



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

**Ανάπτυξη, σύγκριση και αξιολόγηση μεθόδων και
λογισμικών απαλοιφής ακτινικής διαστροφής**

Διπλωματική εργασία

Αλεξάνδρα Παπαδάκη

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Στους γονείς μου και την αδερφή μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα πολύ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Ανδρέα Γεωργόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας. Κυρίως όμως, για την ελευθερία που μου έδωσε σε ότι θέλησα να ασχοληθώ, χωρίς να με αποθαρρύνει ποτέ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Γ.Καρρά για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Ακόμη, ευχαριστώ τους φίλους μου Π.Αγραφιώτη και Β.Φλωρίδη για την πάσης φύσεως βοήθεια και ενθάρρυνση που μου παρείχαν με όλη τους την υπομονή.

Τέλος, οι πιο σημαντικοί, οι γονείς μου Ι.Παπαδάκης και Μ.Στιβακτάκη και η αδερφή μου Χ.Παπαδάκη. Τους ευχαριστώ που με υποστηρίζουν, με εμπιστεύονται, με κάνουν περήφανη γι αυτούς και με έμαθαν να κάνω πάντα ότι αγαπώ και να αγαπώ ότι κάνω.

Περίληψη

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει δώσει νέες προοπτικές στον τομέα της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών, κάνοντας εφικτή την πραγματοποίηση πολύπλοκων διαδικασιών, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο και αυξάνοντας παράλληλα την ακρίβειά τους. Στο πλαίσιο αυτό, έχει επιχειρηθεί η αυτοματοποίηση πολλών διεργασιών με σκοπό τη διευκόλυνση της διεξαγωγής τους και τη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαινομένου που έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα από αυτή την οπτική (της αυτοματοποίησης) είναι η ακτινική διαστρόφη. Συγκεκριμένα, το ενδιαφέρον έχει εστιαστεί στην αυτοματοποίηση των διαδικασιών προσδιορισμού και εξάλειψής της, με σκοπό τη διόρθωση των συντεταγμένων των στοιχείων της εικόνας και τελικά την απόκτηση εικόνων με αξιόπιστη γεωμετρική πληροφορία. Η προσπάθεια αυτή έχει φτάσει στο σημείο ανάπτυξης εμπορικών ή ελεύθερων στο διαδίκτυο λογισμικών, που υποστηρίζουν ότι μπορούν να προσδιορίσουν και να απαλείψουν αυτομάτως την ακτινική διαστρόφη μιας εικόνας, σύμφωνα με στοιχεία και πληροφορίες που λαμβάνουν αυτομάτως από το αρχείο μεταδεδομένων της εικόνας. Μάλιστα, τα λογισμικά αυτά, το μόνο που απαιτούν από το χρήστη είναι να εισαγάγει την εικόνα σε αυτά. Είναι, λοιπόν, σαφές ότι εάν τα λογισμικά αυτά παρέχουν την απαιτούμενη ακρίβεια για τις φωτογραμμετρικές ή άλλες εφαρμογές, τότε αποτελούν μια πολύ εύκολη και γρήγορη εναλλακτική λύση στις πολύπλοκες διαδικασίες διόρθωσης της παραμόρφωσης αυτής. Πόσο ακριβή είναι όμως τελικά αυτά τα λογισμικά και τι εφαρμογές μπορούν να καλύψουν;

Στην εργασία αυτή μελετάται σε βάθος η έρευνα που έχει διεξαχθεί σχετικά με την ακτινική διαστρόφη, τη μοντελοποίησή της και τις μεθόδους προσδιορισμού και εξάλειψής της. Επίσης, πραγματοποιείται διερεύνηση ενός χαρακτηριστικού δείγματος λογισμικών και συγκεκριμένα των DxO, Adobe Photoshop CS, Adobe Photoshop Lightroom, PTLens και GML Undistorter. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι σύγκρισης για την αξιολόγηση της απόδοσής τους, σχετικά με την απαλοιφή της ακτινικής διαστρόφης. Έτσι, προκύπτουν συμπεράσματα, τα οποία αξιοποιούνται για να διατυπωθεί απάντηση στο ερώτημα που τέθηκε παραπάνω, σχετικά με την ακρίβεια και την εφαρμοστικότητα των εξεταζόμενων λογισμικών όσον αφορά στην απαλοιφή της ακτινικής διαστρόφης και την απόκτηση γεωμετρικώς ορθής εικόνας.

**Development, comparison and evaluation of methods and software for
radial distortion elimination**

Alexandra Papadaki

Diploma Thesis

October 2014

Abstract

The constant development of technology has opened new perspectives in the field of Photogrammetry and Computer Vision, making it possible to carry out complex procedures, reduce the computational time while, at the same time, increasing the accuracy. In this context, it has been attempted to automate many processes in order to facilitate the procedures and to reduce the computational cost. A characteristic example of such a phenomenon that has preoccupied the scientific community from this perspective (automation) is the radial distortion in digital images. In particular, the interest has been focused on the automation of the processes of identification and elimination of the radial distortion, with the aim to correct the image coordinates and finally to obtain images with reliable geometric information. This effort has reached the point of development of commercial or free software, claiming that they can automatically identify and remove the radial distortion of an image, according to data and information obtained automatically from the metadata file of the image. In fact, these software, just require only that the user supplies the image. It is therefore clear that if these software provide the required accuracy for photogrammetric or other applications, they can be a very quick and easy alternative to complex processes of correction of this deformity. However, the question arises as to how accurate are ultimately these software and what applications can be supported?

In this work in depth the research has been conducted about the radial distortion, its modeling and the methods of its identification and elimination. Furthermore, characteristic samples of such software are investigated namely: DxO, Adobe Photoshop CS, Adobe Photoshop Lightroom, PTLens and GML Undistorter. In specific, four different methods of comparison are employed for the evaluation of their performance on the elimination of radial distortion. Thus, conclusions are drawn, which are used in order to answer the question posed above, regarding the accuracy and applicability of the various software that are examined, with respect to removing the radial distortion and producing a geometrically correct, i.e. distortion free image.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
1.2	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	3
2.1	ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ.....	3
2.2	ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ.....	3
2.3	ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗ.....	4
2.3.1	Διαστροφές των Φακών.....	4
2.3.2	Συμμετρική Ακτινική Διαστροφή.....	5
2.3.2.1	Μορφές ακτινικής διαστροφής.....	8
2.4	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗΣ.....	8
2.4.1	Πολυωνυμικά Μοντέλα.....	9
2.4.1.1	Πολυώνυμα περιπτών δυνάμεων.....	9
2.4.1.2	Πολυώνυμα αρτίων δυνάμεων.....	13
2.4.1.3	Πολυώνυμα ακεραίων δυνάμεων.....	13
2.4.2	Μοντέλα Κλασματικών Εξισώσεων (Division Model).....	14
2.4.3	Μοντέλα με Λογαριθμικές και Τριγωνομετρικές Σχέσεις.....	15
2.4.4	Μη Παραμετρικά Μοντέλα.....	17
2.4.5	Επιλογή Κατάλληλου Μοντέλου.....	18
2.5	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	18
2.5.1	Μέθοδοι Βαθμονόμησης.....	19
2.5.1.1	Βαθμονόμηση με πεδία ελέγχου.....	19
2.5.1.2	Βαθμονόμηση με γεωμετρικούς περιορισμούς.....	23
2.5.2	Αλγόριθμοι Βαθμονόμησης.....	24
2.6	ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΣΗΜΕΙΟ.....	25
2.7	ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	25
2.7.1	Διόρθωση Εικονοσυντεταγμένων με Γνωστά Στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού.....	26
2.7.2	Διόρθωση Εικονοσυντεταγμένων χωρίς Γνωστά Στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού.....	27
2.8	ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΑΠΑΛΟΙΦΗΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗΣ.....	29
2.8.1	Αρχείο Μεταδεδομένων.....	30
2.8.2	Τα Εξεταζόμενα Λογισμικά.....	31
3	ΛΗΨΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	35
3.1	ΛΗΨΗ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	35
3.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ.....	36
3.2.1	Μέθοδος Επεξεργασίας.....	36
3.2.2	Τύπος Αρχείων.....	36

3.3	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	37
3.3.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	37
3.3.2	Δεδομένα Αλγορίθμου	39
3.3.3	Στάδια Αλγορίθμου	39
4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	43
4.1	ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ.....	43
4.1.1	Συμπεράσματα Οπτικής Σύγκρισης	46
4.2	ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	46
4.2.1	Συμπεράσματα από Αφαίρεση Εικόνων.....	48
4.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗΣ.....	48
4.3.1	Βαθμονόμηση Καμπυλών Ακτινικής Διαστροφής.....	49
4.3.2	Συμπεράσματα από Σύγκριση Βαθμονομημένων Καμπυλών	52
4.4	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ.....	53
4.4.1	Αποκατάσταση Εσωτερικού Προσανατολισμού	54
4.4.2	Συνόρθωση Δέσμης.....	55
4.4.3	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square error).....	56
4.4.4	Αποδεκτή τιμή RMS.....	57
4.4.5	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα.....	57
5	ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	60
5.1	ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	60
5.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	61
5.3	ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ.....	62
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	73
	Πίνακας Εικόνων	73
	Πίνακας Πινάκων.....	73
	Πίνακας Σχημάτων	73

