, ελέγχθηκαν τα σημεία που προέκυψαν και διορθώθηκαν κάποια σφάλματα, που οφείλονταν στον επηρεασμό των αλγορίθμων από επαναλαμβανόμενες υφές, ραδιομετρικές μεταβολές, πολλαπλές λύσεις κτλ, στοιχεία τα οποία συγκαταλέγονται στα μειονεκτήματα της διαδικασίας. Σε αυτά πρέπει να προστεθεί και ο μεγάλος χρόνος επεξεργασίας, όπου για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με μεταβολές των παραμέτρων, οι χρονικές απαιτήσεις κυμαίνονταν σε διάστημα 3 ωρών, δεδομένης της υπολογιστικής δύναμης του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε.

Επειδή ο αριθμός των σημείων σύνδεσης αρχικά ήταν πάνω από 4500, ήταν πρακτικά αδύνατος ο έλεγχος καθενός από αυτά και η σύγκριση με τα ομόλογά του στις γειτονικές εικόνες. Για το σκοπό αυτό αρχικά πραγματοποιήθηκε μια στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της αυτόματης εξαγωγής και ο έλεγχος ξεκίνησε από τα σημεία με το μεγαλύτερο *RMSE*. Τα σημαντικότερα σφάλματα που εντοπίστηκαν στην πράξη, είχαν να κάνουν με:

- Την επίδραση των σκιών, όπου λαμβάνονταν σαν σημεία σύνδεσης οι σκιές της κορυφής των δέντρων ή των σπιτιών, που φυσικά ανάλογα με την θέση λήψης δεν ανταποκρίνονταν στο ίδιο σημείο.
- Την συλλογή των σημείων σύνδεσης επί του περιθωρίου των εικόνων στα ψηφία αρίθμησής τους, που είχαν διατηρηθεί κατά τη σάρωση, για την αναγνώρισή τους. Τελικά διατηρήθηκαν **4275 σημεία σύνδεσης**, για τις 102 εικόνες.

7.5.6 Εκτέλεση αεροτριγωνισμού

Αναφέρονται εδώ οι **ρυθμίσεις**, που έλαβαν χώρα κατά την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού μέσα από το *LPS*. Ως σημαντικότερες από αυτές, κρίνονται:

- Οι ρυθμίσεις καθορισμού της ακρίβειας των φωτοσταθερών, για τις οποίες τέθηκαν οι τιμές: $\sigma_x = \pm 0.00148$ m, $\sigma_y = \pm 0.0015$ m, $\sigma_z = \pm 0.00228$ m.
- Η ακρίβεια των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων, όπου διατηρήθηκε η προεπιλογή από το πρόγραμμα της ακρίβειας σκόπευσης ενός σημείου με 0.33 pixel.
- Ο καθορισμός των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού, ως αγνώστων για τη συνόρθωση και η επιλογή του υπολογισμού της ακρίβειας τους μετά τη συνόρθωση.
- Οι τυπικές αποκλίσεις των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού. Οι τιμές αυτές ελήφθησαν τελικώς κατόπιν της εφαρμογής με το *BINGO-F* και αφού πραγματοποιήθηκαν κατάλληλοι στατιστικοί έλεγχοι για τη βέλτιστη επιλογή των τιμών τους (παράγραφος 7.6.2). Το πιστοποιητικό βαθμονόμησης της μηχανής δεν διέθετε τιμές για αυτά τα στοιχεία, τα οποία καθορίζονται **εμπειρικά**. Οι δοκιμές

έγιναν τελικά, ορίζοντας σαν τυπική απόκλιση 50 μm στα στοιχεία c , x_o , y_o .

- Η αποφυγή διόρθωσης λόγω καμπυλότητας της γης, εξαιτίας του χαμηλού ύψους πτήσης.
- Η επιλογή καθ' ενός διαδοχικά, των μοντέλων επιπρόσθετων παραμέτρων, που ενσωματώνονται στο λογισμικό και αφορούν τις επιλογές: *No additional parameters*, *Bauer's simple model (3)*, *Jacobsen's simple model (4)*, *Ebner's orthogonal model (12)*, *Brown's physical model (14)*, *Lens distortion model (2)*. Ο αριθμός στην παρένθεση, αφορά τις επιπρόσθετες παραμέτρους του κάθε μοντέλου, που συνοπτικά έχουν ως εξής:

Bauer's simple model (3): Δυο παράμετροι αφορούν τις αφινικές παραμορφώσεις (μη ορθογωνικότητα των αξόνων του συστήματος εικονοσυντεταγμένων, διαφορετική κλίμακα των πλευρών του εικονοστοιχείου) και μια παράμετρος την συμμετρική ακτινική διαστρόφη.

$$\begin{aligned}\Delta x &= \alpha_1 x(r^2 - r_o^2) + \alpha_2 x \\ \Delta y &= \alpha_1 y(r^2 - r_o^2) - \alpha_2 y + \alpha_3 x\end{aligned}\quad (7.5-6)$$

Jacobsen's simple model (4): Οι παράμετροι διορθώνουν τα σφάλματα των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων, που οφείλονται στις πρώτου και δευτέρου βαθμού διαστρώφες και που σχετίζονται με τις αφινικές παραμορφώσεις και την ακτινική διαστρόφη.

$$\begin{aligned}\Delta x &= \alpha_1 x(r^2 - r_o^2) + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ \Delta y &= \alpha_1 y(r^2 - r_o^2) - \alpha_2 y + \alpha_3 x + \alpha_4 x^2\end{aligned}\quad (7.5-7)$$

Ebner's orthogonal model (12): Το μοντέλο αυτό, παρουσιάστηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 3.7.2.

Brown's physical model (14): Αρκετά μοντέλα δημοσιεύτηκαν από τον *Brown* κατά καιρούς (παράγραφος 3.7.2), αλλά στο συγκεκριμένο λογισμικό, ενσωματώνεται το ακόλουθο, για την αποκατάσταση σφαλμάτων οφειλόμενων σε πολλές πηγές: μη επιπεδότητα και παραμορφώσεις φιλμ, διαστρώφες φακών κ.τ.λ.

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 y^2 + a_5 x^2 y + a_6 xy^2 + a_7 x^2 y^2 \\ &+ \frac{x}{c} a_{13} x^2 y^2 + a_{14} x(x^2 + y^2) \\ \Delta y &= a_8 xy + a_9 x^2 + a_{10} x^2 y + a_{11} xy^2 + a_{12} x^2 y^2 \\ &+ \frac{y}{c} a_{13} x^2 y^2 + a_{14} x(x^2 + y^2)\end{aligned}\quad (7.5-8)$$

Lens distortion model (2): Το μοντέλο αυτό δίνει τις παραμέτρους της ακτινικής διαστρώφης και είναι πολύ αποτελεσματικό για ερασιτεχνικές μηχανές. Δίνεται δε, από τη σχέση:

$$\begin{aligned}\Delta x &= k_1 x r^2 + k_2 x r^4 \\ \Delta y &= k_1 y r^2 + k_2 y r^4\end{aligned}\quad (7.5-9)$$

7.5.7 Αποτελέσματα LPS-ERDAS

Στον Πίνακα 7-1 παρουσιάζονται επιλεκτικά από την αναφορά του αεροτριγωνισμού, οι πληροφορίες κάθε επιμέρους εκτέλεσης, από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με τις παραπάνω ρυθμίσεις και που αφορούν:

- Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού και τις επιπρόσθετες παραμέτρους,

κατά τη σειρά που ανταποκρίνεται στην αρίθμηση των παραμέτρων που προηγήθηκε στην παράγραφο 7.5.6.

- Το *RMSE* των φωτοσταθερών (65)
- Το *RMSE* των σημείων ελέγχου (20)
- Το συνολικό σφάλμα *RMSE*.

Παράμετρος	Μέθοδος					
	No additional parameters		Bauer's simple model (3)		Jacobsen's simple model (4)	
	Τιμή	σο	Τιμή	σο	Τιμή	σο
c (mm)	153.206	0.0088	153.2111	0.0081	153.2097	0.0081
xo (mm)	-0.0407	0.002	0	0.002	0.0006	0.002
yo (mm)	0.0032	0.002	-0.0008	0.0019	0.0001	0.0019
AP	-	-	-3.6018E-09	1.0107E-10	-3.6218E-09	1.0097E-10
			-2.8773E-05	5.1154E-07	-2.8785E-05	5.1087E-07
			2.4873E-06	9.5941E-07	1.2746E-06	4.7909E-07
			-	-	-6.4359E-08	7.6676E-09
Control RMSE (m)						
Ground X	0.0007		0.0005		0.0005	
Ground Y	0.0007		0.0005		0.0005	
Ground Z	0.0013		0.0012		0.0011	
Check Point RMSE (m)						
Ground X	0.0222		0.013		0.0122	
Ground Y	0.0386		0.0157		0.0152	
Ground Z	0.1049		0.0579		0.057	
Total image unit-Weight RMSE						
	0.004		0.0037		0.0037	
Παράμετρος	Μέθοδος					
	Ebner's orthogonal model (12)		Brown's physical model (14)		Lens distortion model (2)	
	Τιμή	σο	Τιμή	σο	Τιμή	σο
c (mm)	153.1896	0.0079	153.1915	0.0076	153.2035	0.0085
xo (mm)	0.0089	0.0019	0.003	0.0019	-0.0406	0.002
yo (mm)	0.0046	0.0018	0.0087	0.0018	0.004	0.0019
AP	-2.3137E-05	5.1283E-07	-1.4421E-05	1.2882E-06	-1.0101E-08	3.1710E-10
	4.3475E-07	4.5988E-07	-1.6066E-06	1.0728E-06	2.6130E-13	1.2667E-14
	-7.6977E-08	3.5410E-09	1.8745E-07	1.5845E-08	-	-
	5.2525E-08	4.8490E-09	-2.7320E-07	1.2250E-08	-	-
	-2.6654E-07	1.0168E-08	1.7015E-11	1.2002E-10	-	-
	-6.7245E-08	7.5908E-09	-6.3034E-09	1.9743E-10	-	-
	-8.0755E-09	1.7094E-10	-2.0314E-12	2.0751E-12	-	-
	1.1890E-09	1.1916E-10	-2.4206E-07	1.3185E-08	-	-
	3.0335E-11	1.2451E-10	-7.3938E-08	1.0310E-08	-	-
	1.4155E-10	1.2864E-10	3.4953E-09	1.6639E-10	-	-
	-1.6194E-12	2.1493E-12	5.9286E-10	1.2471E-10	-	-
	1.4487E-12	1.9649E-12	2.9862E-12	1.8962E-12	-	-
	-	-	5.0895E-13	2.4763E-14	-	-
-	-	-7.1779E-09	1.6048E-10	-	-	
Control RMSE (m)						
Ground X	0.0005		0.0005		0.0006	

Ground Y	0.0005	0.0005	0.0006
Ground Z	0.0011	0.0011	0.0011
Check Point RMSE (m)			
Ground X	0.0128	0.0128	0.0212
Ground Y	0.0138	0.0135	0.033
Ground Z	0.0602	0.037	0.0571
Total image unit-Weight RMSE			
	0.0035	0.0034	0.0039

Πίνακας 7-1: Αποτελέσματα βαθμονόμησης LPS/ERDAS

Επιπρόσθετα στο Παράρτημα «Β» παρατίθεται και ο Πίνακας Β-1, που αφορά αντίστοιχες δοκιμαστικές εκτελέσεις με τις παραπάνω, θεωρώντας όμως τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού **σταθερά (fixed values)**, προς σύγκριση με τα αντίστοιχα τυπικής απόκλισης 50 μm του Πίνακα 7-1. Παρατηρείται τότε ότι τα αποτελέσματα έχουν μεγαλύτερη τιμή.

Τέλος, από το αρχείο αναφοράς του αεροτριγωνισμού, εκτός από τα παραπάνω στοιχεία, απομονώθηκαν οι μετρούμενες εικονοσυντεταγμένες του συνόλου των σημείων σε ξεχωριστό αρχείο, τύπου *ASCII*. Αυτό στη συνέχεια μορφοποιήθηκε κατάλληλα, ώστε να αποτελέσει ένα από τα δυο αρχεία εισόδου στο *BINGO-F*, όπως περιγράφεται στη σχετική παράγραφο 7.6.1.

7.5.8 Ακρίβειες

Η θεώρηση ξεκινά από την παραδοχή ότι γενικά η ακρίβεια της χειροκίνητης (*manual*) μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων είναι της τάξης του **0.3 pixel** (μη συμπεριλαμβανομένου του σφάλματος του σαρωτή) και ότι η ακρίβεια της ίδιας μέτρησης με αυτόματο τρόπο (*matching*) είναι **0.1-0.3 pixel** για προσημασμένα σημεία και **0.3-0.5p** για φυσικά σημεία (Πατιάς, 2003). Στις σχέσεις αυτές το *p* αφορά το μέγεθος του *pixel*. Συνεπώς αναμένονται οι εξής ακρίβειες (*rms* – σ):

(α) Εσωτερικός Προσανατολισμός

- Χειροκίνητη (*Manual*) Ακρίβεια *i.o.* = $0.3 - 0.5 p$
- Αυτόματη (*Automatic*) (για προσημασμένα σημεία) Ακρίβεια *i.o.* = $0.1 - 0.3 p$

Για την περίπτωση των εικόνων της παρούσας διπλωματικής με μέγεθος *pixel* = 12 μm οι αναμενόμενες ακρίβειες του εσωτερικού προσανατολισμού για κάθε είδος μέτρησης έχουν ως εξής: *manual* = 3.6 – 6 μm , *automatic* = 1.2- 3.6 μm .

Δεδομένης της χειροκίνητης σκόπευσης των εικονοσημάτων, τα αποτελέσματα κυμαίνονταν από 3.75 έως 9.08 μm με υπολογισμένο μέσο όρο γύρω στα 5.8 μm .

(β) Αεροτριγωνισμός

Οι υπολογισμοί ξεκινούν πάλι από τη θεωρούμενη ακρίβεια της χειροκίνητης (*manual*) σκόπευσης των εικονοσυντεταγμένων (Πατιάς, 2003), από όπου προκύπτει:

$$\sigma_o^{\text{εικονοσυντεταγμένων}} = 0.3 \cdot p \quad (7.5-10)$$

$$\sigma_p = \sigma_o \sqrt{2} = 0.3p\sqrt{2} = 0.5p \quad (7.5-11)$$

$$\sigma_{xy} = 2 \cdot \sigma_o = 0.6p \quad (7.5-12)$$

$$\sigma_z = 2 \cdot \frac{c}{b} \sigma_o \quad (7.5-13)$$

Από την (7.5-13) όμως και τη θεμελιώδη σχέση που δίνει την βάση στην εικόνα, και όπως αυτή υπολογίζεται για την παρούσα εφαρμογή, προκύπτει η σχέση (7.5-14):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= 2 \cdot \frac{c}{b} \sigma_o \\ b &= \frac{B}{m_b} = \frac{S \left(1 - \frac{l}{100}\right)}{m_b} = \frac{s \cdot m_b \left(1 - \frac{l}{100}\right)}{m_b} = s \left(1 - \frac{l}{100}\right) = 230 \cdot (1 - 0.6) = 92 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\sigma_z = 2 \cdot \frac{153}{92} \sigma_o = 3.34 \sigma_o = 1.67 \sigma_{xy} = 1.67 \cdot 0.6 \cdot p \approx 1p \quad (7.5-14)$$

που δίνει την τάξη της προβλεπόμενης υψομετρικής ακρίβειας, ίση με το μέγεθος του εικονοστοιχείου στην εικόνα, θεωρώντας μια κατά μήκος επικάλυψη 60%.

☞ Επομένως για την συγκεκριμένη περίπτωση, με μέγεθος εικονοστοιχείου $p=12\mu\text{m}$ και κλίμακα 1:5250, οι τιμές που προκύπτουν έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= 0.6p = 7.2 \mu\text{m} \Rightarrow \sigma_{xy} = \pm 3.8 \text{ cm} \\ \sigma_z &= 12 \mu\text{m} \Rightarrow \sigma_z = \pm 6.3 \text{ cm} \\ \sigma_o^{\text{εικονοσυντεταγμένων}} &= 0.3 \cdot p = 3.6 \mu\text{m} = \pm 1.9 \text{ cm} \end{aligned}$$

Βάσει της θεώρησης αυτής και εξετάζοντας τα αποτελέσματα του *LPS* για την ακρίβεια στα σημεία ελέγχου και τα φωτοσταθερά, τίθεται θέμα ακρίβειας **μόνο** για το μοντέλο χωρίς επιπρόσθετες παραμέτρους, όπου η τιμή της υψομετρικής ακρίβειας κυμαίνεται στα 10.49cm, 4.13cm παραπάνω από την αναμενόμενη, ενώ η οριζοντιογραφική ακρίβεια είναι 0.65cm παραπάνω από την θεωρητικά επιτρεπόμενη.

Επισημαίνεται το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος φακός της μηχανής των 153 mm περίπου, χαρακτηρίζεται ευρυγώνιος, καθώς η εστιακή του απόσταση είναι μικρότερη από τη διαγώνιο του καρέ του φιλμ (230mm x 230mm). Το είδος του φακού δεν παίζει αξιολογικό ρόλο στην οριζοντιογραφική ακρίβεια παρά μόνο στην υψομετρική (Kraus, 2003), όπου σημειώνονται και οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των διαφορετικών χρησιμοποιούμενων μοντέλων (Πίνακας 7-1).

7.6 Εφαρμογή BINGO-F

7.6.1 Ρυθμίσεις Λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας του προγράμματος είναι η ανάγνωση δύο αρχείων, τα οποία περιέχουν δεδομένα και στη συνέχεια η καταγραφή των αποτελεσμάτων μέσα σε νέα αρχεία. Τα αρχεία που ζητά το πρόγραμμα πρέπει να έχουν συγκεκριμένα ονόματα *image.dat* και *geoin.dat*, εκτός εάν δημιουργηθεί ένα αρχείο *project.dat* μέσα στο οποίο θα καταγραφούν διαφορετικά ονόματα αρχείων και η διεύθυνσή τους στο σκληρό δίσκο.