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην εξέλιξη της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας. Ιδιαίτερο ρόλο σε αυτό διαδραμάτισε η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών που έδωσε τη δυνατότητα για ευκολότερη και ταχύτερη επίλυση πολύπλοκων υπολογισμών. Επίσης, κομβικό σημείο στην πρόοδο αυτού του τομέα αποτέλεσε η χρήση ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και η μετάβαση από τη φωτογραφία στην ψηφιακή εικόνα. Έτσι, η απεικόνιση έπαψε να αντιμετωπίζεται μόνο με βάση τα στοιχεία που απεικονίζει και θεωρήθηκε ως πίνακας τιμών χρώματος. Η θεώρηση αυτή άλλαξε την οπτική των μελετητών σχετικά με την απεικόνιση και διεύρυνε τις δυνατότητες επεξεργασίας της. Με το σκεπτικό αυτό η οποιασδήποτε μορφής επεξεργασία της εικόνας αντισταθμίστηκε με μια μαθηματική σχέση μορφοποίησης του πίνακα που την εκφράζει. Από το στάδιο αυτό δεν άργησε να εμφανιστεί η ανάγκη για αντιμετώπιση, επιτάχυνση και αυτοματοποίηση όλο και πιο πολύπλοκων και χρονοβόρων διαδικασιών. Φυσικά, η εικόνα έγινε αντικείμενο ενδιαφέροντος ακόμη περισσότερων επιστημονικών πεδίων με πιο αξιοσημείωτο αυτό της Όρασης Υπολογιστών, που αποτέλεσε και τον ακρογωνιαίο λίθο στην αυτοματοποίηση πολλών διεργασιών επί της εικόνας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον μάλιστα έχει εκδηλωθεί σχετικά με τη γεωμετρική ακρίβεια των εικόνων και τους διάφορους παράγοντες που την υποβαθμίζουν. Για το σκοπό αυτό, έχουν απασχολήσει πολύ τον τομέα της Φωτογραμμετρίας αλλά και της Όρασης Υπολογιστών, τα αίτια και οι μέθοδοι αντιμετώπισης των παραμορφώσεων των εικονοσυντεταγμένων των απεικονιζόμενων στοιχείων.

Από τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη γεωμετρική ακρίβεια της εικόνας, έχει αποδειχθεί ότι οι πιο σημαντικοί είναι το χρησιμοποιούμενο οπτικό σύστημα και η θέση του πρωτεύοντος σημείου. Σπουδαιότερος όλων όμως θεωρείται η ακτινική διαστροφή του οπτικού συστήματος. Σχετικά με αυτό ισχύει ότι, αναλόγως με τη γεωμετρία του και τον τρόπο κατασκευής του, το οπτικό σύστημα εισάγει διάφορες παραμορφώσεις στις εικονοσυντεταγμένες των απεικονιζόμενων στοιχείων, αλλοιώνοντας το οπτικό αποτέλεσμα και την γεωμετρική του αξιοπιστία. Η σημαντικότερη δε παραμόρφωση που επιφέρει το οπτικό σύστημα στην εικόνα ονομάζεται ακτινική διαστροφή του φακού. Αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό του φωτογραφικού φακού και οφείλεται στην εκ περιστροφής κατασκευή των στοιχείων του. Σε αυτή τη μορφή παραμόρφωσης έχει αποδοθεί σχεδόν όλο το βάρος για την αλλοίωση της γεωμετρικής πληροφορίας της εικόνας. Για τη μοντελοποίηση, εύρεση και απαλοιφή της λοιπόν, έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα μοντέλα και αλγόριθμοι.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια τάση ανάπτυξης ολοκληρωμένων και πλήρως αυτοματοποιημένων λογισμικών για τον προσδιορισμό και την εξάλειψη της ακτινικής διαστροφής. Τα λογισμικά αυτά είναι είτε ελεύθερα στο διαδίκτυο είτε εμπορικά έναντι κάποιου αντιτίμου. Ο αυτοματισμός των διεργασιών που πραγματοποιούν εξασφαλίζεται μέσω μιας βάσης δεδομένων που περιέχει τις παραμέτρους που απαιτούνται, για τη διόρθωση της ακτινικής διαστροφής σύμφωνα με το επιλεγμένο μοντέλο, για ένα μεγάλο πλήθος συστημάτων μηχανής - φακού.

1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ολοκληρωμένη μελέτη του φαινομένου της ακτινικής διαστροφής και η αξιολόγηση της απόδοσης, ενός χαρακτηριστικού δείγματος των προαναφερθέντων λογισμικών, ως προς την απαλοιφή του.

Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν οι μορφές μοντελοποίησης και οι μέθοδοι προσδιορισμού και εξάλειψης της ακτινικής διαστροφής, που έχουν αναπτυχθεί από τους διάφορους επιστημονικούς τομείς έως σήμερα. Ακόμη, διεξήχθη διερεύνηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων κάποιων λογισμικών, όπως αυτά που αναλύθηκαν παραπάνω, μέσω τεσσάρων διαφορετικών μεθόδων αξιολόγησης. Για την εξασφάλιση της αντικειμενικότητας της αξιολόγησης αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής. Έτσι, ο αλγόριθμος αυτός ήταν ελεγχόμενης ακρίβειας και συνεπώς μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για τα διάφορα λογισμικά. Ωστόσο, στον αλγόριθμο αυτό δόθηκε η δυνατότητα διόρθωσης και της θέσης του πρωτεύοντος σημείου, με σκοπό να εξεταστεί η επιρροή του στην τελική ακρίβεια της εικόνας.

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με βάση τα παραπάνω εκτεθέντα, η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται στα παρακάτω κεφάλαια. Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο έχει στηριχθεί η μελέτη της ακτινικής διαστροφής διαχρονικά, αλλά και το πλαίσιο αυτής της εργασίας. Για την ακρίβεια, εξετάζονται τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την έκφραση της ακτινικής διαστροφής, οι μέθοδοι και αλγόριθμοι προσδιορισμού των παραμέτρων που απαιτούνται, οι μέθοδοι για τη διόρθωση των εικόνων και η δομή των εξεταζόμενων λογισμικών (GML Undistorter, DxO, PTLens, Adobe Photoshop CS και Adobe Photoshop Lightroom). Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται ο προγραμματισμός και η πραγματοποίηση των λήψεων που απαιτούνταν για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων λογισμικών και αναλύεται ο τρόπος επεξεργασίας των ληφθεισών εικόνων μέσω των λογισμικών αυτών. Επίσης, περιγράφονται το θεωρητικό υπόβαθρο, τα απαιτούμενα δεδομένα και τα στάδια του αλγορίθμου απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής και διόρθωσης του πρωτεύοντος σημείου, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, για να αξιοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης στην αξιολόγηση των λογισμικών. Μετέπειτα, στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών διεργασιών για την επίτευξη της επιθυμητής αξιολόγησης. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους:

- Πρώτον, με την οπτική σύγκριση των παραγομένων, διορθωμένων εικόνων.
- Δεύτερον, με τον εντοπισμό των διαφορών των διορθωμένων εικόνων από την αρχική παραμορφωμένη εικόνα, μέσω της αφαίρεσής τους από αυτήν.
- Τρίτον, μέσω της βαθμονόμησης και σύγκρισης των καμπυλών της εναπομένουσας, στις διορθωμένες εικόνες, ακτινικής διαστροφής.
- Τέταρτον, με βάση τα αποτελέσματα (μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) σε σημεία ελέγχου) από την εφαρμογή του Προσανατολισμού ενός ζεύγους εικόνων σε Ψηφιακό Φωτογραμμετρικό Σταθμό.

Το **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζει τα συμπεράσματα που εξαγονται, σχετικά με την αξιοπιστία και εφαρμοστικότητα των εξεταζόμενων λογισμικών. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** αποδίδεται η βιβλιογραφία που μελετήθηκε και αξιοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ

Παρόλο που μια εικόνα προσφέρει πάντα ποικίλες πληροφορίες, η λήψη ακριβών και αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών στο χώρο, μέσω της προβολής του στο επίπεδο της εικόνας [1], απαιτεί τη συσχέτιση κάθε σημείου στο χώρο το οποίο αποτυπώνεται στην εικόνα, με το αντίστοιχο εικονοστοιχείο. Η σχέση μεταξύ της θέσης ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο και του αντιστοίχου του επί της εικόνας ορίζεται από το γεωμετρικό μοντέλο της φωτογραφικής απεικόνισης [2,3].

Η διαδικασία της φωτογραφικής απεικόνισης μπορεί να μοντελοποιηθεί με διάφορους τρόπους, αναλόγως με την εκάστοτε εφαρμογή για την οποία προορίζεται, σύμφωνα με την ακρίβεια και αξιοπιστία που επιβάλλεται [4,5].

Το πιο διαδεδομένο γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι το μοντέλο της «κάμερας σημειακής οπής». Το μοντέλο αυτό περιγράφει τη διαδικασία κατά την οποία οι οπτικές ακτίνες που προέρχονται από το χώρο του αντικειμένου, εισέρχονται σε ένα φωτοστεγανό κουτί μέσω μιας οπής αμελητέων διαστάσεων (π.χ. διαμέτρου 0,25mm) και προσπίπτουν στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια, σχηματίζοντας ένα αντεστραμμένο είδωλο του αντικειμένου. Βάσει αυτού, ορίζεται ότι κάθε σημείο στο χώρο, το αντίστοιχό του σημείο στην εικόνα και το οπτικό κέντρο είναι συγγραμμικά. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή αναφέρεται σε μια ιδεατή διαδικασία δημιουργίας εικόνας, και αληθεύει μόνο στην περίπτωση της «κάμερας σημειακής οπής».

2.2 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΡΟΒΟΛΗ

Αντιστοίχως με το μοντέλο «σημειακής οπής», μπορεί να θεωρηθεί ότι, τα σημεία του χώρου προβάλλονται, μέσω μιας δέσμης ακτίνων, οι οποίες διέρχονται από το προβολικό κέντρο, στο επίπεδο προβολής. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στην προοπτική προβολή, όπου η εσωτερική γεωμετρία της μηχανής είναι σταθερή και μπορούν να συμπεριληφθούν όλες οι αποκλίσεις από την συγγραμμικότητα, γραμμικές και μη. Το μοντέλο αυτό της κεντρικής προβολής ορίζεται από τη θέση του επιπέδου προβολής (προοπτικό επίπεδο), την απόσταση μεταξύ του κέντρου και του επιπέδου προβολής και τη θέση της ορθής προβολής του κέντρου πάνω στο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η προσέγγιση της γεωμετρίας της λήψης από το μοντέλο της προοπτικής απεικόνισης και συγκεκριμένα από αυτό της κεντρικής προβολής. Συνεπώς, η κεντρική προβολή ορίζεται ως το μαθηματικό μοντέλο με το οποίο προσεγγίζεται γεωμετρικά η οπτική διαδικασία δημιουργίας της εικόνας, δηλαδή ως το καλύτερο γεωμετρικό ισοδύναμο της οπτικής απεικόνισης, το οποίο επιτρέπει τη χρήση των εικόνων για μετρητικούς σκοπούς [134]. Εναλλακτικά μπορεί να διατυπωθεί ότι, η εικόνα θεωρείται ως προϊόν προοπτικής απεικόνισης και

συγκεκριμένα κεντρικής προβολής. Στο πλαίσιο αυτό αναφέρει και η Πέτσα (2000) ότι, 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.

Ωστόσο, η εφαρμογή του μοντέλου κεντρικής προβολής στη φωτογραφική απεικόνιση οφείλει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκφράζεται όσο το δυνατόν ακριβέστερα η γεωμετρία κάθε ξεχωριστής λήψης. Τροχοπέδη σε αυτή την προσπάθεια αποτελούν οι παραμορφώσεις στις οποίες υπόκεινται οι θέσεις των σημείων της ληφθείσας εικόνας, λόγω παραμόρφωσης της οπτικής δέσμης εντός κι εκτός του συστήματος μηχανής-φακού, κατά την πορεία της από το χώρο του αντικειμένου μέχρι την καταγραφή της από τον αισθητήρα. Οι παράγοντες που προκαλούν αυτές τις παραμορφώσεις είναι η καμπυλότητα της γης, η ατμοσφαιρική διάθλαση, οι διαστροφές των φακών, η δομή του αισθητήρα, το σχήμα της εικονοψηφίδας και η θέση του πρωτεύοντος σημείου. Ωστόσο, για τις σημαντικότερες παραμορφώσεις που προκαλούνται στις θέσεις των εικονοσημείων είναι αποδεδειγμένο ότι ευθύνονται η θέση του πρωτεύοντος σημείου και οι διαστροφές των φακών. Η πιο καθοριστική μάλιστα εξ αυτών (διαστροφών των φακών) είναι η λεγόμενη ακτινική διαστροφή λόγω της οποίας επιφέρεται μια μετάθεση των σημείων, κατά μήκος της ακτίνας από ή προς το κέντρο της διαστροφής, που ταυτίζεται με το πρωτεύον σημείο. Η μορφή αυτή παραμόρφωσης αποτελεί και το κεντρικό θέμα μελέτης της παρούσας εργασίας και θα αναλυθεί περισσότερο στην επόμενη ενότητα.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, καθιερώθηκε ένα σύνολο παραμέτρων, κυριότερες από τις οποίες είναι η σταθερά της μηχανής, οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου και οι τιμές της ακτινικής διαστροφής του φακού (Δr), που εκφράζουν την εσωτερική γεωμετρία του συστήματος μηχανής-φακού και αποκαλούνται παράμετροι του Εσωτερικού Προσανατολισμού του. Η διαδικασία προσδιορισμού των παραμέτρων αυτών καλείται βαθμονόμηση του συστήματος μηχανής-φακού (camera calibration) κι έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την εφαρμογή της. Εφόσον προσδιοριστούν με ακρίβεια όλες αυτές οι παράμετροι, απαιτείται έπειτα η «μετατόπιση» των μετρούμενων σημείων στις σωστές γεωμετρικές τους θέσεις πάνω στην εικόνα, ώστε η γεωμετρία της συγκεκριμένης λήψης να εκφράζεται σωστά μέσω του επιλεγμένου μοντέλου κεντρικής προβολής.

Η διαδικασία που προαναφέρθηκε για την απόκτηση της τελικής, διορθωμένης από ακτινική διαστροφή και με διορθωμένο πρωτεύον σημείο, εικόνας έχει απασχολήσει πολύ την επιστημονική κοινότητα. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση κάθε σταδίου της ξεχωριστά.

2.3 ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗ

2.3.1 Διαστροφές των Φακών

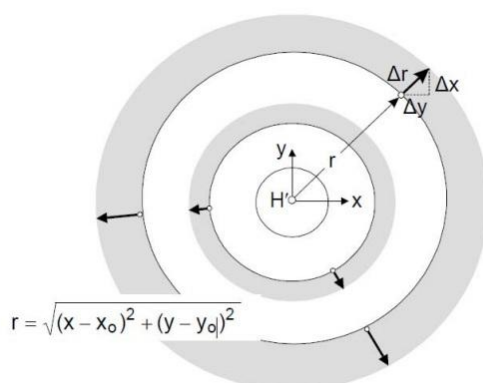
Υπάρχουν πολλοί παράγοντες υποβάθμισης της οπτικής ποιότητας και γεωμετρικής ακρίβειας της εικόνας. Στις εφαρμογές, όπου κύριο ζητούμενο είναι η ικανότητα παροχής από την εικόνα αξιόπιστης και ακριβούς γεωμετρικής πληροφορίας, όπως η περίπτωση αυτής της εργασίας, ενδιαφέρουν περισσότερο οι παράγοντες υποβάθμισης της γεωμετρικής ακρίβειας. Η σημαντικότερη παραμόρφωση λόγω των φακών που σχετίζεται με αυτό είναι η διαστροφή, λόγω της οποίας τα σημεία της

εικόνας μετατίθενται από την πραγματική τους θέση, όπως αυτή ορίζεται από την προοπτική προβολή, σε σχέση με το κέντρο της διαστροφής. Οι πιο σημαντικές διαστροφές των φακών είναι η συμμετρική ακτινική διαστροφή (radial distortion) και η ασύμμετρη έκκεντρη διαστροφή (decentring distortion). Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η επίδραση της συμμετρικής ακτινικής διαστροφής στις εικονοσυντεταγμένες των σημείων και κυρίως οι πιθανές μέθοδοι προσδιορισμού και εξάλειψής της.

2.3.2 Συμμετρική Ακτινική Διαστροφή

Αναλυτικότερα η συμμετρική ακτινική διαστροφή ή παραμόρφωση Seidel είναι ένα εγγενές πρόβλημα των φακών και οφείλεται στην εκ περιστροφής κατασκευή των στοιχείων του φακού. Τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά είναι ότι:

- Είναι μηδενική στο κέντρο της, το οποίο κατά τη μελέτη της ακτινικής διαστροφής πολλές φορές θεωρείται ότι ταυτίζεται με το πρωτεύον σημείο ή έστω και με το κέντρο της εικόνας. Η θεώρηση ταύτισης του κέντρου διαστροφής με το πρωτεύον σημείο θα υιοθετηθεί και στην παρούσα εργασία.
- Αυξάνεται ακτινικώς και μεγιστοποιείται στις τέσσερις γωνίες της εικόνας. Η ακτινική της μορφή διαφαίνεται και από το σχήμα 2.2, εξετάζοντας τα όμοια τρίγωνα, όπου αποδεικνύεται ότι η διαστροφή είναι μέγεθος συναρτώμενο με την ακτινική απόσταση.
- Προκαλεί συμμετρική ακτινική μετατόπιση των ειδώλων από ή προς τον οπτικό άξονα ή διαφορετικά μετατόπιση των σημείων της εικόνας από τις πραγματικές τους, σύμφωνα με τις επιταγές της προοπτικής γεωμετρίας, θέσεις. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 πρόκειται για μια μετάθεση κατά μήκος της ακτίνας. Ουσιαστικά, εισάγει μια μεταβολή της κλίμακας στην εικόνα, η οποία είναι ενιαία για κάθε γεωμετρικό τόπο σημείων που βρίσκονται στην ίδια ακτινική απόσταση (r) από το κέντρο της εικόνας ή το πρωτεύον σημείο ή ακριβέστερα από το κέντρο της διαστροφής, πάνω στην εικόνα. Άμεσα αντιληπτή επίδρασή της αποτελεί η απεικόνιση των ευθειών του χώρου του αντικειμένου ως καμπύλες πάνω στην εικόνα.



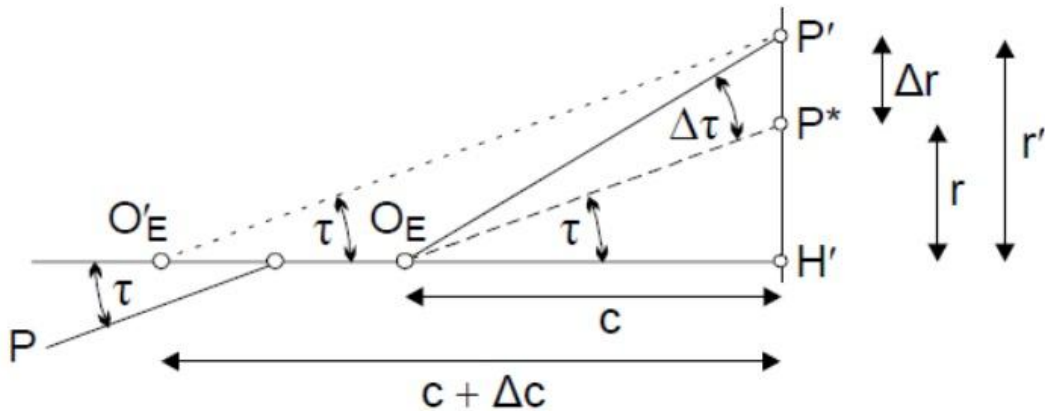
Σχήμα 2.1: Επίδραση ακτινικής διαστροφής (Πηγή: Πετσά, 2000)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 και σύμφωνα με την κεντρική προβολή θα έπρεπε το σημείο P, θεωρώντας το σε απόσταση c από τον οπτικό άξονα, να απεικονίζεται στο σημείο P* σε ακτινική απόσταση r από το πρωτεύον σημείο. Επίσης, θα έπρεπε οι

γωνίες εισόδου (τ) να είναι ίσες με τις αντίστοιχες εξόδου (τ') και η συνάρτηση της εικόνας να ορίζεται ως:

$$r = c * \tan\tau \quad (1)$$

Στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει λόγω του ότι ακόμα κι αν η διαδικασία της απεικόνισης προσεγγιστεί μέσω δύο διαδοχικών κεντρικών προβολών, τα φυσικά κέντρα της απεικόνισης (κόρη εισόδου και κόρη εξόδου) δεν συμπίπτουν με τα αντίστοιχα δεσμικά σημεία του [135]. Οπότε, οι ακτίνες εξέρχονται από το φακό με γωνία διαφορετική από την προσπίπτουσα. Για την ακρίβεια, η ακτίνα εξέρχεται με γωνία $\tau + \Delta\tau$ από τον οπτικό άξονα και συνεπώς, το σημείο P απεικονίζεται στο P' το οποίο κείται σε ακτινική απόσταση r' διαφορετική από την r . Απαιτείται, λοιπόν, η γνώση των αποκλίσεων της διαδικασίας απεικόνισης από την κεντρική προβολή.