Το αρχείο *image.dat* περιέχει τα δεδομένα των εικονοσυντεταγμένων, διατεταγμένα με συγκεκριμένη μορφή. Ένα δείγμα της μορφής αυτής φαίνεται στην Εικόνα 7-24:

Αριθμός φωτογραφίας	4	1.755	103.490	Αριθμός κάμερας	1
	401	-15.313	-9.583		
	402	-17.120	-97.989		
	403	113.579	-7.362		
Όνομα σημείου	4	95.341	100.518		
	111005	50.365	-59.204		
	52	99.234	-90.208		
Σύμβολο για αφαίρεση μέτρησης από τη συνόρθωση	*	8	-13.952	-85.063	
	-99				Τέλος μετρήσεων για τη φωτογραφία

Εικόνα 7-24: Αρχείο *image.dat*

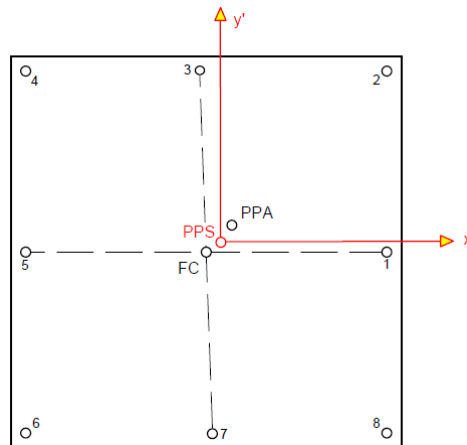
Υπάρχουν όμως κάποιοι περιορισμοί σχετικά με την αρίθμηση των σημείων. Για παράδειγμα δεν επιτρέπεται η χρήση των ψηφίων 1-8, που δεσμεύονται για την ονομασία των εικονοσημάτων, ενώ μπορούν να δημιουργηθούν «ομάδες» σημείων προκαθορισμένης ακρίβειας με αρίθμηση μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Τα φωτοσταθερά με αρίθμηση 1-9 μετονομάστηκαν σε 9001-9009, λόγω του περιορισμού αυτού και έτσι αναφέρονται στα αποτελέσματα.

Το πρόγραμμα ενσωματώνει το μοντέλο των 24 επιπρόσθετων παραμέτρων των *Mueller, Bauer and Jacobsen*, για τις οποίες όμως δεν υπήρχε ανάλυση του τρόπου επίδρασης της κάθε μιας. Στο *manual* του προγράμματος οπτικοποιείται η επίδραση κάποιων παραμέτρων με τρόπο ανάλογο της Εικόνας 7-28, χωρίς ωστόσο να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για το είδος της παραμόρφωσης στην επίδραση της οποίας αναφέρονται.

Επιπρόσθετα το λογισμικό μπορεί να δεχθεί την τυχόν υπάρχουσα πληροφορία ακτινικής διαστροφής ενός φακού μηχανής και να τη λάβει υπ' όψιν στους υπολογισμούς για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, κάτι το οποίο έγινε.

Ως κέντρο των εικονοσυντεταγμένων λαμβάνει το *PPS* και ως *principal point* στο αρχείο των παραμέτρων της μηχανής, πρέπει να οριστεί η θέση του *PPA* ως προς το *PPS*, στοιχείο που φαίνεται στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης των μετρητικών μηχανών.

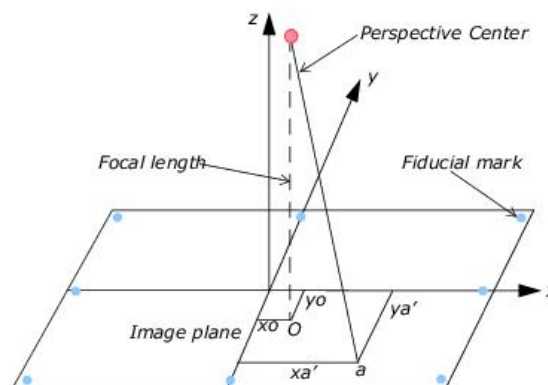
Επίσης στις εργασίες βαθμονόμησης, συνιστάται οι εικονοσυντεταγμένες εισόδου, να μην έχουν διορθωθεί νωρίτερα από ακτινική διαστροφή ή καμπυλότητα της γης και διάθλαση και επίσης να μην έχουν αναφερθεί ως προς το *PPA*.



Σχήμα 7-4: Ορισμός του PPS ως αρχή μέτρησης εικονοσυντεταγμένων στο πρόγραμμα BINGO-F

Πηγή: Kruck, 1985-2003

Το στοιχείο αυτό διαφέρει όμως στο *LPS-ERDAS*, το οποίο στον ορισμό των στοιχείων της μηχανής ζητά ως *principal point*: την τομή της καθέτου από το κέντρο προβολής (*perspective center*) προς το επίπεδο της εικόνας (O), σε σχέση με το κέντρο των εικονοσημάτων *FC* (*fiducial center*):

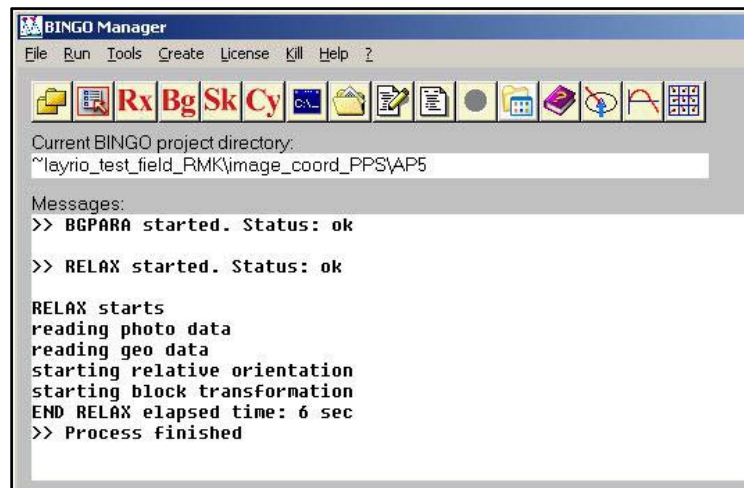


Σχήμα 7-5: Ορισμός FC ως αρχή μέτρησης εικονοσυντεταγμένων στο LPS

Πηγή: LeicaGeosystems, 2008

Στο αρχείο *geoin.dat* επιλέγονται οι ρυθμίσεις για τη συνόρθωση και επίσης καταγράφονται τα γεωδαιτικά δεδομένα για τα φωτοσταθερά. Η ρύθμιση των παραμέτρων γίνεται με την απαραίτητη βοήθεια από το εγχειρίδιο του προγράμματος, στο οποίο εξηγούνται οι αντιστοιχίες των παραμέτρων που φαίνονται μέσα στο αρχείο.

Για την εκκίνηση της συνόρθωσης πρέπει να εφαρμοστεί το πρόγραμμα *relax*, το οποίο ελέγχει τα δεδομένα και υπολογίζει προσεγγιστικές τιμές, που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Το πρόγραμμα *relax* δημιουργεί στον ίδιο φάκελο εργασίας δύο αρχεία: το *relax.lis* που περιέχει τα δεδομένα και τις παραμέτρους που έχουν ληφθεί υπόψη, καθώς και συμπληρωματικά στοιχεία για τα μοντέλα. Δημιουργείται επίσης το αρχείο *itera.dat*, στο οποίο καταγράφονται οι αρχικές προσεγγιστικές τιμές που υπολογίστηκαν.



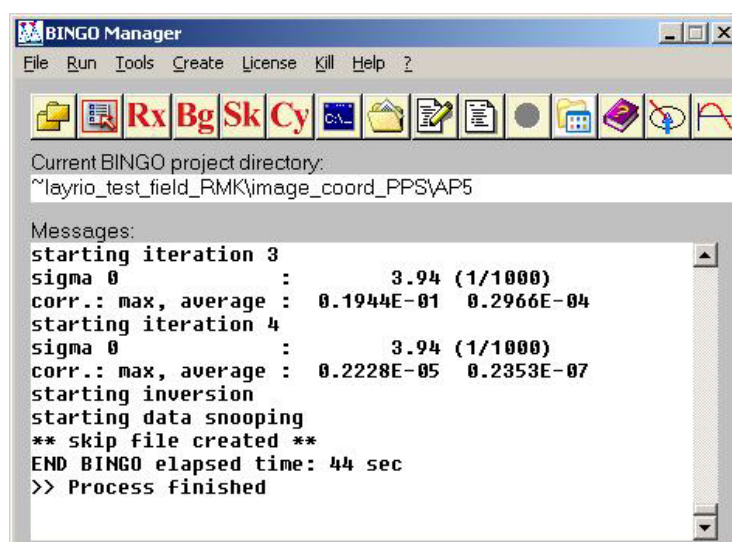
```

BINGO Manager
File Run Tools Create License Kill Help ?
Rx Bg Sk Cy
Current BINGO project directory:
~\layrio_test_field_RMK\image_coord_PPS\AP5
Messages:
>> BGPARA started. Status: ok
>> RELAX started. Status: ok
RELAX starts
reading photo data
reading geo data
starting relative orientation
starting block transformation
END RELAX elapsed time: 6 sec
>> Process finished

```

Εικόνα 7-25: Εφαρμογή RELAX

Στη συνέχεια πρέπει να εφαρμοστεί το πρόγραμμα *BINGO-F* το οποίο εκτελεί τη συνόρθωση, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα από τα δύο αρχεία *image.dat* και *geoin.dat*, καθώς και τις τιμές του *itera.dat*. Το πρόγραμμα εκτελεί επαναλήψεις, λαμβάνοντας κάθε φορά ως προσεγγιστικές τιμές τις πιο πρόσφατα υπολογισμένες. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να φτάσουν το μέγιστο που έχει καθοριστεί ή μέχρι να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη ακρίβεια.



```

BINGO Manager
File Run Tools Create License Kill Help ?
Rx Bg Sk Cy
Current BINGO project directory:
~\layrio_test_field_RMK\image_coord_PPS\AP5
Messages:
starting iteration 3
sigma 0      :          3.94 (1/1000)
corr.: max, average : 0.1944E-01 0.2966E-04
starting iteration 4
sigma 0      :          3.94 (1/1000)
corr.: max, average : 0.2228E-05 0.2353E-07
starting inversion
starting data snooping
** skip file created **
END BINGO elapsed time: 44 sec
>> Process finished

```

Εικόνα 7-26: Εφαρμογή BINGO-F

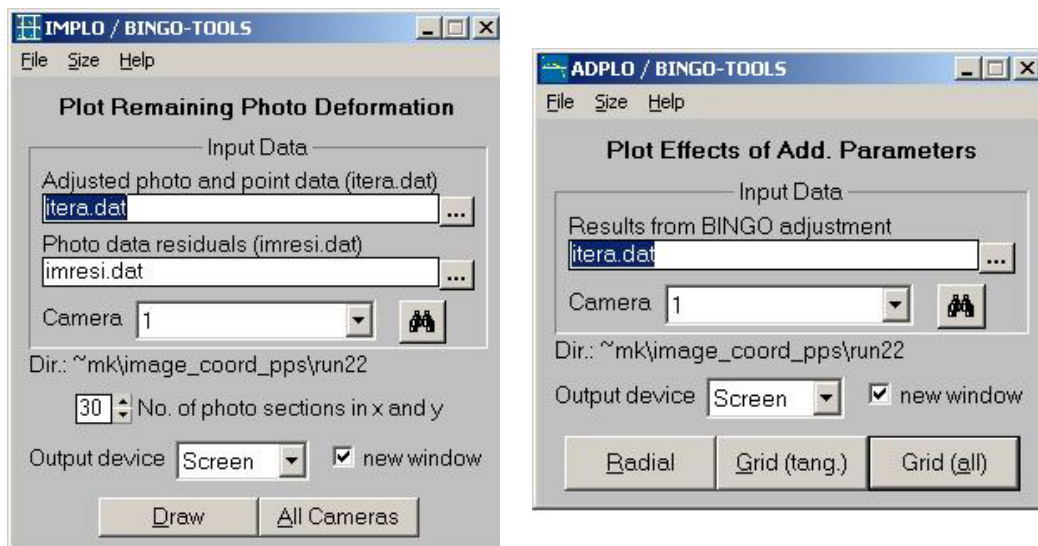
Τα αποτελέσματα καταγράφονται μέσα στο αρχείο *itera.dat*, το οποίο πλέον περιέχει τα τελικά στοιχεία για τους προσανατολισμούς των εικόνων και τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων της συνόρθωσης. Επίσης, δημιουργούνται άλλα δύο αρχεία, το *bingo.lis* το

οποίο είναι συγκεντρωτικό και περιέχει όλες τις πληροφορίες για τη συνόρθωση και το *reselli.dat* το οποίο περιέχει τις τυπικές αποκλίσεις των προσδιορισμένων σημείων. Τέλος, μπορεί να δημιουργηθεί και ένα ακόμη αρχείο με όνομα *skip.dat*, στο οποίο περιέχονται σημεία που απέκλεισε από μόνο του το πρόγραμμα κατά τη συνόρθωση. Ο αυτόματος αποκλεισμός πραγματοποιείται για σημεία με μεγάλα εναπομείναντα σφάλματα.

Η δυνατότητα αυτόματης ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων υλοποιείται στο *BINGO-F* με τη μέθοδο *data snooping*, βάσει της μεθόδου του *Baarda* για τα γεωδαιτικά δίκτυα, που πραγματοποιήθηκε τελικώς με ταυτόχρονη εφαρμογή των προγραμμάτων *bingo* και *skip* και βάσει αυτού εξήχθησαν τα τελικά αποτελέσματα.

Από τα παραπάνω τελικά αρχεία αναφοράς, το πιο χρήσιμο θεωρείται το *bingo.lis*, στο οποίο περιέχονται όλα τα αποτελέσματα, οι τυπικές αποκλίσεις, τα εναπομείναντα σφάλματα καθώς και τα μηνύματα λάθους του προγράμματος, που τυχόν υπάρχουν. Τα μηνύματα λάθους, καθώς και οι θέσεις των σφαλμάτων στο αρχείο προσδιορίζονται με αστερίσκους (*) στην αρχή της κάθε σειράς. Η προσεκτική ανάλυση των στοιχείων του αρχείου αυτού βοηθά στη ρύθμιση νέων παραμέτρων για τη βελτίωση της συνόρθωσης.

Το λογισμικό πακέτο *BINGO-F* συνοδεύεται και από άλλα μικρά προγράμματα, τα οποία σκοπό έχουν να εκτελέσουν συμπληρωματικές λειτουργίες για τη συνόρθωση και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (Εικόνα 7-18).



Εικόνα 7-27: Εκκίνηση βοηθητικών προγραμμάτων BINGO-F για οπτικοποίηση αποτελεσμάτων

7.6.2 Επιλογή τιμών παραμέτρων

Οι βασικότερες παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν πριν από μία συνόρθωση, παρουσιάζονται στη συνέχεια με τις τιμές που έλαβαν **τελικά**:

- Τυπικό σφάλμα μέτρησης εικονοσυντεταγμένων (*a priori standard deviation*): Κατά x, y : 3.9 μm (0.33 pixel στην εικόνα με μέγεθος εικονοστοιχείου 12 μm)
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων: 8
- Μέγιστη τιμή διόρθωσης στο διάνυσμα λύσης: 0.01 και κατά περίπτωση 0.001
- Ακρίβεια φωτοσταθερών σημείων: $\sigma_x = \pm 0.00148\text{m}$, $\sigma_y = \pm 0.0015\text{m}$, $\sigma_z = \pm 0.00228\text{m}$
- Παράμετροι μηχανής: $c = 153.12\text{ mm}$, $x_o = 0.013\text{ mm}$, $y_o = 0.000\text{ mm}$
- Τυπικό σφάλμα στοιχείων μηχανής: Κατόπιν δοκιμών επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές: $\sigma_c = \sigma_{x_o} = \sigma_{y_o} = \pm 0,050\text{ mm}$
- Επιλογή επιπρόσθετων παραμέτρων (1-10), κρατώντας τις μισές περίπου από το σύνολο των 24 διαθέσιμων και εξετάζοντας την επίδραση κάθε μιας, από σχετικά γραφήματα στο *manual* του λογισμικού.

Η μεταβολή των τιμών στο πρώτο και τα δυο τελευταία από τα παραπάνω στοιχεία επιδρούσε σημαντικά στα τελικά αποτελέσματα και αποτέλεσε αφορμή για την εκτέλεση πολλών δοκιμών (πάνω από 50), για την κατανόηση του τρόπου επίδρασής τους και την τελική επιλογή τιμής, η οποία όπως τονίζεται και στις οδηγίες χρήσης του προγράμματος γίνεται **εμπειρικά και βάσει κάποιων στατιστικών ελέγχων**.

Ένας από τους ελέγχους ήταν η τιμή του λόγου (*a posteriori variance-component estimation*):

$$\text{Test value} = s(a \text{ posteriori}) / s(a \text{ priori}) \quad (7.6-1)$$

Η τιμή αυτή, που πρέπει να προσεγγίζει τη μονάδα, υπολογίζεται για κάθε μια από τις ομάδες στοιχείων:

- Μετρούμενες εικονοσυντεταγμένες (*Photo coordinates*)
- Στοιχεία της μηχανής (*Camera data*) και
- Συντεταγμένες των φωτοσταθερών (*Coordinates GCP*).

☞ Επίδραση τυπικών σφαλμάτων

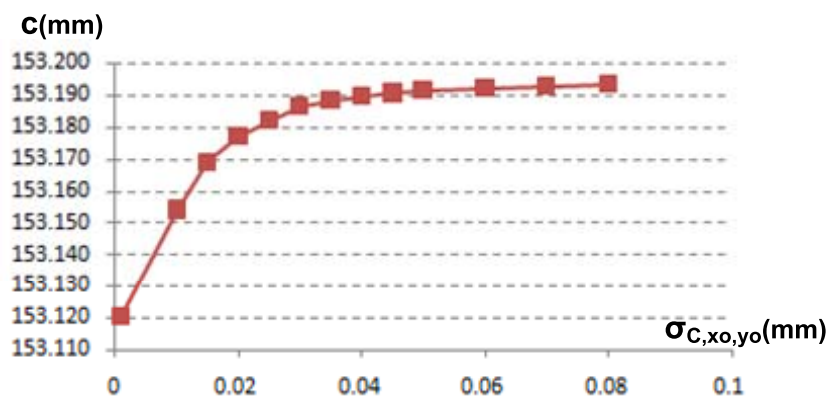
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των τυπικών σφαλμάτων, εκτελέστηκαν δοκιμές με τις παραπάνω ρυθμίσεις και επιλέγοντας τις **επιπρόσθετες παραμέτρους 1 έως 10**. Έτσι:

(α) Ως προς τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης των εικονοσυντεταγμένων διαπιστώθηκε ότι με την προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα τιμή των 5 μm , η τιμή του λόγου (*test value*) ήταν 0.70. Ο ορισμός της τιμής στα 3.9 μm , οδήγησε σε μεταβολή της τιμής του λόγου σε 0.89.