Σχήμα 2.2: Ακτινική Διαστροφή (Πηγή: Πετσά, 2000)

Για το σκοπό αυτό, το πρόβλημα ανάγεται στο να οριστεί το μαθηματικό, εσωτερικό κέντρο προβολής O_E στο χώρο της μηχανής, τέτοιο ώστε μια σύνδεσή του με τα εικονοστοιχεία να προσεγγίζει κατά το δυνατόν καλύτερα τις διευθύνσεις των ομόλογων ακτίνων στο χώρο (σχήμα 2.2). Το σημείο αυτό δεν συμπίπτει γενικά με την κόρη εξόδου του φακού, αλλά ορίζεται έτσι ώστε να έχει κοινές εικονοσυντεταγμένες με το πρωτεύον σημείο, στο σύστημα με αρχή το κέντρο της εικόνας. Είναι ένα φανταστικό σημείο στον άξονα συμμετρίας του φακού, του οποίου ο προσδιορισμός να καθιστά δυνατή τη συγχώνευση της δέσμης στον αντικειμενικό χώρο με τα εικονοσημεία σε μια ενιαία κεντρική προβολή [6]. Χρησιμοποιείται λοιπόν το μέγεθος Δr , το οποίο εκφράζει τη συμμετρική ακτινική διαστροφή και ισούται με :

$$\Delta r = r' - c * \tan\tau = r' - r \quad (2)$$

Το μέγεθος αυτό συμπεριλαμβάνεται στις παραμέτρους του Εσωτερικού Προσανατολισμού, οπότε η συνάρτηση της εικόνας συνδυάζει την κεντρική προβολή με τις γωνίες του χώρου, τις παραμέτρους του Εσωτερικού Προσανατολισμού, την ακτινική απόσταση r και τις διορθώσεις που απαιτούνται λόγω των διαστροφών των φακών κι έχει τη μορφή:

$$r' = c * \tan\tau + \Delta r \quad (3)$$

Από τα παραπάνω φαίνεται και η σχέση της ακτινικής διαστροφής με την σταθερά της μηχανής. Ο ορισμός ενός συνδυασμού $c, \Delta r$ τέτοιου ώστε να περιγράφεται κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο η κεντρική προβολή της συγκεκριμένης λήψης αποτελεί κύριο μέλημα και βασική επιδίωξη της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Τροχοπέδη

στον υπολογισμό αυτής της συνάρτησης είναι η συσχέτιση της ακτινικής διαστολής με την σταθερά της μηχανής c . Η ακτινική διαστολή, όπως ορίστηκε παραπάνω, δεν είναι η πραγματική διαστοφή του φακού, αλλά μια μαθηματική-γεωμετρική αναπαράστασή της και γι αυτό, προσδιορίζεται σε συνάρτηση και με βάση την σταθερά της μηχανής. Όμως και η σταθερά της μηχανής c προσδιορίζεται μέσω της ακτινικής διαστολής, διότι δεν μπορεί να μετρηθεί με παρατήρηση. Άλλωστε, η σταθερά της μηχανής είναι η απόσταση του φανταστικού, εσωτερικού προβολικού κέντρου από το επίπεδο του αισθητήρα, συνεπώς αποτελεί επίσης ιδεατό μέγεθος. Είναι απλώς ένα γεωμετρικό μέγεθος με ρόλο συντελεστή κλίμακας, που επιτρέπει τη θεώρηση της κεντρικής προβολής και φυσικά διαφέρει από την εστιακή απόσταση f (φυσικό μετρήσιμο μέγεθος που εκφράζει την απόσταση του εσωτερικού κύριου σημείου του φακού από το εστιακό επίπεδο για εστίαση στο άπειρο). Γι αυτό, χρησιμοποιούνται, για τον προσδιορισμό της ακτινικής διαστολής άλλα μεγέθη, που είναι μετρήσιμα από παρατήρηση όπως η ακτινική απόσταση r και η τιμή της γωνίας τ .

Η εναλλακτική λύση είναι η ακτινική διαστολή να θεωρηθεί συνάρτηση της μεταβολής του c και να προσδιορίζεται με βάση τη γωνία των ακτίνων, ή αντιστρόφως, σύμφωνα με τις παρακάτω μορφές που παίρνει η συνάρτηση:

$$\begin{aligned} r' &= c * \tan(\tau + \Delta\tau) \\ r' &= (c + \Delta c) * \tan\tau \\ r' &= c * \tan\tau + \Delta r \end{aligned} \tag{4}$$

Έτσι, η ακτινική διαστολή μεταβάλλεται συναρτήσει του c και μάλιστα, αναζητάται μια βαθμονομημένη καμπύλη της ακτινικής διαστολής, η οποία σε συνδυασμό με το αντίστοιχο c , θα κατανέμει κατά το δυνατόν ευνοϊκότερα τις ποσότητες Δr στην εικόνα [135].

Έτσι, δημιουργείται η έννοια της «ισορροπημένης» ακτινικής διαστολής (balanced radial distortion), η οποία ορίζει μια μεταβολή της κλίμακας της εικόνας κατά μια ποσότητα Δc . Με τον τρόπο αυτό αποδεικνύεται ότι κάθε ενιαία σμίκρυνση ή μεγέθυνση της εικόνας προερχόμενη από την ακτινική διαστολή μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω μιας μεταβολής του c , κατά την κατάλληλη ποσότητα Δc [136]. Αναδεικνύεται έτσι ο αληθινός χαρακτήρας της σταθεράς της μηχανής, ως συντελεστή κλίμακας ή ακριβέστερα ως μαθηματικής σταθεράς με διαστάσεις μήκους [134]. Ως αρχική τιμή του c , για τη μετατόπιση αυτή της καμπύλης της ακτινικής διαστολής, επιλέγεται μια οποιαδήποτε, η οποία θα είναι πάντα ικανοποιητική δεδομένης της συνοδείας της από το ανάλογο μέγεθος Δc . Η νέα ακτινική διαστολή που ορίζεται, έχει τη μορφή:

$$\Delta r' = \Delta r \left(1 + \frac{\Delta c}{c} \right) - \left(\frac{\Delta c}{c} \right) r \tag{5}$$

Μέσω της παραπάνω σχέσης υπάρχει η δυνατότητα μετασχηματισμού της καμπύλης της διαστολής σε μια άλλη με συγκεκριμένες ιδιότητες και χωρίς καμία μεταβολή του φακού [135]. Τέτοιοι μετασχηματισμοί της καμπύλης διαστολής μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε αναλυτικά, είτε γραφικά [7]. Υπάρχουν περισσότερα του ενός κριτήρια ώστε οι τιμές της διαστολής να είναι κατά το δυνατόν μικρότερες σε ολόκληρο το ωφέλιμο πεδίο της εικόνας [6,8]. Οι περιορισμοί γι' αυτούς τους μετασχηματισμούς ορίζονται μέσω του Δc και συνήθως είναι οι εξής:

- Η τιμή της μετασχηματισμένης καμπύλης της διαστολής σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση r_0 να είναι μηδέν, που ορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta c = \frac{c\Delta r_0}{r_0 - \Delta r_0} \quad (6)$$

- Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της διαστροφής, σε συγκεκριμένη ακτινική απόσταση, να είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσες.
- Να μηδενίζεται ή να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των τιμών της διαστροφής μέχρι κάποια ακραία ακτινική απόσταση r_0 , μέσω της ελαχιστοποίησης της τιμής του ορισμένου ολοκληρώματος (από 0 έως r_0)

$$D = \int_0^{r_0} [\Delta r(1 + e) - er]^2 dr \quad (7)$$

Όπου $e = \frac{\Delta c}{c}$.

2.3.2.1 Μορφές ακτινικής διαστροφής

- **Πιθοειδής ή αρνητική διαστροφή (Barrel radial distortion)**

Αυτή η μορφή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της οπτικής μεγέθυνσης κατά την αύξηση της απόστασης από τον οπτικό άξονα (το κέντρο της διαστροφής ή το πρωτεύον σημείο ή το κέντρο της εικόνας). Ονομάζεται «πιθοειδής ή barrel» διότι η εικόνα παίρνει βαρελοειδές (barrel) σχήμα. Ακραία περίπτωση τέτοιας διαστροφής απαντάται στους υπερευρυγώνιους (fish-eye) φακούς ή σε φακούς με δυνατότητα εστίασης, όταν χρησιμοποιείται η ελάχιστη δυνατή εστιακή απόσταση.