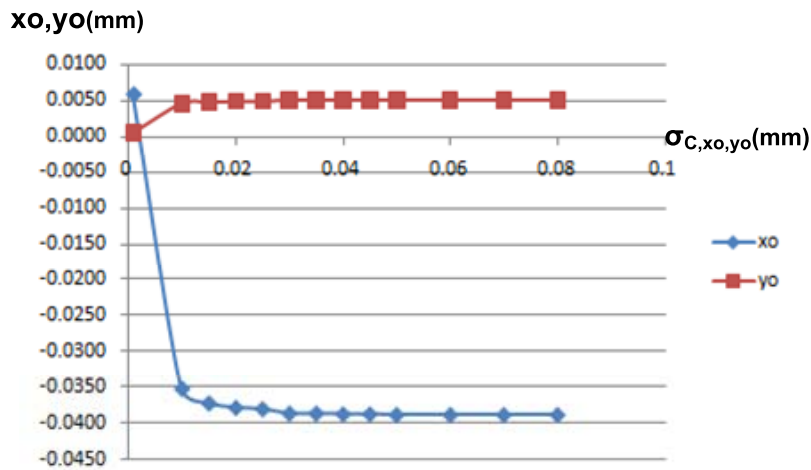
(β) Ως προς τη μεταβολή του τυπικού σφάλματος των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού σ_c , σ_{x_0} , σ_{y_0} προέκυψαν τα εξής:

- Η «αυστηρότητα» στις τιμές σφάλματος (1 μm) οδήγησε σε μικρή μεταβολή των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού από τις αρχικές τους τιμές (π.χ. $c=153.1207$ mm) και σε μεγάλη τιμή του *test value* (13.17) για τα στοιχεία της μηχανής.
- Με την αύξηση των τιμών του σφάλματος επιτρεπόταν μεγαλύτερη «ελευθερία» στη μεταβολή των τιμών των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού, αλλά και πτώση του *test value*. Δίνοντας έτσι μια αρχική τιμή 80 μm σε σ_c , σ_{x_0} , σ_{y_0} η τιμή της σταθεράς c της μηχανής έγινε 153.1933 mm και ο λόγος *test value* 0.65. Ο ορισμός της τιμής της τυπικής απόκλισης στα 50 μm , έδωσε τιμή λόγου 1.03 και αυτό τελικά ήταν το κριτήριο επιλογής της παραμέτρου αυτής. Χωρίς την επιλογή τιμών σφάλματος (όπως συνέβαινε και στη πραγματικότητα, καθώς το στοιχείο αυτό δεν ήταν γνωστό), η τιμή της σταθεράς της μηχανής που προέκυψε ήταν 153.1998 mm.

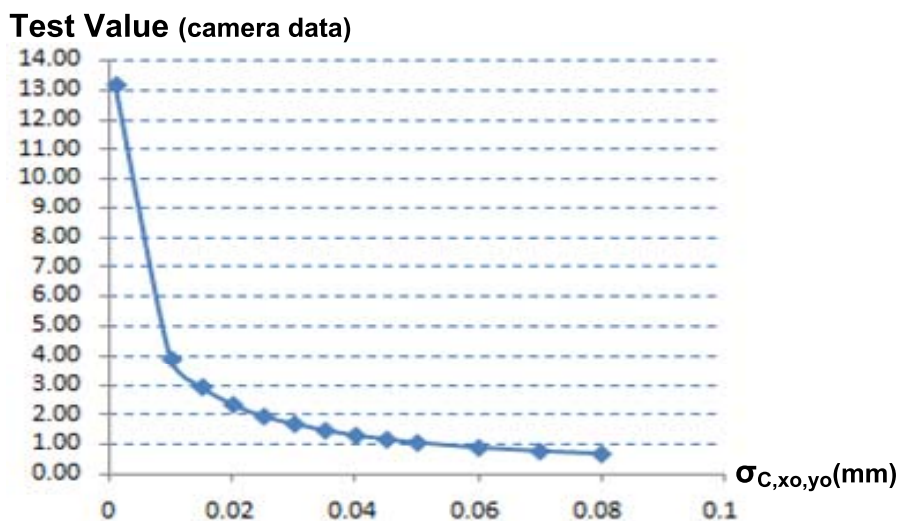
Οι μεταβολές των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού, συναρτήσει του τυπικού σφάλματος τους, παρουσιάζονται στα Σχήματα 7-6, 7-7, 7-8 και αναλυτικά στον Πίνακα 7-2.



Σχήμα 7-6: Μεταβολή σταθεράς c συναρτήσει σ_{c,x_0,y_0}



Σχήμα 7-7: Μεταβολή x_0, y_0 συναρτήσει σ_{c,x_0,y_0}



Σχήμα 7-8: Μεταβολή Test Value στοιχείων μηχανής συναρτήσει σ_{c,x_0,y_0}

Επίδραση παραμέτρων μηχανής

Το σύνολο των δοκιμών εκτελέστηκε ορίζοντας τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής, όπως αυτά προκύπτουν από το πιστοποιητικό της πιο πρόσφατης εργαστηριακής της βαθμονόμησης (Παράρτημα «Δ»). Ωστόσο εκτελέστηκαν κάποιες δοκιμές μεταβάλλοντας τις τιμές αυτές και για τις προαναφερθείσες ρυθμίσεις, προέκυψε σύγκλιση σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών (π.χ. $c \approx 153.19$). Τα στοιχεία των δοκιμών αυτών παρατίθενται επίσης στον Πίνακα 7-2 μαζί με τα προηγούμενα.

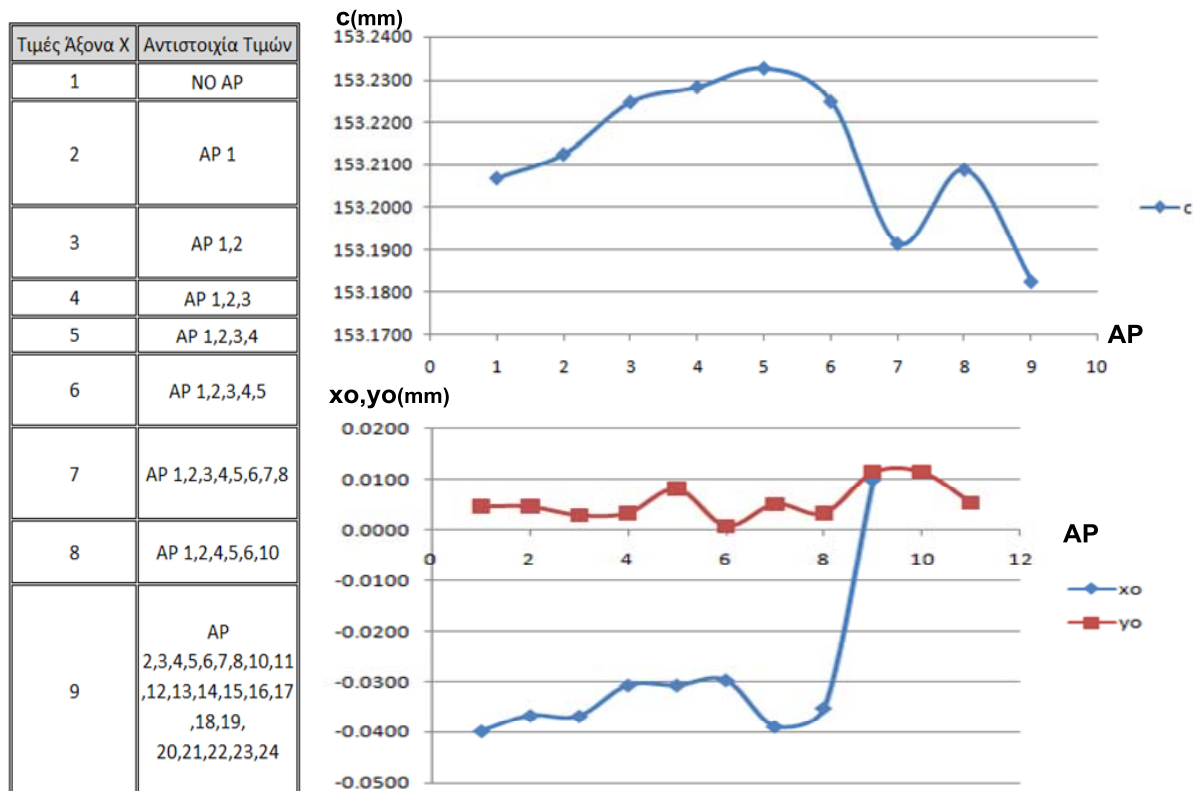
Αρχικές τιμές c:mm - s'x:μm- σ_{c,x_0,y_0} :mm		Αποτελέσματα (c:mm - σ_{c,x_0,y_0} :μm)						Test value = s(a posteriori) / s(a priori)		
c:mm - s'x:μm	σ_{c,x_0,y_0}	c	σ_c	x_0	σ_{x_0}	y_0	σ_{y_0}	Photo coordinates	Camera data	Coordinates GCP
c=153.12 και s'x=0.0039	0.001	153.1207	0.9	0.0059	0.8	0.0006	0.8	0.90	13.17	1.93
	0.01	153.1542	6.5	-0.0353	2.1	0.0046	2.1	0.89	3.86	1.83
	0.015	153.169	7.7	-0.0373	2.2	0.0048	2.1	0.89	2.90	1.94
	0.02	153.1772	8.3	-0.0379	2.2	0.0049	2.2	0.89	2.31	1.94
	0.025	153.182	8.7	-0.0381	2.2	0.0049	2.2	0.89	1.91	1.94
	0.03	153.1864	8.9	-0.0387	2.2	0.0051	2.2	0.89	1.66	1.96
	0.035	153.1884	9.0	-0.0387	2.2	0.0051	2.2	0.89	1.44	1.96
	0.04	153.1897	9.1	-0.0388	2.2	0.0051	2.2	0.89	1.27	1.96

Αρχικές τιμές c:mm - s'x:μm-σ _{c,xo,yo} :mm		Αποτελέσματα (c:mm - σ _{c,xo,yo} :μm)						Test value = s(a posteriori) / s(a priori)		
c:mm - s'x:μm	σ _{c,xo,yo}	c	σ _c	xo	σ _{xo}	yo	σ _{yo}	Photo coordinates	Camera data	Coordinates GCP
	0.045	153.1907	9.1	-0.0388	2.2	0.0051	2.2	0.89	1.14	1.96
	0.05	153.1914	9.2	-0.0389	2.2	0.0051	2.2	0.89	1.03	1.96
	0.06	153.1923	9.2	-0.0389	2.2	0.0051	2.2	0.89	0.86	1.96
	0.07	153.1929	9.3	-0.0389	2.2	0.0051	2.2	0.89	0.74	1.96
	0.08	153.1933	9.9	-0.0389	2.2	0.0051	2.2	0.89	0.65	1.96
	-	153.1998	9.3	-0.0384	2.2	0.0047	2.2	0.70	-	1.58
c=155 και s'x=0.005	-	153.1998	9.3	-0.0384	2.2	0.0047	2.2	0.70	-	1.58
c=150 και s'x=0.0039	-	153.1945	9.4	-0.0390	2.2	0.0051	2.2	0.89	-	1.96
c=152 και s'x=0.004	-	153.1945	9.4	-0.0390	2.2	0.0051	2.2	0.89	-	1.96
c=153.12 και s'x=0.004	0.1	153.1926	9.3	-0.0390	2.2	0.0050	2.2	0.87	0.52	1.88

Πίνακας 7-2: Αποτελέσματα δοκιμών BINGO-F με μεταβολές τυπικών σφαλμάτων στις τιμές των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού

☞ **Επίδραση επιπρόσθετων παραμέτρων**

Η μεταβολή του αριθμού των επιπρόσθετων παραμέτρων που συμμετέχουν στην επίλυση, επιδρά με τη σειρά της σημαντικά στα αποτελέσματα, καθώς μπορεί να προκύψουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε αυτά. Στον Πίνακα 7-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις σχετικές δοκιμές, που οπτικοποιούνται στο Σχήμα 7-9. Οι τιμές των λοιπών ρυθμίσεων έχουν όπως πριν. Οι παράμετροι με μεγάλη συσχέτιση διαγράφονται από τους αντίστοιχους ελέγχους που πραγματοποιούνται από το λογισμικό και με κύριο κριτήριο τις τιμές του πίνακα συμμεταβλητότητας.



Σχήμα 7-9: Επίδραση συμμετοχής επιπρόσθετων παραμέτρων στα αποτελέσματα βαθμονόμησης

	Αποτελέσματα (c:mm - σ_{c,x_0,y_0} : μ m)						Test value = s(a posteriori)/ s(a priori)			RMS of object points (mm)			RMS of check points (mm)		
	c	σ_c	x_0	σ_{x_0}	y_0	σ_{y_0}	Photo coord.	Camera data	Coord GCP	X	Y	Z	X	Y	Z
NO AP	153.2069	9.4000	-0.0398	1.9	0.0046	1.8	0.92	1.18	2.37	15	16	30	22	35	119
	153.2126	9.4000	-0.0367	1.9	0.0046	1.8	0.92	1.27	2.34	15	16	30	20	33	116
AP 1	0.0008														
	153.2246	9.5000	-0.0368	1.9	0.0029	1.8	0.92	1.35	2.34	15	17	31	20	34	117
AP 1,2	0.0008	-0.0005													
	153.2282	9.6	-0.0307	2.2	0.0033	1.8	0.92	1.36	2.36	15	17	31	20	34	115
AP 1,2,3	0.0008	-0.0005	-0.0043												
	153.2326	9.6	-0.0307	2.2	0.0081	2.2	0.92	1.41	2.33	15	17	31	20	34	118
AP 1,2,3,4	0.0008	-0.0005	-0.0041	-0.0031											
	153.2247	9.5	-0.0297	2.2	0.0008	2.2	0.91	1.32	2.34	15	17	31	19	34	116
AP 1,2,3,4,5	0.0008	-0.0005	-0.0042	0.0049	-0.0023										
	153.1914	9.2	-0.0389	2.2	0.0051	2.2	0.89	1.03	1.96	15	16	30	18	29	46
AP 1,2,3,4,5,6, 7,8	-0.0008	-0.0006	-0.0014	0.0032	-0.0023	0.0014	0.0081	-0.0012							
RADIAL DIST	0.8	1.5	2.1	2.6	3.0	4.2	4.3	3.2	1.9	1.4	0.7	-0.3	-0.5	0.0	2.8
	153.2089	9.5	-0.0352	1.9	0.0033	2.2	0.91	1.18	2.30	15	16	31	18	33	99
AP 1,2,4,5,6,10	0.0006	-0.0005	0.0036	-0.0023	0.0014	0.0202									
RADIAL DIST	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.3	0.3	-4.6
	153.1825	7.7	0.0099	2.0	0.0114	2.0	0.75	0.74	1.26	14	14	27	12	12	36
AP 2,3,4,5,6,7, 8,10,11,12, 13,14,15,16 ,17,18,19, 20,21,22,23	-0.0008	-0.0042	-0.0014	-0.0010	0.0053	0.0089	0.0013	0.0041							
	0.0010	0.0002	-0.0008	0.0003	0.0002	-0.0006	-0.0015								
	0.0002	-0.0017	0.0066	0.0089	-0.0056	-0.0012	-0.0034								
RADIAL DIST	0.7	1.4	2.1	2.7	3.3	4.7	4.9	3.9	2.7	2.1	1.3	0.0	-0.8	-1.2	-5.6

Πίνακας 7-3: Επίδραση αριθμού επιπρόσθετων παραμέτρων στα αποτελέσματα της συνόρθωσης δέσμης με αυτοβαθμονόμηση

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφοροποιήσεις στις τιμές των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού, συνοδεύονται και από αντίστοιχες αλλαγές στις τιμές της ακτινικής διαστροφής.

7.6.3 Αποτελέσματα

Συγκεντρώνοντας και αξιολογώντας τα συμπεράσματα από την εκτέλεση των δοκιμών, επιλέχθηκαν οι τελικές τιμές των ρυθμίσεων που παρουσιάστηκαν στην αρχή της προηγούμενης παραγράφου 7.6.2.

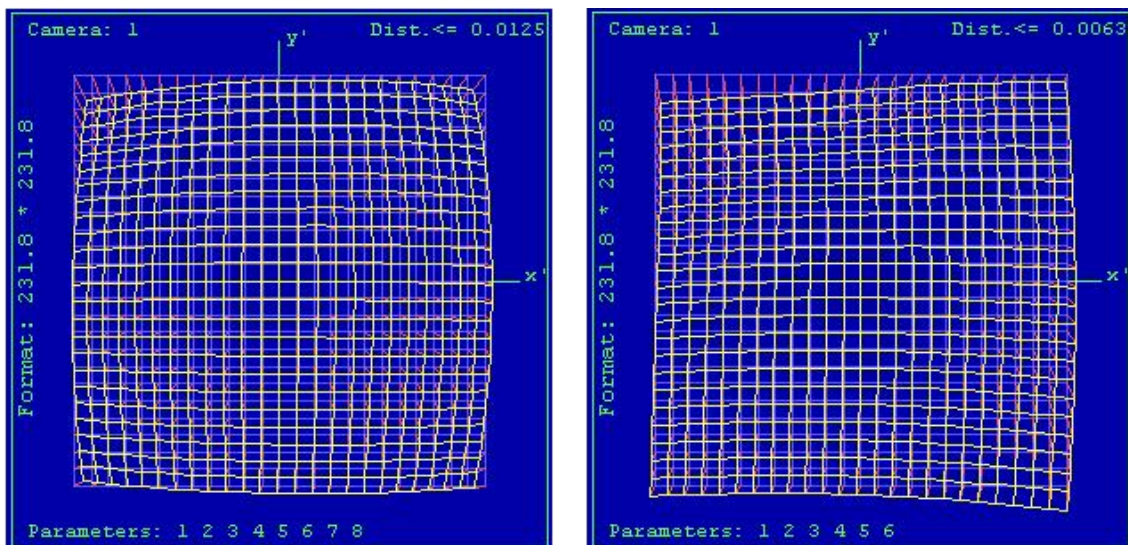
Η πλήρης αναφορά από την εκτέλεση του προγράμματος, παρατίθεται στο Παράρτημα «Α», όπου και φαίνεται το σύνολο των δεδομένων και παραμέτρων εισόδου.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της συνόρθωσης δέσμης με αυτοβαθμονόμηση έχουν ως εξής (παρατίθενται ακριβώς όπως από την αναφορά του προγράμματος):

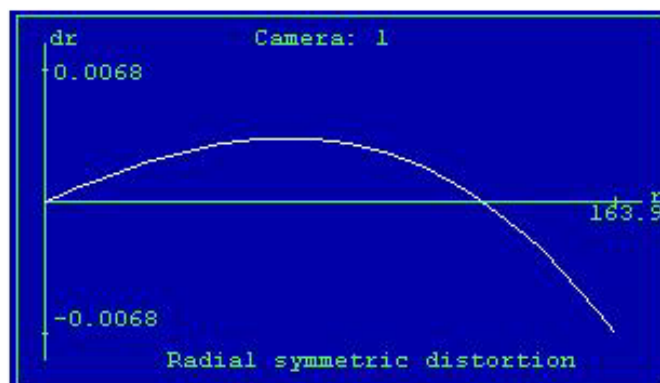
- σ_0 : 3.49 (1/1000)
- Mean photo scale: 5.251
- Camera constant c' : 153.1914
- $\pm S$ (1/1000) : 9.2
- Principal point PPA xH', yH' : -0.0389 0.0051
- $\pm S$ (1/1000) : 2.2 2.2
- Additional Parameters

1	2	3	4	5	6
7	8				
-0.0008	-0.0006	-0.0014	0.0032	-0.0023	0.0014
0.0081	-0.0012				
- Distortion values; First value for $R = 10.0$ (= Step width)

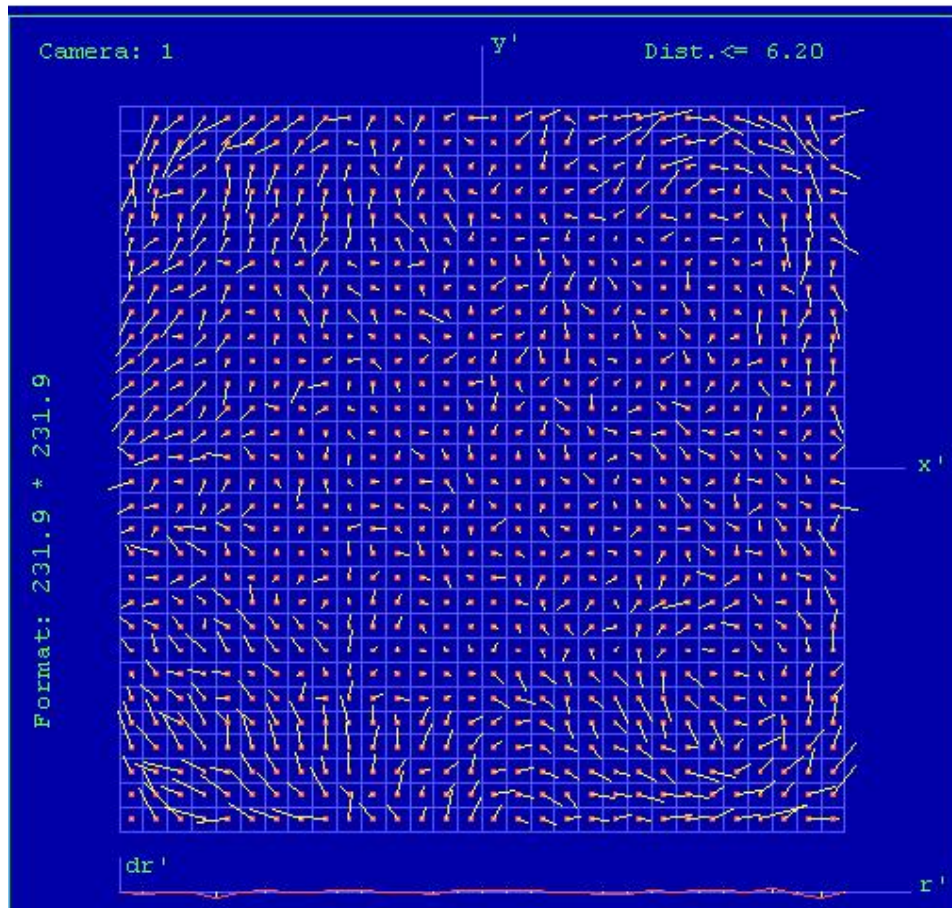
0.8	1.5	2.1	2.6	3.0	4.2	4.3	3.2	1.9	1.4
0.7	-0.3	-0.5	0.0	-2.8					
- RMS precision values of object points (X,Y,Z): 15. 16. 30. (1/1000)
- RMS precision values of control points (X,Y,Z): 1. 1. 2. (1/1000)
- RMS values of check point residuals (X,Y,Z): 18. 29. 46. (1/1000)
- $f = n-u+d = 26841$
- | Group | Test Value | No. of Obs. | Redundancy |
|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| Photo coordinates | : 0.89 | 40334 | 26834.29 |
| Camera data incl. vector e' | : 1.03 | 3 | 2.95 |
| Coordinates of control points | : 1.96 | 192 | 3.75 |
| Sum of all observations | : 0.90 | 40529 | |



Εικόνα 7-28: Επίδραση επιπρόσθετων παραμέτρων (αριστερά: επιλογή grid all, δεξιά: επιλογή grid tang)



Εικόνα 7-29: Καμπύλη συμμετρικής ακτινικής διαστροφής



Εικόνα 7-30: Εναπομείνουσες παραμορφώσεις εικόνας

7.6.4 Ακρίβειες

Στο θέμα των ακριβειών δεν υπάρχει καμιά διαφοροποίηση σε σχέση με την ανάλυση της παραγράφου 7.5.8, από όπου προέκυψε: $\sigma_{xy} = \pm 3.8\text{cm}$ και $\sigma_z = \pm 6.3\text{cm}$. Με την επιλογή των συγκεκριμένων τελικών ρυθμίσεων παρατηρείται ότι ικανοποιούνται οι συγκεκριμένες απαιτήσεις ακρίβειας, κάτι που δεν συμβαίνει στις δοκιμές χωρίς ή με λίγες επιπρόσθετες παραμέτρους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7-3.

7.7 Εφαρμογή DGAP

7.7.1 Γενικά

Το πρόγραμμα *DGAP* εφαρμόζει τη φωτογραμμετρική μέθοδο της συνόρθωσης με δέσμες, που αναπτύχθηκε από τους *Helmut Schmid* και *Duane Brown*. Είναι λογισμικό **ανοιχτού** κώδικα (γλώσσα προγραμματισμού C), του Ινστιτούτου Φωτογραμμετρίας του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης και είναι διαθέσιμο στον διαδικτυακό τόπο του πανεπιστημίου (<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/>).

Συνοδεύεται από δύο υπο-προγράμματα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, καθώς και από αναλυτικές οδηγίες του τρόπου χειρισμού και λειτουργίας του. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Αυτο-βαθμονόμηση μηχανής, με πρόσθετες παραμέτρους που προτείνουν οι: *Brown*, *Ebner* και *Gruen*.
- Εναλλακτικά μοντέλα: Άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού (*DLT*) και αφινικού (*affine*) μετασχηματισμού.
- Ενσωμάτωση των απευθείας μετρήσεων θέσης (αεροτριγωνισμός υποστηριζόμενος από μετρήσεις *GPS*, άμεση γεωαναφορά).
- Υπολογισμός της εσωτερικής και εξωτερικής γεωμετρικής ακρίβειας.

- Στατιστικοί έλεγχοι σημαντικότητας των επιπρόσθετων παραμέτρων (*t*-κατανομής).
- Υπολογισμός συμμεταβλητότητας και συσχέτισης των παραμέτρων.
- Άμεση γεωαναφορά εικόνων σαρωτών γραμμής.
- Διαθέτει παραδείγματα αεροτριγωνισμού, αεροτριγωνισμού υποστηριζόμενου με *GPS* και άμεσης γεωαναφοράς διαφόρων τύπων μηχανών, καθώς και παραδείγματα άμεσης γεωαναφοράς του γραμμικού σαρωτή *ADS-40*.

7.7.2 Λειτουργία

Η λειτουργία του *DGAP* βασίζεται σε αρχεία τύπου *ASCII*, τα οποία με την κατάλληλη σύνταξη και επέκταση, αντιπροσωπεύουν και συγκεκριμένο τύπο πληροφορίας. Ο αριθμός τους μπορεί να φτάσει και τα 17, καθώς μπορούν να συμπεριληφθούν πληροφορίες για *IMU*, *GPS* κ.τ.λ.

Η εκτέλεση του προγράμματος για τύπο αναλογικής μηχανής, όπως η *RMK TOP15*, απαιτεί τα ακόλουθα απαραίτητα 10 αρχεία:

- i. Ρύθμισης του *project*: που περιλαμβάνει τα ονόματα των επιμέρους αρχείων που το συνιστούν (**.cfg* – *configuration*)
- ii. Ρύθμισης επιλογών: για εκτύπωση συγκεκριμένων -από το σύνολο- αποτελεσμάτων (**.pr* - *params*)
- iii. Ρύθμισης παραμέτρων ελαχιστοτετραγωνικής επίλυσης: αφορούν ορισμό *a priori* τυπικών αποκλίσεων, αριθμού επαναλήψεων, διαστήματα εμπιστοσύνης, μονάδες μέτρησης κ.τ.λ. (**.lsp* – *least squares parameters*)
- iv. Στοιχείων μηχανής: σταθερά μηχανής, πρωτεύον σημείο, μέγεθος *frame* (**.ca* – *camera*)
- v. Σύνδεσης εικόνων: που εμπλέκει το φωτογραμμετρικό μοντέλο, τις θέσεις λήψεις με τις αντίστοιχες από αυτές εικόνες και μηχανές λήψης (**.im* – *image*)
- vi. Εικονοσυντεταγμένων: που αναγράφονται οι μετρούμενες εικονοσυντεταγμένες (**.ic* - *image coordinates*)
- vii. Στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού: που περιλαμβάνει προσεγγιστικές τιμές της πληροφορίας αυτής (**.eo* - *orientation parameters*)
- viii. Συντεταγμένων σημείων: που αφορά τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των γνωστών σημείων (**.oc* - *object coordinates*)
- ix. Τύπου σημείων: που ορίζει τον τύπο των σημείων σε φωτοσταθερά, σημεία ελέγχου και σημεία σύνδεσης (**.cs* – *control support*)
- x. Επιπρόσθετων παραμέτρων: όπου επιλέγεται το μοντέλο των επιπρόσθετων παραμέτρων από τα ενσωματωμένα στο πρόγραμμα (παράγραφος 7.7.3) και οι ακρίβειες των παραμέτρων αυτών (**.ap* – *additional parameters*).

Ο τύπος των αρχείων ακολουθεί συγκεκριμένο *format*, χωρίς να υπάρχει η αυστηρότητα του συγκεκριμένου εύρους σε κάθε πεδίο, όπως στο *BINGO*. Προσοχή πρέπει να δοθεί ωστόσο στην ορθή σύνταξη του κάθε αρχείου με τις λέξεις «κλειδιά», που πρέπει να περιέχει. Για την εργασία αυτή, παρέχονται αναλυτικές οδηγίες. Δίνονται στη συνέχεια παραδείγματα δύο τέτοιων τύπων αρχείων (Πίνακας 7-4).

Η εκκίνηση της εφαρμογής γίνεται από γραμμή εντολών *DOS*, καλώντας το πρόγραμμα *dgap.exe*, το αρχείο **.cfg* και μια σειρά δυνητικών επιλογών (εκτύπωσης σφαλμάτων, στοιχείων εισόδου, πίνακα συμμεταβλητότητας κ.τ.λ.) ως εξής: *dgap [options] cfg_file [stem]* (π.χ.: *C:\dgap>dgap.exe -update_cams test.cfg >results.txt*).

Αρχείο εικονοσυντεταγμένων (*.ic)				Αρχείο παραμέτρων ελαχίστων τετραγώνων (*.lsp)			
common-sdev 0.006 0.006				β.0e-6			
1 1e-3				10			
	35	-5.5965	28.1227	0	1e-16		
	80	38.6161	57.6652	0	0		
	81	28.0896	-63.9126	0.0010	0.0010	1.57e-3	
	34	100.9391	-62.0506	1e-30	1e+30		
stop-dep				1e-31	1e+31		
2 1e-3				1e+10	1e+10		
	35	-67.0831	21.5628	0.80			
	80	-22.1958	50.3634	1e0	1e-3		
	81	-42.9846	-71.8225	1.96			
	34	29.0315	-69.9256	1e-8			
	74	107.7839	-27.3105	0.			
stop-dep				m	deg		
				lapack			
				image-coords-plus-aps			

Πίνακας 7-4: Παραδείγματα σύνταξης αρχείων εισόδου στο DGAP

7.7.3 Μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων

Το *DGAP* ενσωματώνει τα ακόλουθα μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων για τη βαθμονόμηση μηχανής:

Μοντέλο	Μαθηματική Έκφραση
inner orientation (3)	$\Delta x_i = \Delta x_p - \frac{\bar{x}}{\bar{z}} \Delta c$ $\Delta y_i = \Delta y_p - \frac{\bar{y}}{\bar{z}} \Delta c$
radial distortion (3)	$\Delta x_r = \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3$ $\Delta y_r = \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3$
tangential distortion (2)	$\Delta x_d = (3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) P_1 + 2\bar{x}\bar{y} P_2$ $\Delta y_d = 2\bar{x}\bar{y} P_1 + (3\bar{y}^2 + \bar{x}^2) P_2$
in-plane distortion (12)	$\Delta x_f = \bar{x} a_1 + \bar{y} a_2 + \bar{x}\bar{y} a_3 + \bar{y}^2 a_4 + \bar{x}^2 \bar{y} a_5 + \bar{x}\bar{y}^2 a_6 + \bar{x}^2 \bar{y}^2 a_7$ $\Delta y_f = \bar{x}\bar{y} a_8 + \bar{x}^2 a_9 + \bar{x}^2 \bar{y} a_{10} + \bar{x}\bar{y}^2 a_{11} + \bar{x}^2 \bar{y}^2 a_{12}$
out-of-plane distortion (3)	$\Delta x_u = (\bar{x}^2 - \bar{y}^2) s_x a_{13} + \bar{x}^2 \bar{y}^2 s_x a_{14} + (\bar{x}^4 - \bar{y}^4) s_x a_{15}$ $\Delta y_u = (\bar{x}^2 - \bar{y}^2) s_y a_{13} + \bar{x}^2 \bar{y}^2 s_y a_{14} + (\bar{x}^4 - \bar{y}^4) s_y a_{15}$ $s_x = \frac{\bar{x}}{\bar{z}}, \quad s_y = \frac{\bar{y}}{\bar{z}}$
Browns model eqn. 22 (29)	Βλέπε σχέσεις (3.7-9)
Browns model eqn. 23 (21)	Βλέπε σχέσεις (3.7-10)
Ebners orthogonal polygon model (12)	Βλέπε σχέσεις (3.7-12)

Μοντέλο	Μαθηματική Έκφραση
Gruens orthogonal polygon model (44)	$\Delta x_{p44} = \bar{x}a_1 + \bar{y}a_2 + \bar{x}\bar{y}a_3 + la_4 - \frac{10}{7}ka_6 + \bar{x}pa_7 + \bar{y}ka_8 + \bar{x}la_9 + \bar{y}qa_{10}$ $+ ra_{15} + \bar{x}\bar{y}pa_{16} + kla_{17} + \bar{x}\bar{y}qa_{18} + sa_{19} + \bar{y}ra_{25} + \bar{x}lp a_{26}$ $+ \bar{y}kqa_{27} + \bar{x}s a_{28} + lr a_{33} + \bar{x}\bar{y}pq a_{34} + ks a_{35} + \bar{y}qr a_{39} + \bar{x}ps a_{40} + rs a_{43}$ $\Delta y_{p44} = -\bar{y}a_1 + \bar{x}a_2 - \frac{10}{7}la_3 + ka_5 + \bar{x}\bar{y}a_6 + \bar{x}pa_{11} + \bar{y}ka_{12} + \bar{x}la_{13} + \bar{y}qa_{14}$ $+ ra_{20} + \bar{x}\bar{y}pa_{21} + kla_{22} + \bar{x}\bar{y}qa_{23} + sa_{24} + \bar{y}ra_{29} + \bar{x}lp a_{30}$ $+ \bar{y}kqa_{31} + \bar{x}s a_{32} + lr a_{36} + \bar{x}\bar{y}pq a_{37} + ks a_{38} + \bar{y}qr a_{41} + \bar{x}ps a_{42} + rs a_{44}$ $k = \bar{x}^2 - \frac{1}{2}b^2, \quad l = \bar{y}^2 - \frac{1}{2}b^2, \quad p = \bar{x}^2 - \frac{17}{20}b^2, \quad q = \bar{y}^2 - \frac{17}{20}b^2,$ $r = \bar{x}^2(\bar{x}^2 - \frac{31}{28}b^2) + \frac{9}{70}b^4 \quad \text{und} \quad s = \bar{y}^2(\bar{y}^2 - \frac{31}{28}b^2) + \frac{9}{70}b^4$
GAP implementation (10)	$\Delta x = \Delta x_p - \frac{\bar{x}}{\bar{z}}\Delta c - \bar{x}s_x + \bar{y}a + \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}I$ $\Delta y = \Delta y_p - \frac{\bar{y}}{\bar{z}}\Delta c + \bar{x}a + \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2$
Australis implementation (10)	$\Delta x = \Delta x_p - \frac{\bar{x}}{\bar{z}}\Delta c + \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + b_1\bar{x} + b_2\bar{y}$ $\Delta y = \Delta y_p - \frac{\bar{y}}{\bar{z}}\Delta c + \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2$

Πίνακας 7-5: Μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων που ενσωματώνονται στο DGAP

7.7.4 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν σαν στοιχεία εισόδου τα κατάλληλα αρχεία, εγγράφοντας τις τιμές των απαραίτητων παραμέτρων, όπως ακριβώς και στην εφαρμογή με το *LPS* και το *BINGO* (παράγραφος 7.6.2). Κάποιες από τις κύριες διαφορές του με αυτά τα δύο προγράμματα ήταν:

- Δεν μπορούσε να οριστεί στα αρχεία εισόδου η διαθέσιμη από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης πληροφορία ακτινικής διαστροφής, ώστε να ληφθεί με κάποιο τρόπο υπ' όψη στους υπολογισμούς.
- Για **κάθε μια** από τις επιπρόσθετες παραμέτρους υπήρχε η δυνατότητα ορισμού τιμής *τυπικής απόκλισης* (*a priori standard deviation*), που δεν υπήρχε στα άλλα δυο προγράμματα. Αυτό φυσικά τροποποιούσε πολύ τα αποτελέσματα μεταξύ δοκιμών, που πραγματοποιήθηκαν με διάφορες τιμές και αύξανε τους πιθανούς συνδυασμούς επιλογών. Τελικά αποφασίστηκε να διατηρηθούν οι **προτεινόμενες** για το σκοπό αυτό τιμές από το εγχειρίδιο του προγράμματος. Επίσης στα αποτελέσματα δεν αναγραφόταν η τιμή της τυπικής απόκλισης μετά τη συνόρθωση (*a posteriori standard deviation*) για την κάθε παράμετρο, παρά μόνο για τη συνολική επίλυση του αεροτριγωνισμού.
- Στο αρχείο ορισμού των επιπρόσθετων παραμέτρων, μπορούσαν να επιλεγούν **ταυτόχρονα** περισσότερα του ενός μοντέλα, με εξαγωγή διαφορετικών αποτελεσμάτων κάθε φορά, αναλόγως του συνδυασμού και αναφερόμενα φυσικά στο συγκεκριμένο συνδυασμό. Καθώς δεν υπήρχαν ακριβείς οδηγίες για τον τρόπο λειτουργίας με τις επιλογές αυτές και καθώς δεν κατέστη δυνατή η επικοινωνία με το πανεπιστήμιο της Στουτγκάρδης, δεν μπόρεσαν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, σχετικά με την επίλυση του αεροτριγωνισμού με πολλά και **διαφορετικά** (πολυωνυμικά και όχι) σετ επιπρόσθετων παραμέτρων. Έτσι εκτελέστηκε η επίλυση του αεροτριγωνισμού για το κάθε σετ επιπρόσθετων παραμέτρων ξεχωριστά και

συνδυάστηκαν τα μοντέλα του εσωτερικού προσανατολισμού, ακτινικής-εφαπτομενικής διαστρόφης, διαφορετικής κλίμακας και ορθογωνικότητας των αξόνων και μη επιπεδότητας του φιλμ.