- **Μηνοειδής ή θετική διαστροφή (Pincushion radial distortion)**

Πρόκειται για την αντίθετη περίπτωση από την προηγούμενη. Το μέγεθος της μεγέθυνσης της εικόνας αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο της διαστροφής (ή το πρωτεύον σημείο ή το κέντρο της εικόνας). Το σχήμα της εικόνας γίνεται μηνοειδές ή μηνισκοειδές εξ ου και η ονομασία «μηνοειδής». Την ονομασία «pincushion» έχει λάβει λόγω της ομοιότητας του σχήματος της εικόνας με αυτό του μαξιλαριού με καρφίτσες. Τυπική κατηγορία φακών που σχετίζονται με αυτό το είδος παραμόρφωσης είναι συνήθως οι χαμηλού κόστους τηλεφακοί (telephoto lenses) [9].

- **Μουστάκι (Moustache distortion)**

Ως τρίτη μορφή ακτινικής διαστροφής μπορεί να θεωρηθεί ο συνδυασμός των δύο ανωτέρω. Η μορφή αυτή ξεκινά ως πιθοειδής κοντά στο κέντρο διαστροφής (ή το πρωτεύον σημείο ή κέντρο της εικόνας) και σταδιακά μεταλλάσσεται σε μηνοειδή προς την περιφέρεια της εικόνας. Ονομάζεται «μουστάκι» επειδή το σχήμα της εικόνας μοιάζει με μουστάκι.

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗΣ

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί πολλές μαθηματικές σχέσεις για τη μοντελοποίηση της ακτινικής διαστροφής σε μια προσπάθεια προσδιορισμού και διόρθωσής της. Τα μοντέλα που θα εξεταστούν στη συνέχεια αφορούν κυρίως στη μεμονωμένη διόρθωση της ακτινικής διαστροφής αλλά ενίοτε και σε άλλες παραμορφώσεις που προκαλεί το σύστημα μηχανής-φακού. Η μαθηματική μορφή των διαφόρων μοντέλων

ακτινικής διαστροφής ποικίλλει από πολυώνυμα και μαθηματικές εκφράσεις που εμπριέχουν τριγωνομετρικές σχέσεις έως και κλασματικές, ρητές ή λογαριθμικές εξισώσεις. Όλα αυτά τα μοντέλα διαφέρουν μεταξύ τους λόγω του τρόπου με τον οποίο αντιμετωπίζουν τη γεωμετρία λήψης αλλά και των πρόσθετων παραμέτρων (φυσικών ή ενδιάμεσων) που ορίζουν για τη μοντελοποίηση της ακτινικής διαστροφής και εν γένει των εκάστοτε παραμορφώσεων που εκφράζουν. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων αποτελεί κείριο ζήτημα καθώς η χρήση ακατάλληλων πρόσθετων παραμέτρων μπορεί να αποδυναμώσει την επίλυση της συνόρθωσης δέσμης οδηγώντας σε υπερπαραμετροποίηση, ιδίως στην περίπτωση των συνορθώσεων με ελάχιστες δεσμεύσεις [10-14].

2.4.1 Πολυωνυμικά Μοντέλα

Τα πολυωνυμικά μοντέλα, όπως φανερώνει και το όνομα τους, είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις που έχουν αναπτυχθεί για να εκφράσουν την ακτινική διαστροφή ή και άλλα είδη παραμορφώσεων όπως αυτές επιφέρονται σε μια εικόνα από το σύστημα μηχανής-φακού. Μεταβλητή αυτών των μοντέλων αποτελεί η ακτινική απόσταση των εικονοστοιχείων από το κέντρο διαστροφής, το πρωτεύον σημείο ή το κέντρο της εικόνας, ανάλογα με την εφαρμογή και τις υποθέσεις κάθε περίπτωσης. Ακόμη, οι πρόσθετες παράμετροι που επιστρατεύονται για την έκφραση των παραμορφώσεων, ανάλογα με την περίπτωση, έχουν φυσική σημασία ή όχι [13]. Μειονέκτημα τους αποτελεί το δεδομένο ότι αποτελούνται από σχέσεις που αδυνατούν να αντιστραφούν με αναλυτική μέθοδο ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων, απαιτώντας για το σκοπό αυτό κάποια μη γραμμική προσεγγιστική διαδικασία. Συνιστούν, παρ' όλα αυτά, την πιο διαδεδομένη μορφή μοντέλων ακτινικής διαστροφής, δεδομένης της ευελιξίας τους. Μάλιστα, σύμφωνα με το θεώρημα του Weierstrass, κάθε συνεχής συνάρτηση δύναται να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια από ένα πολυώνυμο επαρκούς βαθμού.

Διαχωρίζονται σε κατηγορίες όπως περιπτών δυνάμεων, αρτίων δυνάμεων και ακεραίων (περιπτών και αρτίων) δυνάμεων. Σαφώς, στο πλαίσιο κυρίως των περιπτής τάξης πολυωνύμων, υπάρχουν επεκτάσεις αυτών για τη μοντελοποίηση μεγαλύτερου εύρους παραμορφώσεων στην εικόνα.

2.4.1.1 Πολυώνυμα περιπτών δυνάμεων

Το πιο κοινό μοντέλο παραμορφώσεων λόγω ακτινικής διαστροφής είναι το φυσικό μοντέλο των 8 όρων που διατυπώθηκε από τον Brown [8,15-17], το οποίο αποτελεί μια επέκταση του μοντέλου του Conrady [18]. Έτσι, το βασικό μαθηματικό μοντέλο παρέχεται από τις μη γραμμικές εξισώσεις συγγραμμικότητας, εμπλουτισμένες με διορθωτικούς όρους (π.χ. πρόσθετες παραμέτρους) για τον Εσωτερικό Προσανατολισμό και την ακτινική και έκκεντρη διαστροφή των φακών [19-21] προκειμένου να αντισταθμιστούν τα σφάλματα των φωτογραφικών μηχανών. Μάλιστα, στην εφαρμογή του από τον Brown, χρησιμοποιείται η τεχνική της συνόρθωσης δέσμης, διότι δίνει τη δυνατότητα ταυτόχρονου υπολογισμού όλων των παραμέτρων του συστήματος, καθώς και της ακρίβειας και αξιοπιστίας των παραμέτρων βαθμονόμησης [4]. Επίσης, μέσω αυτής μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και οι ενδεχόμενες συσχετίσεις ανάμεσα στις παραμέτρους του Εσωτερικού και του Εξωτερικού Προσανατολισμού καθώς και τις προσδιοριζόμενες γεωδαιτικές συντεταγμένες [137]. Για την ακρίβεια, στο μοντέλο αυτό, η ακτινική διαστροφή Δr γενικώς εκφράζεται μέσω του περιπτής τάξης πολυωνύμου

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots \quad (8)$$

όπου, r είναι η ακτινική απόσταση των παραμορφωμένων συντεταγμένων από το πρωτεύον σημείο της εικόνας. Οι συντελεστές K_i έχουν συνήθως υψηλό βαθμό συσχέτισης, με το μεγαλύτερο μέρος του σφάλματος να περιγράφεται από τον κυβικό όρο $K_1 r^3$. Οι K_2 και K_3 συμπεριλαμβάνονται τυπικά για φωτογραμμετρικούς και ευρυγώνιους φακούς καθώς και για υψηλότερης ακρίβειας μετρήσεις σε εφαρμογές μετρολογίας, ενώ η χρήση περισσότερων παραμέτρων δεν θεωρείται συνήθως απαραίτητη. Το παραπάνω μοντέλο έχει εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος ερευνών [12,14,22-24].

Για την ακρίβεια η πλειονότητα των μελετών που αξιοποιούν το παραπάνω μοντέλο περιορίζονται στη χρήση των παραμέτρων K_1 και K_2 [25-32], ενώ φτωχή είναι η βιβλιογραφία που χρησιμοποιεί είτε μόνο την παράμετρο K_1 [33-35], είτε έως και την K_3 [36] ή και περισσότερες παραμέτρους [28]. Στην τελευταία περίπτωση ωστόσο, προκύπτει αριθμητική αστάθεια και αδυναμία αναλυτικής αντιστροφής της εξίσωσης λόγω του πολύ υψηλού βαθμού του πολυωνύμου. Ενώ, ακόμα και για την περίπτωση χρήσης των παραμέτρων K_1 και K_2 , η αντιστροφή του γίνεται με προσεγγιστική διαδικασία [26].

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες μελέτες [25,31] το μοντέλο της ακτινικής διαστροφής δεν χρησιμοποιείται στο στάδιο προσδιορισμού των παραμέτρων της ακτινικής διαστροφής, αλλά μόνο κατόπιν αυτού, κατά τη διαδικασία διόρθωσης των εικονοσυντεταγμένων και επανασύστασης της εικόνας. Για το λόγο αυτό προσδιορίζεται εξ αρχής μια αντίστροφη μορφή της εξίσωσης του παραπάνω μοντέλου. Συνήθως, γίνεται η απλουστευτική υπόθεση ότι η ακτινική απόσταση των σημείων, βάσει της οποίας ορίζεται η ακτινική διαστροφή, μπορεί να παρατηρηθεί, χωρίς επιπτώσεις στην ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος, στη διορθωμένη εικόνα [25,28,31]. Με τον τρόπο αυτό, παρακάμπτεται η οποιαδήποτε διαδικασία προσέγγισης ή αντιστροφής της συνάρτησης που χρησιμοποιείται, μια διαδικασία χρονοβόρα και ιδιαίτερως επίφοβη για σφάλματα. Αυτό φυσικά έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου υπολογισμού αλλά και την μη μείωση της ακρίβειας.