- Στα μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων σε ένα γενικό πολυώνυμο (παράγραφος 3.7.2), που ενσωματώνει το πρόγραμμα και αυτά είναι των *Ebner* και *Gruen*, πρέπει να οριστεί στο αρχείο *.ar και η βάση *b* στην εικόνα.
- Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων για την σημαντικότητα των επιπρόσθετων παραμέτρων έγινε για επίπεδο εμπιστοσύνης 97.5%, με βάση την *t*-κατανομή. Το πρόγραμμα για τις εκτιμώμενες παραμέτρους εξετάζει την μηδενική και εναλλακτική υπόθεση και εγγράφει το αποτέλεσμα για την κάθε παράμετρο εάν είναι σταθερή ή πρέπει να εξαλειφθεί (*eli*) ή εάν είναι σημαντική (*obs*) ή εάν παραμένει άγνωστη (*unk*). Αυτό αποτέλεσε και ένα κριτήριο στον ορισμό της *a priori* τυπικής απόκλισης των παραμέτρων.
- Για ορισμένα μοντέλα υπήρχε η δυνατότητα απ' ευθείας εξαγωγής των τελικών τιμών *c*, *xo*, *yo* σε αντίθεση με κάποια άλλα, όπου το τελικό αποτέλεσμα αφορούσε τις τιμές διόρθωσης *dc*, *dxo*, *dyo* χωρίς να γίνεται ενημέρωση των αρχικών τιμών στα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, όπως φαίνεται και στους πίνακες που ακολουθούν.

7.7.5 Αποτελέσματα

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για το κάθε μοντέλο είναι:

Παράμετρος	inner orientation	inner orientation & radial distortion	inner orientation & radial & decentering distortion	inner orientation & radial & decentering & in plane & out of plane distortion	Browns model eqn. 23 (21)	Browns model eqn. 22 (29)	australis	gap
c	153.2509	153.2463	153.2437	153.2339	153.2266	153.2597	153.2665	153.2665
xo	-0.0432	-0.0432	-0.0450	-0.0049	0.0018	0.5882	-0.0030	-0.0030
yo	0.0035	0.0044	0.0022	-0.0023	0.0092	0.0058	-0.0027	-0.0027

Πίνακας 7-6: Αποτελέσματα βαθμονόμησης DGAP

Και αναλυτικότερα:

ebner		Gruens orthogonal polygon model (44)					
Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state
-8.406E-06	a1-obs	-1.633E-06	a1-obs	-1.545E-03	a16-obs	1.902E-01	a31-obs
8.494E-07	a2-obs	3.999E-08	a2-obs	-2.487E-03	a17-obs	-1.110E-01	a32-obs
-7.921E-05	a3-obs	-7.119E-05	a3-obs	1.533E-02	a18-obs	1.941E-03	a33-obs
5.200E-05	a4-obs	-4.621E-04	a4-obs	1.673E-02	a19-obs	1.084E-02	a34-obs
-2.574E-04	a5-obs	-2.645E-05	a5-obs	-3.749E-03	a20-obs	2.174E-03	a35-obs
-6.986E-05	a6-obs	-2.766E-04	a6-obs	3.918E-02	a21-obs	-1.119E-02	a36-obs
-8.169E-03	a7-obs	-7.218E-03	a7-obs	1.386E-03	a22-obs	-4.622E-15	a37-eli
1.209E-03	a8-obs	9.883E-05	a8-obs	8.285E-04	a23-obs	9.970E-15	a38-eli
-1.187E-04	a9-obs	-1.155E-02	a9-obs	-1.853E-02	a24-obs	-4.833E-16	a39-eli
-8.688E-06	a10-obs	4.422E-04	a10-obs	3.512E-02	a25-obs	1.740E-15	a40-eli
-1.960E-03	a11-obs	-5.211E-04	a11-obs	4.474E-01	a26-obs	2.001E-15	a41-eli
1.368E-03	a12-obs	-3.968E-03	a12-obs	-8.983E-02	a27-obs	-5.926E-16	a42-eli
		1.944E-03	a13-obs	-1.311E-01	a28-obs	6.198E-18	a43-eli
		-5.111E-03	a14-obs	2.269E-01	a29-obs	2.111E-17	a44-eli
		-1.181E-02	a15-obs	-6.406E-02	a30-obs		
RMS of differences Check Point Analysis (m)							
0.013	X	0.012				X	
0.015	Y	0.013				Y	
0.056	Z	0.041				Z	

Πίνακας 7-7: Αποτελέσματα DGAP πολυωνυμικών μοντέλων Ebner-Gruen

inner orientation		inner orientation & radial distortion		inner orientation & radial & decentering		australis		gap	
Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state
153.2509	c-obs	153.2463	c-obs	153.2437	c-obs	153.2665	c-obs	153.2665	c-obs
-0.0432	xo-obs	-0.0432	xo-obs	-0.0450	xo-obs	-0.0030	xo-obs	-0.0030	xo-obs
0.0035	yo-obs	0.0044	yo-obs	0.0022	yo-obs	-0.0027	yo-obs	-0.0027	yo-obs
		-0.0098	k1-obs	-0.0098	k1-obs	-9.012E-03	k1-obs	5.670E-05	sx-obs
		0.2468	k2-obs	0.2448	k2-obs	2.277E-01	k2-obs	1.050E-06	a1-obs
		0.0064	k3-obs	0.0063	k3-obs	6.195E-03	k3-obs	-9.010E-03	k1-obs
				-7.824E-05	p1-obs	-5.260E-05	p1-obs	2.280E-01	k2-obs
				-1.011E-04	p2-obs	-9.730E-05	p2-obs	6.200E-03	k3-obs
						-5.672E-05	b1-obs	-5.260E-05	p1-obs
						2.096E-06	b2-obs	-9.730E-05	p2-obs
RMS of differences Check Point Analysis (m)									
0.0220	X	0.0210	X	0.0210	X	0.012	X	0.012	X
0.0380	Y	0.0320	Y	0.0320	Y	0.014	Y	0.014	Y
0.1090	Z	0.0610	Z	0.0580	Z	0.059	Z	0.059	Z

Πίνακας 7-8: Αποτελέσματα DGAP μοντέλων Australis, Gap, εσωτερικού προσανατολισμού και συνδυασμού εσωτερικού-ακτινικής-εφαπτομενικής διαστρόφης

inner orientation & radial & decentering & in plane & out of plane distortion		Browns model eqn. 23 (21)		Browns model eqn. 22 (29)			
Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state	Τιμή	state
153.2339	c-obs	1.066E-04	dc-obs	1.397E-04	dc-obs	-1.090E-02	a7-unk
-0.0049	xo-obs	-1.977E-07	dxo-obs	5.862E-04	dxo-obs	1.220E-11	b1-eli
-0.0023	yo-obs	9.225E-06	dyo-obs	5.836E-06	dyo-obs	1.340E-17	b2-eli
-0.0095	k1-obs	-7.237E-03	k1-obs	-5.450E-03	k1-obs	1.660E-12	b3-eli
0.1127	k2-obs	2.904E-02	k2-obs	2.830E-01	k2-obs	3.920E-15	b4-eli
0.0019	k3-obs	2.131E-05	k3-obs	6.900E-03	k3-obs	-5.530E-13	b5-eli
-4.274E-05	p1-obs	9.781E-06	a1-unk	1.230E-02	p1-obs	3.140E-10	b6-eli
-9.493E-05	p2-obs	-2.176E-06	a2-unk	-5.540E-05	p2-obs	-1.950E-11	b7-eli
-7.081E-05	a1-unk	1.820E-04	a3-unk	7.940E-05	a1-unk	1.090E-09	c1-eli
2.363E-06	a2-unk	-2.727E-04	a4-unk	4.830E-07	a2-unk	-1.270E-10	c2-eli
8.169E-10	a3-eli	1.628E-04	a5-unk	-1.220E-02	a3-unk	-1.090E-09	c3-eli
-3.229E-09	a4-eli	-8.234E-03	a6-unk	9.440E-05	a4-unk	1.290E-11	c4-eli
-1.784E-11	a5-eli	-1.900E-03	a7-unk	-1.260E-02	a5-unk	1.090E-12	c5-eli
-1.385E-10	a6-eli	-2.453E-04	a8-unk	7.940E-05	a6-unk	1.900E-11	c6-eli
-1.053E-13	a7-eli	-7.404E-05	a9-unk	-1.090E-02	a7-unk	1.680E-11	c7-eli
-3.228E-09	a8-eli	4.928E-03	a10-unk				
8.181E-10	a9-eli	6.502E-04	a11-unk				
1.523E-10	a10-eli	3.392E-03	a12-unk				
1.012E-10	a11-eli	-8.130E-04	a13-unk				
4.067E-13	a12-eli	7.362E-02	a14-unk				
4.223E-04	a13-unk	4.943E-02	a15-unk				
4.129E-02	a14-unk						
-1.323E-12	a15-eli						
RMS of differences Check Point Analysis (m)							
0.0120	X	0.013	X	0.0130		X	
0.0140	Y	0.013	Y	0.0140		Y	
0.0420	Z	0.039	Z	0.0470		Z	

Πίνακας 7-9: Αποτελέσματα DGAP μοντέλων Brown και συνδυασμού εσωτερικού προσανατολισμού με επιπλέον τύπους παραμορφώσεων

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, αναφέρεται ακόμη μια φορά το γεγονός ότι αυτά διαφοροποιούνται αναλόγως των επιπρόσθετων παραμέτρων που επιλέγονται και αντιπροσωπεύουν κάθε φορά τον συγκεκριμένο συνδυασμό.

Προκύπτουν επίσης τα εξής συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων στις επιπρόσθετες παραμέτρους:

- Στο πολυωνυμικό μοντέλο του *Ebner*, και οι 12 παράμετροι θεωρούνται σημαντικές. Αντίθετα, στο μοντέλο του *Gruen* οι πρώτες 36 είναι σημαντικές ενώ οι επόμενες 8 εξαλείφονται (Πίνακας 7-7).
- Στα μοντέλα *Australis*, *Gap*, εσωτερικού προσανατολισμού και εσωτερικού προσανατολισμού σε συνδυασμό με ακτινική και εφαπτομενική διαστροφή, όλες οι παράμετροι θεωρούνται σημαντικές (Πίνακας 7-8).
- Στα μοντέλα του *Brown* και συνδυασμένου εσωτερικού προσανατολισμού με όλα τα είδη παραμορφώσεων, σημαντικές θεωρούνται οι παράμετροι μέχρι την ακτινική και εφαπτομενική διαστροφή. Από εκεί και πέρα είτε εξαλείφονται είτε χαρακτηρίζονται μη προσδιορίσιμες (Πίνακας 7-9).

7.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Επιβεβαιώνεται η ανάγκη της προσεκτικής επιλογής των επιπρόσθετων παραμέτρων, λόγω της πιθανής συσχέτισης και εξάρτησης τους με τις υπόλοιπες παραμέτρους των μαθηματικών μοντέλων της φωτογραμμετρίας. Για το σκοπό αυτό ενσωματώνονται στο *BINGO-F* στατιστικά τεστ σημαντικότητας για να κρίνουν το κατά πόσο κάθε συντελεστής του πολυωνύμου συμβάλλει ή όχι στην επιθυμητή διόρθωση, ώστε να απαλειφθεί εάν τελικά δεν συνεισφέρει. Αυτό ακριβώς συνέβη με τις παραμέτρους **9 και 10**, οι οποίες εξαιρέθηκαν από το τελικό αποτέλεσμα, αν και αρχικά είχαν επιλεγεί να συμμετέχουν στην επίλυση.

Κάτι παρόμοιο γίνεται και στο *DGAP*, όπου αν και δεν υπάρχει η δυνατότητα αποκλεισμού κάποιας παραμέτρου από την επίλυση, το πρόγραμμα εξετάζει στατιστικά ποιες δεν συνεισφέρουν και πρέπει να εξαλειφθούν. Τέτοιος έλεγχος δεν πραγματοποιείται στο *LPS*.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα **διαφορετικά** προγράμματα, θα είχε νόημα εφόσον:

- Ενσωμάτωναν κάποια κοινά μοντέλα επιπρόσθετων παραμέτρων, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει.
- Στηρίζονταν στις ίδιες ακριβώς μαθηματικές εξισώσεις. Παρατηρήθηκε για παράδειγμα ότι τυπική απόκλιση για τις επιπρόσθετες παραμέτρους δεχόταν μόνο το *DGAP* και όχι τα *LPS* και *BINGO*, εκτιμώντας ότι αυτό σημαίνει διαφορετικό τρόπο δόμησης των πινάκων των μαθηματικών εξισώσεων, όσον αφορά τα βάρη.

Ωστόσο τα αποτελέσματα των δοκιμών βαθμονόμησης **χωρίς** επιπρόσθετες παραμέτρους και με την ίδια *a priori* τυπική απόκλιση στα στοιχεία *c, x₀, y₀* διαφέρουν κατά 1 μm περίπου μεταξύ των *BINGO* και *LPS*, ενώ τα αποτελέσματα του *DGAP* διαφέρουν κατά 44 μm περίπου από αυτά (Πίνακας 7-10).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΜΟΝΤΕΛΟ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ						RMS (Check points)(mm)		
		c (mm)	σ_c (μm)	x ₀ (mm)	σ_{x_0} (μm)	y ₀ (mm)	σ_{y_0} (μm)	X	Y	Z
BINGO-F	NO AP	153.2069	9.4	-0.0398	1.9	0.0046	1.8	22	35	119
LPS	NO AP	153.206	8.8	-0.0407	2	0.0032	2	22	39	105
DGAP	NO AP	153.2509	-	-0.0432	-	0.0035	-	22	38	109

Πίνακας 7-10: Σύγκριση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης χωρίς επιπρόσθετες παραμέτρους μεταξύ LPS, BINGO-F και DGAP

Τα αποτελέσματα του αεροτριγωνισμού, σχετικά με το σφάλμα στα σημεία ελέγχου είναι στα ίδια επίπεδα οριζοντιογραφικά και για τα τρία προγράμματα, με μέγιστη διαφοροποίηση 1.4 cm υψομετρικά (Πίνακας 7-10). Ομοίως και το συνολικό σφάλμα κλεισίματος του αεροτριγωνισμού, είναι παρόμοιο στα 3.9 mm (Πίνακας 7-1, Παράρτημα «Α», Παράρτημα «Γ»).

Με το ίδιο σκεπτικό δεν μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της αυτοβαθμονόμησης με τα αντίστοιχα της εργαστηριακής. Και η μέθοδος, αλλά και οι συνθήκες ελέγχου διαφέρουν, που σημαίνει ότι η σύγκριση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των αποτελεσμάτων από τη χρήση των στοιχείων βαθμονόμησης, που έχουν προκύψει από τις δυο μεθόδους, σε διάφορες φωτογραμμετρικές διαδικασίες.

Αποσπάσματα από το αρχείο αναφοράς του *DGAP* παρατίθενται στο Παράρτημα «Γ».

8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από όλες τις διαδικασίες της διπλωματικής.

8.1 Γενικά

Από τη στιγμή που το πεδίο ελέγχου κατασκευαστεί και φωτογραφηθεί, ξεκινά η επεξεργασία των εικόνων προς εξαγωγή των ζητούμενων (ανάλογα με την εργασία) συμπερασμάτων. Η ενασχόληση με το θέμα, στα πλαίσια των αναγκών της διπλωματικής, οδήγησε στις ακόλουθες γενικές διαπιστώσεις, που πρέπει να γνωρίζει κάθε ενδιαφερόμενος για μια ανάλογη εργασία:

- Απαιτείται καλή γνώση της θεωρίας της φωτογραμμετρίας, καθώς προσεγγίστηκαν αρκετά και θεμελιώδη φωτογραμμετρικά θέματα. Η γνώση αυτή είναι απαραίτητη όχι μόνο για τον χειρισμό των αντίστοιχων προγραμμάτων, αλλά και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους.
- Απαιτείται η ύπαρξη του κατάλληλου για την κάθε διαδικασία υλικού και λογισμικού. Ο εξοπλισμός αυτός (φωτογραμμετρικός σαρωτής, ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός κ.τ.λ.) δεν είναι προσιτός στον κοινό χρήστη, λόγω κόστους και επομένως κάποιες εργασίες πρέπει αναγκαστικά να εκτελούνται σε συνεργασία με κατάλληλους φορείς, που τον διαθέτουν.
- Η χρήση των προγραμμάτων, απαιτεί προσοχή στην εισαγωγή και επιλογή των αναγκαίων, ανάλογα με τη διαδικασία και μέθοδο, παραμέτρων. Λανθασμένη επιλογή για παράδειγμα του μεγέθους της εικονοψηφίδας ή των παραμέτρων του αεροτριγωνισμού μπορεί να οδηγήσει σε επανάληψη της διαδικασίας ή και σε λανθασμένα συμπεράσματα. Έτσι ο χειρισμός των προγραμμάτων απαιτεί εξειδικευμένο χρήστη.
- Τα αποτελέσματα υπήρξαν ευμετάβλητα με την παραμικρή τροποποίηση των τιμών των παραμέτρων.
- Διαπιστώθηκαν διαφορές στον τρόπο λειτουργίας του καθενός προγράμματος (ως προς την αρχή π.χ. μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων, όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο 7.6.2). Απαιτείται μελέτη του τρόπου λειτουργίας τους, για τη σωστή εκτέλεση των διαδικασιών.
- Ύπαρξη ανοιχτού λογισμικού με την ενσωμάτωση πολλών λειτουργιών για συνόρθωση δέσμης με αυτοβαθμονόμηση, που συνεπάγεται την ανεξάρτηση από εμπορικά προγράμματα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπλέον διαδικασιών. Η χρήση του συνεπάγεται φυσικά την προηγούμενη αξιολόγηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του.
- Δυνατότητα προγραμματισμού της διαδικασίας, για έλεγχο των αλγορίθμων και ενσωμάτωση των επιθυμητών μοντέλων επιπρόσθετων παραμέτρων (για χρήση τους μετέπειτα σε συγκεκριμένα φωτογραμμετρικά πακέτα).

8.2 Χρήση LPS

Ειδικότερα, όσον αφορά τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν με το *LPS*, προέκυψαν τα εξής:

- Ο μεγάλος αριθμός των εικόνων (102) απαιτούσε κατάλληλη ονοματολογία των αντίστοιχων αρχείων, για εύκολη διάκρισή τους ανάλογα με τη γραμμή πτήσης και την σειρά λήψης τους.
- Παρουσιάστηκε μεγάλη δυσκολία στον εντοπισμό των στόχων (φωτοσταθερών) στους βράχους, λόγω της αντανάκλασής τους. Δυσκολία επίσης εμφανίστηκε και στη σκόπευση των στόχων σε πολύ πλάγιες φωτογραφίες, καθώς δεν φαινόταν το μαύρο κέντρο λόγω κλίσης και η εμφάνιση του στόχου, ως αποτέλεσμα παρεμβολής στην εικόνα, ήταν αποκλειστικά με λευκό χρώμα.

- Αδυναμίες λόγω της υπολογιστικής ισχύος του συστήματος του Η/Υ, χειρισμού των εικόνων (περίπου 360 MB η καθεμία) και μεγάλη καθυστέρηση στην αυτόματη εξαγωγή των σημείων σύνδεσης (*tie points*). Λόγω του πειραματισμού με την πληθώρα των παραμέτρων, για επιλογή των καταλληλότερων –εκ του αποτελέσματος– επιλογών, κάθε δοκιμή ξεπερνούσε τις 3 ώρες.
- Επειδή το συγκεκριμένο *project* χαρακτηρίζεται «μεγάλο» λόγω πλήθους εικόνων και σημείων, απαιτείται μεγάλη προσοχή στην αποφυγή χονδροειδών λαθών, που μετά είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστούν. Η σκόπευση για παράδειγμα ενός σημείου σε μια φωτογραφία αντί του ορθού του, οδηγεί σε μεγάλο σφάλμα, που στο σύνολο των περισσότερων από 4000 σημεία που υπάρχουν τελικά, δεν μπορεί στη συνέχεια να εντοπιστεί εύκολα.
- Το μέγεθος των στόχων θα μπορούσε να είχε επιλεγεί λίγο μεγαλύτερο, για τον ευκολότερο εντοπισμό τους στις εικόνες. Το στοιχείο αυτό αν και επιθυμητό εξ αρχής, μετέβαλε σημαντικά την οικονομικότητα του έργου.
- Και το ποσοστό της κατά πλάτος επικάλυψης των εικόνων θα μπορούσε να είχε μεγαλύτερη τιμή, κάτι το οποίο δεν συνέβη για λόγους οικονομικότητας. Αυτό είχε σαν συνέπεια τη δυσκολία εμφάνισης πολλών κοινών φωτοσταθερών σε εικόνες γειτονικών γραμμών πτήσης.
- Δεν υποστηρίζεται συμβατότητα των αρχείων εξαγωγής του *LPS* με τα αντίστοιχα αρχεία εισόδου του *BINGO-F*, κάτι που υλοποιείται σε αρκετά φωτογραμμετρικά πακέτα (π.χ. *ISDM*, *MATCH-AT* κ.τ.λ.). Η μετατροπή τους στο κατάλληλο φορμάτ απαιτούσε πολύ χρόνο, για εξασφάλιση συμβατότητας και έκρυβε τον κίνδυνο σφαλμάτων. Καταλληλότερη θα ήταν η χρήση κάποιου προγράμματος, που θα εξασφάλιζε αυτή τη δυνατότητα, όπως αρχικά είχε προταθεί από τον επιβλέποντα.
- Ύπαρξη πολλών παραμέτρων σε όλες τις διαδικασίες (αυτόματη εξαγωγή σημείων σύνδεσης, αεροτριγωνισμός), που καταδεικνύει μεν τις δυνατότητες του προγράμματος, αλλά και την εύκολη μεταβολή των αποτελεσμάτων με αλλαγή ευαίσθητων παραμέτρων όπως π.χ. ακρίβειες φωτοσταθερών. Ωστόσο το λογισμικό αυτό δεν συστήνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία για διαδικασίες βαθμονόμησης.

8.3 Χρήση BINGO-F

Όσον αφορά τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν με το *BINGO-F*, προέκυψαν τα εξής:

- Δεν αναφέρονται λεπτομέρειες των επιπρόσθετων παραμέτρων (ποιες είναι αυτές) και του τρόπου επίδρασής τους, που ενσωματώνει το χρησιμοποιούμενο μοντέλο των *Mueller, Bauer and Jacobsen*.
- Αποτελεί ένα πολύ ισχυρό πρόγραμμα επίλυσης, με τη δυνατότητα συνδυασμένων επιλύσεων, την ενσωμάτωση αλγορίθμων εντοπισμού λαθών και βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων.
- Οι στατιστικοί έλεγχοι που πραγματοποιούνται, βοηθούν στην εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων για την ορθότητα επιλογής των τιμών των παραμέτρων από το χρήστη, καθώς επίσης και των τελικών αποτελεσμάτων.
- Λόγω των πολλών του δυνατοτήτων, κρίνεται κατάλληλο για εργασίες βαθμονόμησης, καθώς η ανάπτυξή του είναι προσανατολισμένη για έναν τέτοιο σκοπό.

8.4 Χρήση DGAP

Το *DGAP* έχει τα μεγάλα πλεονεκτήματα: της ενσωμάτωσης πολλών δυνατοτήτων και της ελεύθερης του διάθεσης, στοιχείο πολύ σημαντικό σε μια εποχή που η οικονομικότητα των εργασιών παίζει καθοριστικό ρόλο. Ωστόσο η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του χρήζει

διερεύνησης, ώστε να εξακριβωθεί η εγκυρότητά του σε εργασίες βαθμονόμησης μηχανών. Προϋπόθεση αποτελεί η ορθή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του. Άλλωστε ο ανοιχτός του κώδικας αποτελεί πρόκληση για βελτίωσή του και προσαρμογή σε συγκεκριμένες απαιτήσεις ή και αφορμή για τη σύνταξη κάποιου άλλου προγράμματος προσανατολισμένου σε συγκεκριμένη μηχανή, από κάποια ιδιωτική εταιρεία ή δημόσιο οργανισμό.

8.5 Αποτελέσματα

- Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας βαθμονόμησης, όπως αυτής που πραγματοποιήθηκε, σχετίζονται άμεσα με το αντίστοιχο μοντέλο βαθμονόμησης που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς επίσης και από τον αριθμό και το είδος των επιπρόσθετων παραμέτρων που θα συμμετάσχουν στην επίλυση.
- Η πλήρης αξιοποίηση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει εφόσον το μοντέλο από το οποίο εξήχθησαν ενσωματώνεται -ή μπορεί να ενσωματωθεί- σε φωτογραμμετρικά πακέτα που χρησιμοποιούνται στην αγορά. Για παράδειγμα το *LPS (Leica)* ενσωματώνει το μοντέλο του *Ebner* και του *Australis*, ενώ το *MATCH-AT (Inphograph)* του *Ebner* και του *Gruen*. Έτσι, εάν για παράδειγμα έχει πραγματοποιηθεί μια βαθμονόμηση βάσει των μοντέλων αυτών, τα αποτελέσματά της μπορούν να αξιοποιηθούν από τα εν λόγω προγράμματα. Και τα τρία αυτά μοντέλα, ενσωματώνονται στο ελεύθερο πρόγραμμα επίλυσης *DGAP*.
- Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης χωρίς την συμμετοχή επιπρόσθετων παραμέτρων, δίνοντας διορθώσεις μόνο για τη σταθερά της μηχανής και το πρωτεύον σημείο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα φωτογραμμετρικά προγράμματα. Με την εκτέλεση δοκιμών διαπιστώθηκε ότι αυτά σχεδόν ταυτίζονται, όταν εξαχθούν είτε από το *BINGO-F* είτε από το *LPS*.
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από διάφορα προγράμματα βαθμονόμησης, προϋποθέτει την χρήση ίδιων μοντέλων.
- Πιο αξιόπιστα στο βαθμό διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, κρίνονται τα αποτελέσματα του *BINGO-F*.

8.6 Προτάσεις

- Προτείνεται η διερεύνηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης που εξήχθησαν, με εφαρμογή τους σε φωτογραμμετρικές εργασίες (π.χ. προσανατολισμοί, αεροτριγωνισμός, παραγωγή ορθοφωτογραφιών κ.τ.λ.) και σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων με μέτρα ακρίβειας, για να διαπιστωθεί ότι όντως οδηγούμαστε σε ασφαλείς, έγκυρες και βελτιωμένες λύσεις εν συγκρίσει με τη χρήση των αντίστοιχων παραμέτρων από την τελευταία γνωστή εργαστηριακή βαθμονόμηση.
- Προτείνεται η πύκνωση του δικτύου των σημείων του πεδίου ελέγχου, για όσο το δυνατόν ανεξάρτητη από σημεία σύνδεσης, ώστε τα αποτελέσματα βαθμονόμησης να στηρίζονται πάντα σε ένα συγκεκριμένο σετ σημείων, για πιο σταθερές λύσεις.
- Προτείνεται, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, η εκτέλεση πτήσης με ποσοστά επικάλυψης 80% κατά μήκος και 60% κατά πλάτος. Μέσα στο επικαλυπτόμενο αυτό κομμάτι επαρκής αριθμός σημείων σύνδεσης είναι απαραίτητος για την εξαγωγή των λοιπών παραμέτρων βαθμονόμησης πλην της σταθεράς της μηχανής και του πρωτεύοντος σημείου.
- Η εκτέλεση μίας γραμμής πτήσης και προς τις δυο διευθύνσεις θεωρείται απαραίτητη για το πρωτεύον σημείο, ενώ για τη σταθερά της μηχανής, αναγκαίες είναι οι υψομετρικές διαφορές. Τα παραπάνω προτείνονται από μερικούς ερευνητές για τον ορθό τρόπο προγραμματισμού πτήσης σε εργασίες βαθμονόμησης.
- Η εξέταση των παραπάνω ζητημάτων, μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια μιας άλλης διπλωματικής ή μεταπτυχιακής εργασίας.

- Αφού διαπιστωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης, προτείνεται να εξεταστεί το ενδεχόμενο σύστασης κατάλληλου φορέα πιστοποίησης για την εγκυρότητα της διαδικασίας της βαθμονόμησης με τη χρήση του πεδίου ελέγχου που ιδρύθηκε, ώστε να δοθεί η δυνατότητα στους οργανισμούς που διαθέτουν μηχανές αεροφωτογράφησης (κράτους και ιδιωτών) να γίνουν κοινωνοί των ωφελημάτων από αυτή τη διαδικασία.

Τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια κλείνοντας την παρούσα εργασία και πιστεύοντας ότι θα δοθούν τα κατάλληλα ερεθίσματα για περαιτέρω διερεύνηση από κάθε ενδιαφερόμενο, καθώς με την εκτέλεση μιας τέτοιας βαθμονόμησης:

- ☞ Αποφεύγεται η αποστολή της μηχανής σε ένα πιστοποιημένο οίκο για τέτοιες εργασίες, γεγονός που σημαίνει απώλειες σε κεφάλαιο και σε -ίσως πολύτιμο- χρόνο κατοχής της μηχανής, σε ένα Ευρωπαϊκό πλέον ανταγωνιστικό επιχειρηματικό περιβάλλον. Το κόστος μιας τέτοιας εργασίας ανέρχεται στα 6000€ και ο απαιτούμενος χρόνος είναι περί το μισό μήνα, κατόπιν προγραμματισμένης εκτέλεσης της βαθμονόμησης.
- ☞ Δίνεται η δυνατότητα να εξακριβωθεί αν η μηχανή λειτουργεί στα επίπεδα ακριβείας για τα οποία σχεδιάστηκε και επομένως αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή όχι για συγκεκριμένους σκοπούς.
- ☞ Τα αποτελέσματα επαναλαμβανόμενων βαθμονομήσεων μπορούν να επιτρέψουν στο χρήστη να προβλέψει σε ποια χρονική στιγμή η μηχανή απαιτεί ρύθμιση ή επισκευή.
- ☞ Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης ενός πεδίου βαθμονόμησης, είναι ότι εκτός από την μηχανή μεμονωμένα, ολόκληρο το σύστημα φωτογράφησης μπορεί να βαθμονομηθεί και οι προσδιοριζόμενες παράμετροι δεν είναι μόνο θεωρητικά, αλλά και πρακτικά έγκυρες σε συνθήκες πτήσης. Επιπλέον για την εργασία αυτή δεν απαιτείται επιπρόσθετος εξειδικευμένος εξοπλισμός, που χρειάζεται π.χ. στην περίπτωση της εργαστηριακής βαθμονόμησης.
- ☞ Η γνώση των παραμέτρων του συστήματος με μεγάλη ακρίβεια, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές άμεσης γεωαναφοράς των εικόνων και σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια.
- ☞ Παρέχονται οι ακριβείς τιμές των αποκλίσεων από την ιδανική κεντρική προβολή, που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση εργασιών με μεγάλες απαιτήσεις ακριβείας.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASPRS. (2000).** *"Camera Calibration Panel Report"* .
- Atkinson, K. B. (1996).** *"Close Range Photogrammetry and Machine Vision"*. Whittles Publishing, London.
- Baker, J. G. (1980).** *"Elements of photogrammetric optics - Manual of photogrammetry"* (Fourth εκδ.). Pub. America Society of Photogrammetry, 1056 pages :103-185.
- Boland, J. (1999).** *"ASPRS Camera Calibration Panel-Report"*. ASPRS Annual Conference.
- Brown, D. C. (1989).** *"A strategy for multi-camera on-the-job self-calibration"*. Institut Fur Photogrammetrie Stuttgart, Festschrift, Friedrich Ackermann, zum 60. Geburtstag, 13 pages.
- Brown, D. C. (1968).** *"Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras"*. Final report, Part 1, U.S. Army Contact: DA-44-009-AMC-1457,(X), DBA Systems Inc., Florida.
- Clarke, T., Wang, X., & Fryer, J. (1998). *"The Principal Point and CCD Cameras"*. Photogrammetric Record, 16(92): 293–312 .
- Clarke, A. T., & Fryer, F. J. (1998).** *"The development of camera calibration methods and models"*, *Photogrammetric Record*, 16(91) , σσ. 51-66.
- Corten, F. L. (1951).** *"European point of view on Standardising the methods of testing photogrammetric cameras"*, *Photogrammetric Engineering*. 27(3): 401-405.
- Cramer, M. (2005).** *"Digital Airborne Cameras – Status and Future"*. Institut für Photogrammetrie (ifp), Universität Stuttgart. Stuttgart / Germany.
- Cramer, M. (2004).** *"EuroSDR network on Digital Camera Calibration"*. Universität Stuttgart, Stuttgart / Germany.
- DeMumbrum, T. (2002).** *"Current Metric Aerial Camera Calibration in the U.S. (in Principles of Photography and Imaging)"*.
- Dörstel, C., Jacobsen, K., & Stallmann, D (X.HM).** *"DMC – Photogrammetric Accuracy – Calibration Aspects and Generation of Synthetic DMC Images"*. Technical Session.
- Dun, W. (2007).** *"Geometric Aspects of Large Size Digital Frame Cameras and Their Use for Photogrammetric Data Acquisition"*. Diploma Thesis, Institute für Photogrammetrie und Geoinformation, Hannover- Germany.
- Ebner, H. (1976).** *"Self Calibrating Block Adjustment"*. Congress of the International Society for Photogrammetry Invited Paper of Commission III.
- Estler, W., Edmundson, K., Peggs, G., & Parker, D (X.HM).** *"Large-Scale Metrology - An Update"*.
- Fraser, C. (1997).** *"Digital Camera Self-Calibration"*. ISPRS, Journal of photogrammetry and Remote Sensing 52, 149-159.
- Fraser, C., Shortis, M., & Ganci, G. (1995).** *"Multi-sensor system self-calibration"*. Australia: Department of Geomatics, University of Melbourne.
- Fritz, L., & Slama, C. (1977).** *"Multi-plate, Multi-exposure Camera Calibration by the Stellar Method"*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Fryer, J. G., & Brown, D. C. (1986).** *"Lens distortion in close range photogrammetry"*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(2):51-58.
- Fryer, J. G., & Fraser, C. S. (1986).** *"On the calibration of underwater cameras"*. Photogrammetric Record, 12(67): 73-85.
- Galetto, R., & Casella, V (X.HM).** *"An Italian National Research Project on Inertial Positioning in Photogrammetry"*. University of Pavia.
- Gardener, I., & Case. (1937).** *"Precision camera for testing lenses"*. *Journal of Research*. National Bureau of Standards, RP 984.
- Gruen, A. (1997).** *"Fundamentals of videogrammetry - A review"*. Switzerland, 8093 Ziirich: ETH Ziirich, Institute of Geodesy and Photogrammetry. ETH Hoenggerberg.
- Gruen, A., & Huang, T. (2001).** *"Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision"*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.