Τέλος, στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει η επισήμανση ότι στις περισσότερες έρευνες όντως υιοθετείται η θεώρηση του Brown ότι το κέντρο της διαστροφής συμπίπτει με το πρωτεύον σημείο. Ωστόσο υπάρχουν και αυτές στις οποίες αυτή η υπόθεση θεωρείται απλουστευτική και μη ρεαλιστική σε σχέση με την απαιτούμενη ακρίβεια, οπότε υπολογίζεται ξεχωριστά τα κέντρο της διαστροφής [33,36]. Απαντώνται, σαφώς, και περιπτώσεις όπου γίνεται μια ακόμα πιο απλουστευτική υπόθεση, θεωρώντας ότι το κέντρο της διαστροφής ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας [25,30].

- **Επεκτεταμένα πολυώνυμα περιττών δυνάμεων «κανονικοποιημένης» ακτινικής διαστροφής**

Η ακτινική διαστροφή (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 [134]. Η μεταβολή αυτή της κλίμακας όμως μπορεί να εκφράζεται είτε μέσω της σταθεράς της μηχανής, είτε μέσω ενός επιπλέον συντελεστή (K_0) στο μοντέλο του Brown, οπότε αυτό έχει τη μορφή:

$$\Delta r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + \dots \quad (9)$$

Για κάθε φακό υπάρχει μια συνάρτηση αυτής της μορφής για κάθε τιμή του c κι επίσης υπάρχει πάντα μια πραγματική σταθερά c για την οποία ισχύει ότι $K_0=0$. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται μόνο αν το c είναι από την αρχή γνωστό, ενώ αν δεν είναι και πρέπει να προσδιοριστεί ταυτόχρονα με τη διαστροφή, πρέπει να επιβληθεί $K_0=0$, οπότε και ισοδυναμεί με το κλασικό μοντέλο του Brown που αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο, και οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν σε ταυτόσημα αποτελέσματα αφού είναι προβολικά ισοδύναμες [135].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής αυτού του μοντέλου αποτελούν τα μοντέλα της ISPRS και της USGS. Αναλυτικότερα, η United States Geological Survey (USGS) χρησιμοποιεί το μοντέλο «κανονικοποιημένης» ακτινικής διαστροφής του Brown, λαμβάνοντας υπόψη τους όρους K_0, K_1, K_2 και K_3 , δηλαδή κατοχυρώνει το 7^{ου} βαθμού πολυωνυμικό μοντέλο

$$\Delta r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (10)$$

Αντιθέτως, η International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) υιοθετεί το μοντέλο:

$$\Delta r = K_1 r(r^2 - r_0^2) + K_2 r(r^4 - r_0^4) + K_3 r(r^6 - r_0^6) \quad (11)$$

Το μοντέλο όμως αυτό μπορεί επίσης να προκύψει από το μοντέλο της USGS, με την υπόθεση ότι $-K_0 = r_0^2(K_1 + K_2 r_0^2)$.

- **Επεκτεταμένα πολυώνυμα περιπτώσεων δυνάμεων για παραπάνω παραμορφώσεις**

Στην βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα με βάση αυτό του Brown αλλά τα οποία έχουν εισαγάγει και κάποιες πρόσθετες παραμέτρους με σκοπό τη μοντελοποίηση μεγαλύτερου εύρους παραμορφώσεων του συστήματος μηχανής-φακού [20,37,38].

Αρχικώς, πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο του Brown προβλέπει και τη μοντελοποίηση της έκκεντρης διαστροφής. Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί για τη μοντελοποίηση της έκκεντρης διαστροφής (Δt) είναι οι P_1, P_2 και P_3 κι έτσι το ολοκληρωμένο μοντέλο διόρθωσης για τις δύο συντεταγμένες κάθε σημείου είναι:

$$\begin{aligned} \Delta P_x &= [P_1(r_d^2 + 2(x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0)][1 + P_3 r_d^2 + \dots] \\ \Delta P_y &= [2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2(r_d^2 + 2(y - y_0)^2)][1 + P_3 r_d^2 + \dots] \end{aligned} \quad (12)$$

Συνήθως, αξιοποιούνται μόνο οι παράμετροι P_1, P_2 [39]. Στην ολοκληρωμένη του μορφή λοιπόν το μοντέλο διόρθωσης των εικονοσυντεταγμένων των σημείων λόγω ακτινικής και έκκεντρης διαστροφής του Brown έχει τη μορφή [15,18]:

$$\begin{aligned} x_u &= x + (x - x_0)(K_1 r_d^2 + K_2 r_d^4 + K_3 r_d^6 + \dots) \\ &\quad + [P_1(r_d^2 + 2(x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0)][1 + P_3 r_d^2 + \dots] \\ y_u &= y + (y - y_0)(K_1 r_d^2 + K_2 r_d^4 + K_3 r_d^6 + \dots) \\ &\quad + [2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2(r_d^2 + 2(y - y_0)^2)][1 + P_3 r_d^2 + \dots] \end{aligned} \quad (13)$$

όπου $r_d = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ είναι η ακτινική απόσταση των σημείων πάνω στην παραμορφωμένη εικόνα και (x_0, y_0) οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου. Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω επέκτασης του παραπάνω μοντέλου ώστε να περιλαμβάνει και άλλα είδη παραμορφώσεων (εκτός

από την ακτινική και την έκκεντρη), όπως αυτές που σχετίζονται με το μέγεθος και το σχήμα του εικονοστοιχείου, τη διαφορετική κλίμακα κατά x και y και την μη καθετότητα των αξόνων (αφινικές παραμορφώσεις) του συστήματος CCD των αισθητήρων (in-plane distortion), αλλά και την απόκλιση του αισθητήρα από την επιπεδότητα (out-of-plane distortion) [40,136].

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μελετών είναι των El-Hakim, Fraser, Shortis & Ganci, Ebner, Grün και Legendre. Το απλούστερης μορφής μοντέλο από αυτά είναι αυτό των δύο παραμέτρων C_1, C_2 [40,41] με σκοπό τον προσδιορισμό των αφινικών παραμορφώσεων. Οι διορθώσεις των δύο διαστάσεων x,y στην ολοκληρωμένη τους μορφή είναι:

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= x(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6) + B_1(r^2 + 2x^2) + 2B_2 xy + C_1 x + C_2 y \\ \Delta y_u &= y(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6) + B_2(r^2 + 2y^2) + 2B_1 xy\end{aligned}\quad (14)$$

Αξιοπρόσεκτο σε αυτό το μοντέλο είναι κατ' αρχάς το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις μοντελοποιούνται μόνο κατά τη διεύθυνση x και κατά δεύτερον ότι οι παραμορφώσεις λόγω μη επιπεδότητας της επιφάνειας του αισθητήρα θεωρούνται αμελητέες και δεν λαμβάνονται υπόψη.

Σπουδαιότερα ως μοντέλα τέτοιου τύπου ωστόσο θεωρούνται τα μοντέλα των Ebner, Grün και Legendre. Συγκεκριμένα το μοντέλο του Ebner αναπτύχθηκε το 1976 [42] και αποτελείται από ένα δευτέρου βαθμού πολυώνυμο δύο μεταβλητών και 12 πρόσθετων παραμέτρων όπως φαίνεται παρακάτω

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= G_1 x + G_2 y - G_3 2x^2 + G_4 xy + G_5 y^2 + G_7 xy^2 + G_9 yx^2 + G_{11} x^2 y^2 \\ \Delta y_u &= -G_1 y + G_2 x - G_4 2y^2 + G_3 xy + G_6 x^2 + G_8 yx^2 + G_{10} xy^2 + G_{12} x^2 y^2\end{aligned}\quad (15)$$

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε, από τον Grün το 1978 [43], το τετάρτου βαθμού πολυώνυμο, δύο μεταβλητών και σαράντα τεσσάρων παραμέτρων:

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= G_1 x + G_2 y + G_3 xy + G_4 y^2 - G_6 \left(\frac{10}{7}\right) x^2 + G_7 x^3 + G_8 yx^2 + G_9 xy^2 \\ &\quad + G_{10} y^3 + G_{15} x^4 + G_{16} x^3 y + G_{17} x^2 y^2 + G_{18} xy^3 + G_{19} y^4 \\ &\quad + G_{25} yx^4 + G_{26} x^3 y^2 + G_{27} x^2 y^3 + G_{28} xy^4 + G_{33} x^4 y^2 \\ &\quad + G_{34} x^3 y^3 + G_{35} x^2 y^4 + G_{39} x^4 y^3 + G_{40} x^3 y^4 + G_{43} x^4 y^4 \\ \Delta y_u &= -G_1 y + G_2 x - G_3 \left(\frac{10}{7}\right) y^2 + G_5 x^2 + G_6 xy + G_{11} x^3 + G_{12} yx^2 + G_{13} xy^2 \\ &\quad + G_{14} y^3 + G_{20} x^4 + G_{21} x^3 y + G_{22} x^2 y^2 + G_{23} xy^3 + G_{24} y^4 \\ &\quad + G_{29} yx^4 + G_{30} x^3 y^2 + G_{31} x^2 y^3 + G_{32} xy^4 + G_{36} x^4 y^2 \\ &\quad + G_{37} x^3 y^3 + G_{38} x^2 y^4 + G_{41} x^4 y^3 + G_{42} x^3 y^4 + G_{44} x^4 y^4\end{aligned}\quad (16)$$