- Habib, A. F. (2002).** *"New Approach for Calibrating off-the-Shelf Digital Cameras"*. Commission III, WG III/1, USA.
- Hakkarainen, J. (1978).** *"Determination of radial and tangential distortion of reseau cameras with the Helsinki University of Technology horizontal goniometer"*, *Photogrammetria*. 34, σσ. 133-145.
- Hallert, B. (1963).** *"The method of least squares applied to multicollimator camera calibration"*. *Photogrammetric Engineering*, 29(5): 836-840.
- Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., Andersen, O., & Nilsen, B. (2000).** *"Integrated Sensor Orientation"*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam.
- Holzwarth, S. e. (2005).** *"Determination and Monitoring of Boresight Misalignment Angles During the HyMap Campaigns HyEurope 2003 and HyEurope 2004"*. Warsaw.
- Honkavaara, E. (2008).** *"Calibrating Digital Photogrammetric Airborne Imaging Systems Using a Test Field"*. Academic Dissertation in Photogrammetry Department of Surveying, Helsinki University of Technology.
- Honkavaara, E., Peltoniemi, J., Ahokas, E., Kuittinen, R., Hyypä, J., Jaakkola, J., και συν. (2008).** *"A Permanent Test Field for Digital Photogrammetric Systems"*. Finnish Geodetic Institute, Finland: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 74, No. 1, pp. 95–106.
- Hothmer, J. (1958).** *"Possibilities and limitations for elimination of distortion in aerial photographs"*. *Photogrammetric Record*. 2(12): 426-445.
- Jacobsen, K., & Passini, R (X.HM).** *"Geometric and Radiometric Property of Large Size Digital Aerial Frame Cameras"*. Institute for Photogrammetry and Geoinformation Leibnitz University Hannover.
- Jacobsen, K., & Schmitz, M. (1996).** *"A new Approach for Combined Block Adjustment Using GPS Satellite Constellations"*. *IAPRS (31) B3*, pp. 355-359.
- Kilpela, E. (1981).** *"Compensation of Systematic Errors of Image and Model Coordinates"*. Helsinki University of Technology, Institute of Photogrammetry, Finland.
- Kraus, K. (1997).** *"Photogrammetry, Advanced methods and applications"* (4 εκδ., Τόμ. 2). (P. Stewardson, Μεταφρ.) Ferd.Dummlers Verlag, Bonn.
- Kraus, K. (2004).** *"Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans"* (2 εκδ.). (I. Harley, & S. Kyle, Μεταφρ.)
- Kraus, K. (2003).** *"Φωτογραμμετρία, Βασικές Έννοιες και Μέθοδοι"* (2 ed., Vol. 1). (A. Γεωργόπουλος, & E. Βοζίκης, Trans.) Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
- Kruck, E. J. (1985-2003).** *"BINGO - Bundle Adjustment for Engineering Applications"*. Aalen, Germany.
- Kruck, E., Wubena, G., & Bagge, A. (1996).** *"Advanced Combined Bundle Block Adjustment With Kinematic GPS Data"*. *IAPRS (31) B3*, pp. 394-398.
- Lahoz, G., Méndez, C., & Rubio, M (X.HM).** *"Lens distortion simulation. An application for understanding"*. Salamanca University, Valladolid University (Spain).
- LeicaGeosystems. (2008).** *"ERDAS Field Guide - Volume II"*. NorCross, USA.
- LeicaGeosystems. (2008).** *"Leica Photogrammetry Suite Project Manager - User's Guide"*. Norcross, USA.
- LeicaGeosystems. (2004).** *"Product Description of Leica DSW700 Digital Scanning"*. Atlanta, USA.
- Luhmann, T. (2010).** *"Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie"*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Madani, M. (2010).** *"RMK D Geometric Calibration and its Accuracy Potentials"*. EuroCOW 2010: The calibration and orientation workshop, Spain.
- Madani, M., & Shkolnikov, I. (2008).** *"Further Investigation into Geometric Accuracy of DMC"*. Intergraph Corporation, Alabama, USA.
- Mansholt, U., & Ladstaedter, R. (2008).** *"Geometric Analysis of Vexcel Imaging Ultracamx Test Flights"*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote*

- Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing.
- Merchant, D., Schenk, A., Habib, A., & Yoon, T (X.HM).** *"USGS/OSU Progress With Digital Camera in situ Calibration Methods"*.
- Nafría, D., Arias, B., Blanco, V., Rodríguez, O., Blanco, M., Antolín, F., και συν. (2008).** *"Establishing a Camera-Imu Calibration Procedure for the Spanish National orthophoto Program"*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing.
- Novak, K. (1986).** *"Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der TU Wien"*. Heft 28.
- Odle, J. E. (1951).** *"English viewpoint: lens testing and camera calibration"*. *Photogrammetric Engineering*. 17(3): 406-412.
- Pagnutti, M., Holekamp, K., Ryan, R., Blonski, S., Sellers, R., Davis, B., και συν. (X.HM).** *"Measurement Sets and Sites Commonly Used for Characterizations"*. (supported by the NASA Earth Science Applications Directorate under contract number NAS 13-650 at the John C. Stennis Space Center, Mississippi.).
- Pestrecov, K. (1951).** *"Calibration of lenses and cameras. Photogrammetric Engineering"*. 17(3): 398-400.
- Rampal, K. K. (1999).** *"Handbook of Aerial Photography and Interpretation"*. Consept Publishing Company, New Delhi.
- Ray, S. F. (2002).** *"Applied Photographic Optics"*. Focal Press, Oxford.
- Read, R., & Graham, R. (2002).** *"Manual of Air Survey: Primary Data Acquisition"*. Whittles Publishing, Caithness.
- Schenk, T. (2005).** *"Introduction to Photogrammetry"*. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University.
- Schwarz, K., Chapman, M., Cannon, E., & Gong, P. (1993).** *"An Integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data"*. PE&RS (59) 11, pp. 1667-1674.
- Skaloud, J. (1999).** *"Problems in Sensor Orientation by INS/DGPS in the Airborne Environment"*. Barcelona: Proceedings, ISPRS Workshop: Direct versus indirect methods of sensor orientation.
- Spriggs, R. (1966).** *"The Calibration of Military Cartographic Cameras"*. U.S. Army Engineer Geodesy, Intelligence and Mapping R&D Agency.
- Stallmann, D. (2008).** *"DGAP Software Notes"*.
- Stensaas, G. L. (2007).** *"U.S. Geological survey digital aerial mapping camera certification and quality assurance plan for digital imagery"*. Photogrammetric Week 2007, (Fritsch, D., Ed.), Wichmann Verlag, pp. 107-116.
- Tang, L. (2000).** *"Geometric accuracy potential of the digital modular camera"*. IAPRS, Vol. XXXIII Amsterdam.
- Thompson, E. H. (1957).** *"The geometrical theory of the camera and its application to photogrammetry"*. *Photogrammetric Record*, 2(10): 241-263.
- Thompson, M. (1965).** *"Manual of Photogrammetry"* (3 εκδ., Τόμ. 1). (A. S. Photogrammetry, Επιμ.) George Banta Co., Menaska, Wisconsin.
- Torlegard, K (X.HM).** *"Test Field and Self Calibration of Fiducial Marks"*. Department of Photogrammetry, KTH, Stockholm, Sweden.
- USGS. (2008).** *"Digital Aerial Imagery - Calibration Range Requirements"*. (United States Geological Survey).
- Washer, F. (1957b).** *"Calibration of airplane cameras"*. *Photogrammetric Engineering*. 23(5): 890-891.
- Washer, F. (1957a).** *"Prism effect, camera tipping, and tangential distortion"*. *Photogrammetric Engineering*. 23(3): 721-732.
- Washer, F., & Case, F. (1950).** *"Calibration of Precision Airplane Mapping Cameras"*. U. S. Department of Commerce-National Bureau of Standards.
- Yastikli, N. (2004).** *"The Effect of System Calibration on Direct Sensor Orientation"*. Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.

- Zeiss (X.HM).** "RMK TOP Technical Data". RMK TOP Manual 51-1175.
- Zhizhuo, W. (1990).** "Principles of Photogrammetry (with Remote Sensing). (C. Maorong, Μεταφρ.) Publishing house of surveying and mapping, Beijing.
- Ziemann, H. (1986).** "Thoughts on a standard algorithm for camera calibration. Progress in Imaging Sensors". Proc. ISPRS Symposium, Stuttgart, : 41-48.
- Γεωργόπουλος, Α. (2000).** "Αρχές Λειτουργίας και Διαδικασίες Διακρίβωσης Φωτογραμμετρικών Οργάνων". Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Γεωργόπουλος, Α. (1998).** "Ψηφιακή Φωτογραμμετρία". Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Γεωργόπουλος, Α., & Χλιβερού, Ρ. (2003).** "Στοιχεία Φωτογραφικής Τεχνικής". Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Δερμάνης, Α. (1986).** "Συνορθώσεις Παρατηρήσεων και Θεωρία Εκτίμησης" (Τόμ. ΙΙ). Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Ιωαννίδης, Χ. (2008).** "Φωτογραμμετρία ΙΙ - Συμπληρωματικές Σημειώσεις και Διαφάνειες από τις Παραδόσεις". Αθήνα.
- Καρράς, Γ. (1998).** "Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στη Φωτογραμμετρία". Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μπαντέκας, Ι. (1980).** "Φωτογραμμετρία" (ΙΙ εκδ., Τόμ. Ι). Αθήνα.
- Παπαδόπουλος, Ν. (2010).** "Βαθμονόμηση Ψηφιακών Μηχανών Αεροφωτογράφησης". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπάζογλου, Δ. (2001).** "Διδακτικές Σημειώσεις Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Οπτική και Όραση". Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- Πατιάς, Π. (1994).** "Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία". Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Πατιάς, Π. (2003).** "Θέματα Φωτογραμμετρικής Παραγωγής". Θεσσαλονίκη.
- Πέτσα, Έ. (2000).** "Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας". Διδακτικές Σημειώσεις, ΤΕΙ Αθήνας.
- Φιλιόπουλος, Ι. (2010).** "Ίδρυση Πεδίου Ελέγχου, για τη Βαθμονόμηση Μηχανών Αεροφωτογράφησης". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.

Η ένδειξη (X.HM) σημαίνει Χωρίς Ημερομηνία για την αντίστοιχη πηγή, όπου αυτό αναγράφεται.

Url's

(Ημερομηνία τελευταίας ενεργού πρόσβασης 20 Ιουν 2010)

- <https://alpha.physics.uoi.gr/optlab/LF/LF.doc>
- http://optics-vision.med.uoc.gr/pdf/THEODORIDIS_MSc.doc
- <http://wapedia.mobi/el/Φακός>
- http://www.teiser.gr/geoplir/mathima606.files/Photointerpretation_Perakis.pdf
- <http://www.geomet.gr/services/photogrammetry.shtml>
- <http://wapedia.mobi/el/φακός>
- <http://www.sfak.gr/forum/index.php?topic=297.0>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(optics))
- http://www.ferris.edu/FACULTY/BURTCHR/sure440/notes/Corrections_to_photo_coordinates.html
- <http://www.aoc.co.za/DMC%281%29.pdf>
- <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>
- http://www.asprs.org/news/archive/final_report.html
- <http://calval.cr.usgs.gov/osl/opticalcalservfees.php>
- http://www.ifp.uni-stuttgart.de/forschung/photo/test_site/vaih
- <http://www.scribd.com/doc/24488305/Military-Cartographic-Camera-Calibration>
- http://www.army.gr/default.php?pname=Article&art_id=35588&cat_id=155
- http://www.asprs.org/news/archive/final_report.html
- <http://calval.cr.usgs.gov/>
- <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/images/aerial/orientation/calibration.html>
- <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/miscellaneous/lenscorrection/>

<http://toothwalker.org/optics/distortion.html>

<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/index.en.html>

<http://www.scribd.com/doc/24488305/Military-Cartographic-Camera-Calibration>

<http://robots.stanford.edu/cs223b04/JeanYvesCalib/htmls/links.html>

http://www.ipet.gr/digitech2/index.php?option=com_content&task=view&id=73&Itemid=2

http://images.google.gr/imgres?imgurl=http://www.ferris.edu/FACULTY/BURTCHR/sure440/notes/Corrections_to_photo_coordinates_files/image051.gif&imgrefurl=http://www.ferris.edu/FACULTY/BURTCHR/sure440/notes/Corrections_to_photo_coordinates.htm&usq=9okwi9PHdBB06lmrqHZ1u7t4=&h=277&w=564&sz=4&hl=el&start=4&itbs=1&tbnid=q9S6vBFMO6Q6gM:&tbnh=66&tbnw=134&prev=/images%3Fq%3Ddecentering%2Bdistortion%26hl%3Del%26tbs%3Disch:1


```

:CAPA 3      1 153.120 0.013 0.000 0.05 0.05 0.05
:RADI 1 10.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 1.0 0.0 -1.0 -1.0 -1.0 0.0 2.0 1.0
:ADPA 1 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
:COES      0.00148 0.00150 0.00228
:CONT      36 501414.3437 4175221.265 165.9006
:CONT      55 500988.7835 4175622.409 203.9132
:CONT      9007 500406.9623 4174957.528 140.215
:CONT      56 500866.2387 4174736.029 149.2339
:CONT      53 500139.8449 4175490.845 198.1855
:CONT      9005 499376.4874 4175389.424 147.6155
:CONT      52 499315.6777 4174776.098 144.6681
:CONT      9004 498953.3138 4174879.695 126.7529
:CONT      48 498524.3054 4175498.743 101.1681
:CONT      49 498492.449 4174709.032 213.273
:CONT      9003 498077.4334 4175353.796 74.2502
:CONT      46 497807.5652 4175716.343 66.635
:CONT      10 497485.6879 4174891.37 58.0279
:CONT      45 497061.7666 4174739.2 38.5116
:CONT      9001 496685.8335 4175295.33 46.2312
:CONT      44 497108.3233 4175679.871 34.238
:CONT      41 496415.9421 4175720.011 18.4652
:CONT      42 496266.2682 4174879.973 17.6863
:CONT      43 496546.8945 4174576.395 31.3376
:CONT      9009 496922.6306 4174211.095 80.6622
:CONT      47 497801.1832 4174640.821 75.2414
:CONT      14 497626.9768 4174014.642 92.1235
:CONT      15 498538.34 4174074.951 163.8177
:CONT      9006 499791.9785 4174710.636 149.4334
:CONT      64 499997.4744 4174331.523 121.5026
:CONT      65 501154.0079 4174086.46 129.5503
:CONT      11 501567.5363 4174679.845 183.4743
:CONT      58 501726.8655 4174731.409 183.6051
:CONT      20 501610.1895 4173704.495 173.2353
:CONT      73 501531.3307 4173371.242 182.4868
:CONT      38 501232.8427 4173920.86 136.9339
:CONT      19 500315.8168 4173909.575 154.3546
:CONT      18 499599.2716 4173982.005 142.3271
:CONT      71 499725.9458 4173516.1 96.0429
:CONT      17 499330.4659 4173853.095 101.3547
:CONT      70 499006.2997 4173574.042 126.2248
:CONT      16 498800.4199 4173780.883 132.2391
:CONT      69 498081.4948 4173660.704 136.8133
:CONT      68 497317.527 4173621.858 72.9555
:CONT      13 496615.5054 4173410.757 47.0371
:CONT      12 496379.8965 4173826.092 54.132
:CONT      67 496059.5183 4173560.527 47.5407
:CONT      26 501394.9827 4172720.874 177.7797
:CONT      102 501520.5133 4172559.515 178.5175
:CONT      92 500825.4869 4173018.532 103.1546
:CONT      87 500468.3141 4172940.823 85.6776
:CONT      78 500006.9513 4172841.899 78.4837
:CONT      24 499428.9926 4173295.373 117.4083
*** C111 Unused control point 24 ignored.
:CONT      30 498924.4317 4172598.709 118.2535
:CONT      84 498674.7283 4172914.432 171.0066
:CONT      76 498360.5559 4172839.655 180.4755
:CONT      29 498238.8083 4172713.037 187.3217
:CONT      75 497400.6687 4173068.522 92.9673
:CONT      21 496852.6162 4173105.767 83.2456
:CONT      22 496921.6281 4172877.719 161.4377
:CONT      33 501370.3878 4172363.797 171.9226
:CONT      32 500698.8038 4172377.107 81.7121
:CONT      31 499924.8182 4172132.31 90.3544
:CONT      86 499388.4364 4172174.576 131.1471
:CONT      83 497934.5087 4172256.638 229.6997
:CONT      28 497792.9406 4172575.164 247.4991
:CONT      82 497193.9636 4172158.436 213.7381
:CONT      34 496570.1238 4172464.002 234.7345
:CONT      81 496603.3753 4172157.106 214.2245
:CONT      80 496027.8735 4172198.766 102.5159
:CHCK      57 501695.1337 4175633.7339 152.6044
:CHCK      9008 501254.0573 4174999.0793 172.247
:CHCK      54 500072.8707 4174742.2416 145.8982
:CHCK      51 499243.2731 4175667.6159 135.1435
:CHCK      9002 497528.0873 4175376.5498 61.5842
:CHCK      40 496094.3286 4175564.9803 12.5759

```

```

:CHCK      61 496121.6447 4174248.2924 19.1273
:CHCK      62 497190.9478 4174247.8914 49.1943
:CHCK      63 499057.3399 4174271.4848 116.6120
:CHCK      66 501739.9148 4174092.8898 173.5816
:CHCK      25 501098.8974 4173636.4933 118.9586
:CHCK      72 500701.7563 4173408.4994 98.2103
:CHCK      77 499221.1282 4172970.9901 113.7276
:CHCK      23 497707.0167 4173288.7208 82.7265
:CHCK      74 496393.8548 4172905.1333 69.5405
:CHCK     101 501430.9468 4172038.5363 178.3112
:CHCK      88 500401.3047 4171947.9999 58.9448
:CHCK      85 498996.4558 4172004.4856 115.3899
:CHCK      27 497485.4823 4172164.2887 240.8725
:CHCK      35 496190.0828 4171983.0641 114.6257

```

DATA FROM ITERA FILE

```

=====
No. of photo orientation data : 102
No. of approximate coordinates : 4355
No. of camera input statements : 1

```

BINGO 5.1.6 Dec 2004 18:16:03 Monday, 20 September 2010

CHECK PRINT OF INPUT DATA

```

=====
Selected parameters :
-----
A priori standard deviation for photo coordinates
in x' : 3.9 (1/1000) in y' : 3.9 (1/1000)

Criteria to terminate iterations
Max. no. of iterations : 8
Max. value in solution vector x : 0.10E-01

Program operations
Calculation of profile inverse : yes
Calculation of full inverse : no
Calculation of redundancies : yes
Reading from ITERA FILE : yes
Write results on ITERA FILE : yes
Write original point coords. on ITERA FILE: no
Correct photo coords. for earth curvature: no
Correct photo coordinates for refraction : no
Error detection for wrong point numbers : yes
Transf. of photo residuals to object space: yes
Create photo residual file : yes

No. of adjustment points : 4355
No. of photos : 102

```

BINGO 5.1.6 Dec 2004 18:16:03 Monday, 20 September 2010

START OF ITERATIVE ADJUSTMENT

```

=====
Iteration no. 1
No. of unknowns : 13690
No. of observation equations : 40529
Profile of normal equation matrix N : 1527220 = 1.63%
Memory space available for N : 2800000
Average bandwidth of N : 111
Effort for factorisation (Mio mult.): 84.65
A priori stand. dev. of unit weight : 3.90 (1/1000)
Sigma 0 before adjustment : 4.42 (1/1000)
Stand. dev. of unit weight sigma 0 : 3.49 (1/1000)
Max. value in solution vector : 0.1235E+00
Average value in solution vector : 0.7275E-03
Add. parameter 9 for camera 1 eliminated.
Correlation to parameter 10 is too high: 0.91

Iteration no. 2
Stand. dev. of unit weight sigma 0 : 3.49 (1/1000)
Max. value in solution vector : 0.1486E-01
Average value in solution vector : 0.3699E-03

```

Add. parameter 10 for camera 1 eliminated. No significance.
Parameter value= 0.0, standard deviation= 1.65 (1/1000)

Iteration no. 3
Stand. dev. of unit weight sigma 0 : 3.49 (1/1000)
Max. value in solution vector : 0.7554E-04
Average value in solution vector : 0.1155E-05

Camera 1

Correlation between add. parameters in %

1 100
2 2 100
3 0 -1 100
4 2 4 -5 100
5 -1 -3 1 -59 100
6 1 0 33 -2 0 100
7 -36 -3 0 -2 0 1 100
8 8 -1 6 -2 0 0 -51 100
C' 10 -17 0 2 0 0 -7 0 100
XH' 15 1 -53 4 -5 -7 -5 -2 1 100
YH' -2 12 2 -55 21 3 2 2 0 -3 100
1 2 3 4 5 6 7 8 C' XH' YH'

Sigma 0 used for estimation of standard deviations: 3.49 (1/1000)
Par.no Parameter value Standard dev. Value/Stand.dev Total correlation
(1/1000) (1/1000)
1 -0.8 0.1 -7.9 0.18
2 -0.6 0.1 -5.5 0.08
3 -1.4 0.8 -1.7 0.38
4 3.2 0.9 3.4 0.55
5 -2.3 0.2 -14.3 0.37
6 1.4 0.1 9.4 0.13
7 8.1 0.2 36.5 0.38
8 -1.2 0.3 -3.7 0.29
C' 71.4 9.2 7.8 0.05
XH' -51.9 2.2 -23.9 0.32
YH' 5.1 2.2 2.3 0.35

BINGO 5.1.6 Dec 2004 18:16:36 Monday, 20 September 2010

RESULTS OF ADJUSTMENT SIGMA 0 = 3.49 (1/1000)

Listing of photo orientation data suppressed.