Συνδυάζοντας το μοντέλο του Brown με τις πρόσθετες παραμέτρους των Ebner και Grün προκύπτουν δύο νέα μοντέλα (εξισώσεις 17,18) τα οποία συμπεριλαμβάνουν και τις παραμορφωμένες συντεταγμένες επί της εικόνας. Τα μοντέλα αυτά έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= x(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6) + B_1(r^2 + 2x^2) + 2B_2 xy + G_1 x + G_2 y - G_3 2x^2 \\ &\quad + G_4 xy + G_5 y^2 + G_7 xy^2 + G_9 yx^2 + G_{11} x^2 y^2 \\ \Delta y_u &= y(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6) + B_2(r^2 + 2y^2) + 2B_1 xy - G_1 y + G_2 x - G_4 2y^2 \\ &\quad + G_3 xy + G_6 x^2 + G_8 yx^2 + G_{10} xy^2 + G_{12} x^2 y^2\end{aligned}\quad (17)$$

$$\begin{aligned}
\Delta x_u &= x(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6) + B_1(r^2 + 2x^2) + 2B_2 xy + G_1 x + G_2 y + G_3 xy + G_4 y^2 \\
&\quad - G_6 \left(\frac{10}{7}\right) x^2 + G_7 x^3 + G_8 y x^2 + G_9 x y^2 + G_{10} y^3 + G_{15} x^4 + G_{16} x^3 y \\
&\quad + G_{17} x^2 y^2 + G_{18} x y^3 + G_{19} y^4 + G_{25} y x^4 + G_{26} x^3 y^2 + G_{27} x^2 y^3 \\
&\quad + G_{28} x y^4 + G_{33} x^4 y^2 + G_{34} x^3 y^3 + G_{35} x^2 y^4 + G_{39} x^4 y^3 + G_{40} x^3 y^4 \\
&\quad + G_{43} x^4 y^4 \\
\Delta y_u &= y(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6) + B_2(r^2 + 2y^2) + 2B_1 xy - G_1 y + G_2 x - G_3 \left(\frac{10}{7}\right) y^2 \\
&\quad + G_5 x^2 + G_6 xy + G_{11} x^3 + G_{12} y x^2 + G_{13} x y^2 + G_{14} y^3 + G_{20} x^4 \\
&\quad + G_{21} x^3 y + G_{22} x^2 y^2 + G_{23} x y^3 + G_{24} y^4 + G_{29} y x^4 + G_{30} x^3 y^2 \\
&\quad + G_{31} x^2 y^3 + G_{32} x y^4 + G_{36} x^4 y^2 + G_{37} x^3 y^3 + G_{38} x^2 y^4 + G_{41} x^4 y^3 \\
&\quad + G_{42} x^3 y^4 + G_{44} x^4 y^4
\end{aligned} \tag{18}$$

Στην πορεία αναπτύχθηκε το μοντέλο του Legendre, του οποίου οι παράμετροι σύμφωνα με τον Tang [44] μπορούν να θεωρηθούν μια γενίκευση των πρόσθετων παραμέτρων των Ebner και Grun [38]. Οι συναρτήσεις που εκφράζουν τις παραμορφώσεις της μηχανής σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ορίζονται με σχέσεις πολυωνυμικής μορφής, πέμπτου βαθμού, εμπεριέχουν 66 πρόσθετες παραμέτρους και είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
\Delta x_u &= \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^5 a_{m,n} p_{m,n} + \sum_{m=1}^5 a_{m,0} p_{m,0} + \sum_{n=1}^5 a_{0,n} p_{0,n} \\
\Delta y_u &= a_{0,1} p_{1,0} - a_{1,0} p_{0,1} - a_{2,0} p_{1,1} - a_{1,1} p_{0,2} + \sum_{n=3}^5 a'_{0,n} p_{0,n} + \sum_{n=2}^5 a'_{1,n} p_{1,n} + \sum_{m=2}^5 \sum_{n=0}^5 a'_{m,n} p_{m,n}
\end{aligned} \tag{19}$$

Αντί αυτού του μοντέλου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτό του Chebyshev, όπως αυτό περιγράφεται από τους Abraham and Förstner το 1997 [45].

2.4.1.2 Πολυώνυμα αρτίων δυνάμεων

Εναλλακτικά, η μοντελοποίηση της ακτινικής διαστροφής έχει γίνει και μέσω πολυωνύμων αρτίων δυνάμεων. Ωστόσο η εφαρμογή τέτοιων μοντέλων είναι περιορισμένη. Μοναδική αξιοσημείωτη περίπτωση ικανοποιητικής ακρίβειας και αποδεκτής πολυπλοκότητας είναι η ανάπτυξη σειράς κατά τον Taylor, η οποία αποτελεί πολυώνυμο τετάρτου βαθμού και συμπεριλαμβάνει τρεις πρόσθετες παραμέτρους (K_0, K_1, K_2) για την αντιπροσωπώπευση της ακτινικής διαστροφής. Το μοντέλο αυτό υιοθετήθηκε από τους Flores et al. [46] και είναι όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\Delta r = K_0 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots \tag{20}$$

όπου κέντρο της διαστροφής θεωρείται το κέντρο της εικόνας

2.4.1.3 Πολυώνυμα ακεραίων δυνάμεων

Αντιστοίχως με τα ανωτέρω είδη πολυωνύμων έχουν δημιουργηθεί και άλλα μοντέλα πολυωνυμικού τύπου διαφόρων δυνάμεων. Για παράδειγμα το πολυωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού με δύο πρόσθετες παραμέτρους για την ακτινική διαστροφή του Hugemann [47]:

$$f(r) = 1 + K_1 r + K_2 r^2 + \dots \quad (21)$$

Για το παραπάνω μοντέλο, οι διορθωμένες από ακτινική διαστροφή εικονοσυντεταγμένες των σημείων προσδιορίζονται με βάση την εξίσωση $r_u = r_d * f(r_d)$. Ωστόσο, όπως συνέβη και σε κάποιες εφαρμογές του μοντέλου του Brown, χρησιμοποιείται συνήθως η αντίστροφη σχέση $r_d = r_u * f(r_u)$ έχοντας κάνει τη θεώρηση ότι η ακτινική διαστροφή μπορεί να υπολογιστεί, με ανεκτό σφάλμα, μέσω των ακτινικών αποστάσεων των γεωμετρικά διορθωμένων σημείων (ακτινική απόσταση στη διορθωμένη εικόνα) [28]. Η τακτική αυτή βρίσκει εφαρμογή με την συνάρτηση της ακτινικής διαστροφής να έχει ως εξής [48] :

$$r_d = r_u * f(r_u) = r_u * (1 + K_1 r_u + K_2 r_u^2 + K_3 r_u^3 + \dots) \quad (22)$$

Τη σχέση αυτή χρησιμοποιούν και οι Ma et.al [28] αλλά περιορίζοντας την έως το συντελεστή K_2 ώστε να είναι πιο εύκολα αντιστρέψιμο:

$$r_d = r_u * f(r_u) = r_u * (1 + K_1 r_u + K_2 r_u^2 + \dots) \quad (23)$$

- **Επεκτεταμένα πολυώνυμα ακεραίων δυνάμεων «κανονικοποιημένης» ακτινικής διαστροφής**

Μοναδικό αξιοσημείωτο παράδειγμα πολυωνύμου ακεραίων δυνάμεων με χρήση ισορροπημένης διαστροφής είναι το πολυώνυμο των Hartley και Zisserman [49], στο οποίο θεωρείται ότι το κέντρο διαστροφής ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας

$$\Delta r = K_0 + K_1 r + K_2 r^2 + K_3 r^3 + \dots \quad (24)$$

Κατά τη χρήση αυτού του μοντέλου θεωρείται και πάλι ότι η ακτινική διαστροφή μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της ακτινικής απόστασης των εικονοστοιχείων της διορθωμένης εικόνας.

2.4.2 Μοντέλα Κλασματικών Εξισώσεων (Division Model)

Κατά την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την ενασχόληση του τομέα Όρασης Υπολογιστών με τη γεωμετρική διόρθωση της εικόνας, έγιναν μελέτες με συσκευές λήψης εικόνων που χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη ακτινική διαστροφή ή και άλλες μη γραμμικές παραμορφώσεις (μη μετρητικές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, ευρυγώνιοι φακοί, fish-eye φακοί, ενδοσκοπία [50], καταδιοπτρικά συστήματα [29] κ.ά.). Στο πρόβλημα αυτό, όμως, τα πολυωνυμικά μοντέλα αποδείχθηκαν ανεπαρκή [33,51]. Η ανεπάρκεια τους έγκειται όχι στην αδυναμία τους να εκφράσουν μεγάλη ακτινική διαστροφή αλλά στο ότι προσφέρουν πολύ πολύπλοκα μοντέλα μεγάλης τάξης, γεγονός που τα καθιστά και μη αντιστρέψιμα με αναλυτικό τρόπο. Η λύση βρέθηκε μέσω μοντέλων κλασματικής μορφής (Division Model), με πολυώνυμο στον παρονομαστή του κλάσματος και σε κάποιες περιπτώσεις και στον αριθμητή. Να σημειωθεί ωστόσο, ότι τα πολυώνυμα που περιέχονται στις κλασματικές σχέσεις είναι πολύ μικρής τάξης, ενώ κάποια από αυτά τα μοντέλα έχουν προκύψει μέσω προσεγγίσεων αντιστροφής πολυωνυμικών μοντέλων ακτινικής διαστροφής.