Mean photo scale: 5.251

RMS precision values of photo orientations from Qxx matrix (X,Y,Z,phi,omega,kappa): (1/1000)

17. 16. 49. 1.1 1.1 0.4

Poorest precision values of photo orientations from Qxx matrix (X,Y,Z,phi,ome,kap): (1/1000)

59. 31. 60. 4.8 1.8 1.2

Camera data

Camera no. 1

Camera constant c' : 153.1914
+S (1/1000): 9.2

Principal point PPA xH', yH' : -0.0389 0.0051
+S (1/1000): 2.2 2.2

Additional parameters : Format factor = 0.992000

1 2 3 4 5 6
7 8

-0.0008 -0.0006 -0.0014 0.0032 -0.0023 0.0014
0.0081 -0.0012

Radial symmetric lens distortion from additional radial parameters (1/1000)

Distortion values; First value for R = 10.0 (= Step width)
0.8 1.5 2.1 2.6 3.0 3.2 3.3 3.2 2.9 2.4
1.7 0.7 -0.5 -2.0 -3.8 -5.9

New radial symmetric lens distortion

(Sum from input values and additional parameters)
Distortion values; First value for R = 10.0 (= Step width)
0.8 1.5 2.1 2.6 3.0 4.2 4.3 3.2 1.9 1.4
0.7 -0.3 -0.5 0.0 -2.8

Listing of object point coordinates suppressed.

RMS precision values of object points (X,Y,Z): 15. 16. 30. (1/1000)
Poorest precision values of object points (X,Y,Z): 174. 224. 373. (1/1000)
RMS precision values of control points (X,Y,Z): 1. 1. 2. (1/1000)
(Computed from Qxx matrix)

Residuals of independent check points

Point No.	X	Y	Z	VX	VY	VZ
(1 / 1 0 0 0)						

57	501695.134	4175633.734	152.604	-10.	-1.	20.
9008	501254.057	4174999.079	172.247	-13.	12.	15.
54	500072.871	4174742.242	145.898	0.	7.	18.
51	499243.273	4175667.616	135.143	21.	41.	-123.
9002	497528.087	4175376.550	61.584	-19.	21.	35.
40	496094.329	4175564.980	12.576	-8.	16.	-37.
61	496121.645	4174248.292	19.127	9.	8.	0.
62	497190.948	4174247.891	49.194	-24.	11.	-2.
63	499057.340	4174271.485	116.612	-2.	-17.	-2.
66	501739.915	4174092.890	173.582	-19.	-6.	26.
25	501098.897	4173636.493	118.959	-24.	-2.	-3.
72	500701.756	4173408.499	98.210	-29.	-21.	-5.
77	499221.128	4172970.990	113.728	20.	-16.	-1.
23	497707.017	4173288.721	82.727	-6.	-21.	-19.
74	496393.855	4172905.133	69.540	2.	0.	61.
101	501430.947	4172038.536	178.311	32.	-53.	-80.
88	500401.305	4171948.000	58.945	-42.	-66.	-62.
85	498996.456	4172004.486	115.390	-10.	-72.	-7.
27	497485.482	4172164.289	240.873	-1.	-22.	12.
35	496190.083	4171983.064	114.626	-3.	9.	-91.

RMS values of check point residuals 18. 29. 46.

Test : $v(T)Pv = 3.271269E-01$ O.K.
 $l(T)Pl - n(T)x = -v(T)Pl = 3.271269E-01$

Test : Sum. of red. = 26841.000 O.K.
 $f = n-u+d = 26841$

A posteriori variance-component estimation

Test value = $s(a \text{ posteriori}) / s(a \text{ priori})$

Group	Test Value	No. of Obs.	Redundancy
Photo coordinates	: 0.89	40334	26834.29
Camera data incl. vector e'	: 1.03	3	2.95
Coordinates of control points	: 1.96	192	3.75
Sum of all observations	: 0.90	40529	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «B»

➤ Αποτελέσματα LPS-ERDAS

Παράμετρος	No additional parameters		Bauer's simple model (3)		Jacobsen's simple model (4)	
	Τιμή	σο	Τιμή	σο	Τιμή	σο
c (mm)	153.2339	0.0101	153.2407	0.0094	153.2389	0.0094
xo (mm)	-0.0413	0.002	0	0.002	0.0006	0.002
yo (mm)	0.0035	0.002	-0.0007	0.0019	0.0003	0.0019
AP	-	-	-3.5878E-09	1.0102E-10	-3.6079E-09	1.0092E-10
			-2.8835E-05	5.1180E-07	-2.8847E-05	5.1115E-07
			2.6764E-06	9.5988E-07	1.3664E-06	4.7934E-07
			-	-	-6.3806E-08	7.6632E-09
Control RMSE (m)						
Ground X	0.0007		0.0005		0.0005	
Ground Y	0.007		0.0005		0.0005	
Ground Z	0.0013		0.0012		0.0011	
Check Point RMSE (m)						
Ground X	0.0225		0.0131		0.0123	
Ground Y	0.0382		0.0155		0.0149	
Ground Z	0.108		0.0607		0.0598	
Total image unit-Weight RMSE						
	0.004		0.0037		0.0037	
Παράμετρος	Ebner's orthogonal model (12)		Brown's physical model (14)		Lens distortion model (2)	
	Τιμή	σο	Τιμή	σο	Τιμή	σο
c (mm)	153.2133	0.0091	153.2159	0.0088	153.2306	0.0098
xo (mm)	0.009	0.0019	0.0031	0.0019	-0.0412	0.002
yo (mm)	0.0048	0.0019	0.0089	0.0018	0.0043	0.0019
AP	-2.3225E-05	5.1334E-07	-1.4745E-05	1.2896E-06	-1.0123E-08	3.1693E-10
	4.8642E-07	4.6016E-07	-1.8088E-06	1.0734E-06	2.6260E-13	1.2661E-14
	-7.6850E-08	3.5397E-09	1.8748E-07	1.5845E-08	-	-
	5.2510E-08	4.8474E-09	-2.7315E-07	1.2246E-08	-	-
	-2.6645E-07	1.0165E-08	6.4719E-11	1.2027E-10	-	-
	-6.6917E-08	7.5881E-09	-6.2729E-09	1.9741E-10	-	-
	-8.0406E-09	1.7101E-10	-2.0114E-12	2.0743E-12	-	-
	1.1838E-09	1.1912E-10	-2.4157E-07	1.3180E-08	-	-
	7.6751E-11	1.2478E-10	-7.3528E-08	1.0307E-08	-	-
	1.9232E-10	1.2896E-10	3.4812E-09	1.6633E-10	-	-
	-1.5936E-12	2.1484E-12	6.4465E-10	1.2501E-10	-	-
	1.4017E-12	1.9641E-12	2.9546E-12	1.8955E-12	-	-
	-	-	5.1023E-13	2.4752E-14	-	-
-	-	-7.1794E-09	1.6040E-10	-	-	
Control RMSE (m)						
Ground X	0.0005		0.0005		0.0006	
Ground Y	0.0005		0.0005		0.0006	
Ground Z	0.0011		0.0011		0.0011	
Check Point RMSE (m)						
Ground X	0.0129		0.013		0.0215	
Ground Y	0.0136		0.0134		0.0327	
Ground Z	0.0625		0.0371		0.0594	
Total image unit-Weight RMSE						
	0.0035		0.0034		0.0039	

Πίνακας B-1: Αποτελέσματα LPS-ERDAS αναφερόμενα στις ρυθμίσεις της παραγράφου 7.5.6, χωρίς ορισμό τυπικής απόκλισης στα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού (για σύγκριση με Πίνακας 7-1)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Γ»

➤ Αποτελέσματα DGAP

dgap version 3.3.0 system Win32 compiler MS-VS C++ 2005 compiled Mar 5 2008 21:47:22
 Start: 2010-10-23 23:48:52

Input data

=====

Number of ...

- images : 102
 - cameras : 1
 - image points : 20260
 - object points : 86
 - stations : 102
 - IMU misalignments : 0
 - orientation data : 0

Least-squares parameters/options

=====

Standard deviation of unit weight : 4.00 um
 Maximum number of iterations : 8
 General convergence check : on
 Convergence limit : 1.00e-010
 - AP sets : 3
 - position corrs. : 0
 - attitude corrs. : 0

Unknowns used for iteration criterion

- object point coords. : off
 - perspective centre coords. : off
 - rotation parameters : off

Convergence limits

- object point coords. : 0.0010 m
 - perspective centre coords. : 0.0010 m
 - rotation parameters : 1.00e-006

Limit of std. dev. to indicate that

- unknown should be eliminated : 1.00e-030
 - value is an unknown : 1.00e+030

Value of std. dev. to indicate that

- unknown is fixed : 1.00e-031
 - unknown is free : 1.00e+031

Weight for suppression of unknowns : 1.00e+010

Weight for constraints : 1.00e+010

Output limit of correlation coeffs : 0.90

Increment for num. derivatives

- object point coordinates : 1.00e+000 m
 - rotation angles : 1.00e-003 rad

Limit for single significance test : 1.96

Limit for A'Pv-check : 1.00e-004

Limit for printing residuals : 0.00 um

Unit of object space coords. : m

Unit of rotation angles : deg

Adjustment interface : lapack

Partial derivatives of APs from : image coords. plus APs

Photogrammetric network design parameters/options

=====

Minimal number of rays

- per object point : 2
 - per image : 3

Data defined for adjustment

Images : 102
 Cameras : 1
 Stations : 102
 Additional parameter sets : 3
 Position corrections : 0
 Attitude corrections : 0
 IMU misalignments : 0
 Object points (total) : 4360
 Control points : 65
 Check points : 20

Number of observations, unknowns and redundancy

Observations:

Image point coordinates : 20260
 Total number of observations : 40520

Unknowns: total thereof
 obs. eli.
 Object point coordinates : 13080 0 195
 Station parameters : 612 0 0
 Additional parameters : 8 8 0
 Position corrections : 0 0 0
 Attitude corrections : 0 0 0
 IMU misalignments : 0 0 0
 Total number of unknowns : 13700 8 195
 Constraints : 0
 Redundancy : 27023
 Elapsed cpu time to initialize adjustment: 11.78 s

*** Start iteration loop

Iteration number 1

Additional parameters

ID : inner
 Subtype : inner orientation
 Index : 13692

Param.	State	Approx.	Change	Adjusted
dxp	obs	0.000e+000	-4.695e-005	-4.695e-005
dyp	obs	0.000e+000	2.380e-006	2.380e-006
dc	obs	0.000e+000	1.236e-004	1.236e-004

ID : radial
 Subtype : radial distortion
 Index : 13695

Param.	State	Approx.	Change	Adjusted
K1	obs	0.000e+000	-9.727e-003	-9.727e-003
K2	obs	0.000e+000	2.440e-001	2.440e-001
K3	obs	0.000e+000	6.266e-003	6.266e-003

ID : decentering
 Subtype : decentering distortion
 Index : 13698

Param.	State	Approx.	Change	Adjusted
P1	obs	0.000e+000	-7.818e-005	-7.818e-005
P2	obs	0.000e+000	-1.009e-004	-1.009e-004

Average change of unknown parameters
 - object point coords. : 7.434e-002 m
 - perspective centre coords. : 3.888e-001 m
 - rotation parameters : 1.568e-004

Number of observations : 40520
 Number of unknowns : 13700 (thereof: 8 obs. 195 elim.)
 Number of constraints : 0
 Redundancy : 27023
 Sigma 0 a posteriori : 3834.92 um

v'Pv : 3.974e-001 m²
 l'Pl : 1.152e+001 m²
 x'A'Pl : 1.112e+001 m²

Convergence check
 eps : 1.000e-010 m²
 x'A'Pl < eps : false -> convergence limit not reached

Elapsed cpu time per iteration: 26.33 s, solution only: 18.59 s

Iteration number 4-----
Additional parameters

ID : inner
 Subtype : inner orientation
 Index : 13692

Param.	State	Approx.	Change	Adjusted
dxp	obs	-4.696e-005	-2.364e-014	-4.696e-005

dyp obs 2.157e-006 1.588e-013 2.157e-006
dc obs 1.237e-004 -3.989e-013 1.237e-004

ID : radial
Subtype : radial distortion
Index : 13695

Param.	State	Approx.	Change	Adjusted
K1	obs	-9.758e-003	-7.561e-011	-9.758e-003
K2	obs	2.448e-001	3.134e-009	2.448e-001
K3	obs	6.282e-003	1.679e-010	6.282e-003

ID : decentering
Subtype : decentering distortion
Index : 13698

Param.	State	Approx.	Change	Adjusted
P1	obs	-7.824e-005	-4.436e-013	-7.824e-005
P2	obs	-1.011e-004	7.571e-013	-1.011e-004

Average change of unknown parameters
- object point coords. : 2.353e-010 m
- perspective centre coords. : 1.610e-009 m
- rotation parameters : 3.367e-013

Number of observations : 40520
Number of unknowns : 13700 (thereof: 8 obs. 195 elim.)
Number of constraints : 0
Redundancy : 27023
Sigma 0 a posteriori : 3836.97 um

v'Pv : 3.978e-001 m²
l'Pl : 3.978e-001 m²
x'A'Pl : 2.657e-013 m²

Convergence check
eps : 1.000e-010 m²
x'A'Pl < eps : true -> convergence limit reached

Elapsed cpu time per iteration: 24.91 s, solution only: 18.97 s

*** Iteration criterion limit has been reached.

.....
Number of iterations: 4
Total cpu time for iterations : 100.61 s

Summary of check point analysis

Empirical accuracy in object space.

	DX/m	DY/m	DZ/m
--	------	------	------

Number of differences	: 20	20	20
Maximum of abs. differences	: 0.052	0.077	0.129
Average of differences	: 0.009	0.011	0.023
RMS of differences	: 0.021	0.032	0.058
Std. devs. of differences	: 0.019	0.030	0.055

*** Cameras updated by AP sets.

*** Cameras written: 2_camera.txt

*** Adjusted AP set data written: 1_AP.txt

*** Processing completed ***

End: 2010-10-23 23:50:50

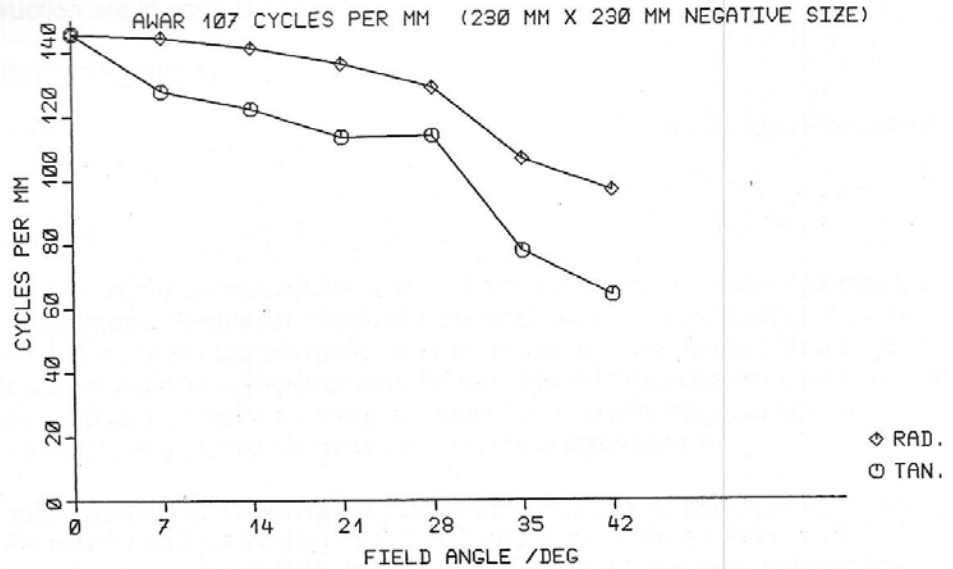
Total cpu time (all included): 118.06 s

Seite 4
Page 4

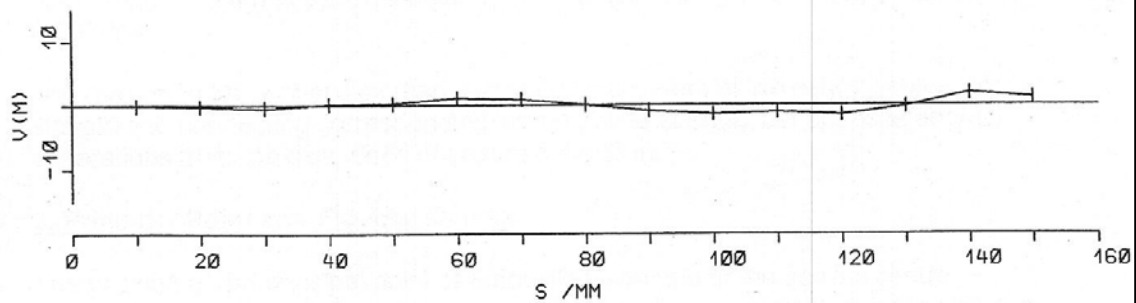
0836
DKD-K-05202
09-02

RMK TOP 15 NO. 149995

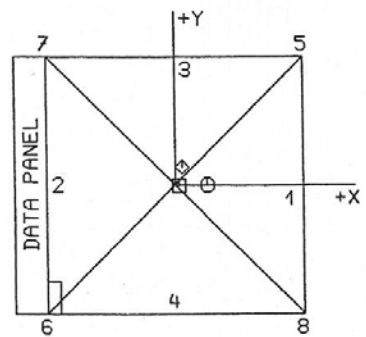
PHOTOGRAPHIC RESOLVING POWER



DEPARTURE OF AVERAGE DISTORTION FROM ZERO REFERENCE



PRINCIPAL POINT (PPA, PPS) AND FIDUCIAL CENTRE (FC)



COORDINATES, REFERRING TO PPS

	X / MM	Y / MM
\circ PPA	0.013	0.000
\square FC	0.002	-0.000
\diamond FCC (CORNER FIDUCIAL CENTRE)	0.003	0.007

1 — 0.01 MM, X-AXIS AS DEFINED BY FIDUCIAL MARK COORDINATES

$\alpha(6) = 0.0^\circ$ $\alpha(8) = \alpha(6) + 90^\circ$