Το συνηθέστερο κλασματικό μοντέλο είναι αυτό του Fitzgibbon [52], το οποίο αναπτύχθηκε με σκοπό τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις ομογενών συντεταγμένων, σύμφωνα με τις επιταγές της επιπολικής γεωμετρίας. Απαρτίζεται από ένα κλάσμα με παρονομαστή ένα άρτιο πολυώνυμο, που είναι συνάρτηση της

ακτινικής απόστασης των παραμορφωμένων σημείων από το κέντρο της εικόνας και φαίνεται παρακάτω:

$$r_u = \frac{r_d}{1 + K_1 r_d^2 + K_2 r_d^4 + \dots} \quad (25)$$

Στην πλειονότητα των μελετών που έχουν διεξαχθεί, έχει θεωρηθεί ότι αρκεί μια μόνο πρόσθετη παράμετρος για τη μοντελοποίηση της ακτινικής διαστολής από το μοντέλο του Fitzgibbon [29,50,52]. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε και σε άλλες μελέτες [31,34] αλλά αντεστραμένο. Έτσι, η ακτινική διαστολή προσδιορίζεται μέσω των ιδανικών εικονοσυντεταγμένων, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η οποιαδήποτε προσεγγιστική διαδικασία και συνεπώς, να μειώνεται το υπολογιστικό βάρος. Στις μελέτες αυτές έχει τη μορφή :

$$r_d = \frac{r_u}{1 + K_1 r_u^2 + K_2 r_u^4} \quad (26)$$

Το μοντέλο του Fitzgibbon στην περίπτωση δύο παραμέτρων για την ακτινική διαστολή, καθιερώθηκε από τους Bräuer-Burchardt και Voss [53] και εφαρμόστηκε από τους ίδιους σε πολλές έρευνες [54,55]. Επίσης, οι Mallon και Whelan το 2004 [27] δημιούργησαν ένα κλασματικό μοντέλο αντιστρέφοντας ένα πολυωνυμικό μοντέλο. Προέκυψε το παρακάτω μοντέλο

$$\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \left(\frac{K_1 r_d^2 + K_2 r_d^4 + K_1^2 r_d^4 + K_2^2 r_d^8 + 2K_1 K_2 r_d^6}{1 + 4K_1 r_d^2 + 6K_2 r_d^4} \right) \quad (27)$$

το οποίο ισοδυναμεί με το κλασματικό μοντέλο του Heikkila [26], το οποίο βέβαια είχε προκύψει ως προσέγγιση αντιστροφής του πολυωνυμικού μοντέλου του Melen [56]. Τέλος, οι Ma et al. [28] όρισαν ένα κλασματικό μοντέλο το οποίο, έχει πολυώνυμο σε αριθμητή και παρονομαστή, αλλά και αυτό είναι συνάρτηση των ιδανικών εικονοσυντεταγμένων.

$$\Delta r = \frac{1 + K_1 r_u + K_2 r_u^2}{1 + K_3 r_u + K_4 r_u^2 + K_5 r_u^3} \quad (28)$$

2.4.3 Μοντέλα με Λογαριθμικές και Τριγωνομετρικές Σχέσεις

Η ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια στις περιπτώσεις μεγάλης ακτινικής διαστολής ή και άλλων μη γραμμικών παραμορφώσεων, οδήγησε στον ορισμό και άλλων μοντέλων εκτός των κλασματικών που προαναφέρθηκαν. Έτσι, προτάθηκαν μοντέλα ως συνάρτηση όχι μόνο της ακτινικής απόστασης αλλά και άλλων μεταβλητών, γεγονός που οδήγησε στη χρήση πιο σύνθετων μαθηματικών συναρτήσεων. Και σε αυτά τα μοντέλα ήταν απαραίτητη η χρήση πρόσθετων παραμέτρων για την ακτινική διαστολή, οι οποίες μάλιστα επιλέγονται μη φυσικές.

Αρχικά, μελετήθηκαν μοντέλα βάσει των πολικών συντεταγμένων των σημείων της εικόνας. Το 1995 έγινε μια μελέτη σχετικά με τους ευρυγώνιους φακούς από τους Basu και Licardie [57] και το 1999 σχετικά με ψηφιακά ενδοσκόπια από τους Arasi, Kumar και Radhakrishnan [58]. Θεωρήθηκε ότι ένας τυπικός φακός ενδοσκοπίου είναι κυκλικά συμμετρικός [58,59], μετατρέποντας έτσι το πρόβλημα της διαστολής από δύο διαστάσεων (2-D) σε μιας (1-D). Ως μεταβλητές του συγκεκριμένου μοντέλου, για τον ορισμό της ακτινικής διαστολής, καθορίστηκαν αρχικά το μέγεθος του διανύσματος P_d με αρχή το κέντρο της διαστολής και πέρας το κάθε σημείο της

παραμορφωμένης εικόνας (ακτινική απόσταση), καθώς και η γωνία (θ_d), όπως αυτή σχηματίζεται από το ανωτέρω διάνυσμα και τον οριζόντιο άξονα των x . Οι μεταβλητές αυτές αναλύονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \rho_d &= \sqrt{(x_d - x_{0d})^2 + (y_d - y_{0d})^2} \\ \theta_d &= \tan^{-1} \left(\frac{y_d - y_{0d}}{x_d - x_{0d}} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

όπου (x_{0d}, y_{0d}) είναι το κέντρο διαστροφής στην παραμορφωμένη εικόνα, δηλαδή το σημείο από το οποίο, όποια ακτίνα της προβολής κι αν διέρχεται απεικονίζεται στην εικόνα ως ευθεία. Αντιστοίχως με το παραπάνω διάνυσμα ορίστηκε και το διάνυσμα P_u στη διορθωμένη εικόνα, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \rho_u &= \sqrt{(x_u - x_{0u})^2 + (y_u - y_{0u})^2} \\ \theta_u &= \tan^{-1} \left(\frac{y_u - y_{0u}}{x_u - x_{0u}} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

όπου (x_{0u}, y_{0u}) είναι το διορθωμένο κέντρο της νέας εικόνας γύρω από το οποίο αν επεκταθεί η παραμορφωμένη εικόνα, δίνει μια τελικώς διορθωμένη εικόνα. Εφόσον η διαστροφή θεωρήθηκε αμιγώς ακτινική, προέκυπτε ότι οι γωνίες θ_u, θ_d θα είναι ίσες. Με το δεδομένο αυτό και θεωρώντας κάποιες πρόσθετες παραμέτρους ορίστηκε η σχέση μεταξύ των μεγεθών των δύο διανυσμάτων από την επόμενη εξίσωση:

$$\rho_u = \sum_{n=1}^N a_n \rho_d^n \quad (31)$$

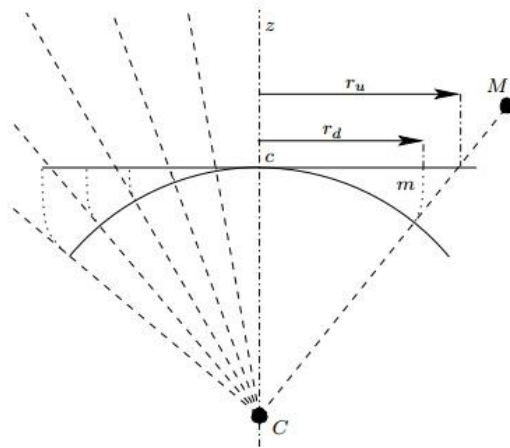
Τελικά, και βάσει των παραπάνω, το προτεινόμενο μοντέλο για τη διόρθωση των εικονοσυντεταγμένων είναι συνάρτηση του μεγέθους του διανύσματος P_u στη διορθωμένη εικόνα και της γωνίας θ_d και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} x_u &= x_{0u} + \rho_u \cos \theta_d \\ y_u &= y_{0u} + \rho_u \sin \theta_d \end{aligned} \quad (32)$$

Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε ένα ακόμα μοντέλο από τους Basu και Licardie το οποίο όμως διέφερε από το προηγούμενο, διότι το μέγεθος του προσδιοριζόμενου διανύσματος δεν οριζόταν μέσω πολυωνύμου αλλά μέσω της παρακάτω λογαριθμικής σχέσης

$$\rho = s \log(1 + kr) \quad (33)$$

όπου, s είναι ένας απλός συντελεστής κλίμακας και k η μοναδική παράμετρος της διαστροφής. Το μοντέλο αυτό είναι γνωστό ως FET (Fish-Eye Transformation), αποτελεί μια απλοποιημένη μορφή του μοντέλου του Schwartz [60] και στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι ευρυγώνιοι φακοί έχουν πολύ καλή ανάλυση στο fovea και μη γραμμικώς μειούμενη ανάλυση στην περιφέρεια. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι μεταξύ των δύο μοντέλων των Basu και Licardie [57] (πολυωνυμικής ή λογαριθμικής έκφρασης του μεγέθους του διανύσματος), αποδείχθηκε ότι πιο αποδοτικό είναι αυτό που μοντελοποιεί το μέγεθος του διανύσματος μέσω πολυωνύμου.



Σχήμα 2.3: Στο μοντέλο διαστροφής FOV, η απόσταση cm είναι ανάλογη προς τη γωνία μεταξύ των CM και του οπτικού άξονα Cz (Πηγή: Devernay and Faugeras, 2001)

Στη συνέχεια, προτάθηκε, το 2001 από τους Devernay και Faugeras [33], ένα άλλο μοντέλο για μεγάλη διαστροφή. Το μοντέλο βασίζεται στον τρόπο σχεδιασμού των φακών fish-eye και ονομάστηκε FOV (Field Of View), καθώς, η καινοτομία του συνίσταται στην εισαγωγή του οπτικού πεδίου (ω) ως παραμέτρου διαστροφής. Το σκεπτικό πίσω από αυτό το μοντέλο είναι ότι η απόσταση μεταξύ ενός σημείου της εικόνας και του πρωτεύοντος σημείου είναι συνήθως (χονδρικά) ανάλογη με τη γωνία μεταξύ του αντίστοιχου σημείου, του οπτικού κέντρου και του οπτικού άξονα (Σχήμα 2.3). Αυτό το μοντέλο είναι συνάρτηση της ακτινικής απόστασης των εικονοστοιχείων της παραμορφωμένης εικόνας και του οπτικού πεδίου. Η γωνία αυτή (οπτικό πεδίο) μπορεί να μην αντιστοιχεί στο πραγματικό οπτικό πεδίο της κάμερας, δεδομένου ότι τα οπτικά συστήματα fish-eye μπορεί να μην ακολουθούν ακριβώς αυτό το μοντέλο. Η εξίσωση του μοντέλου FOV για την ακτινική απόσταση στη διορθωμένη εικόνα είναι:

$$r_u = \frac{\tan(r_d \omega)}{2 \tan \frac{\omega}{2}} \quad (34)$$

Κλείνοντας, μειονέκτημα των μοντέλων FET και FOV είναι το ότι δεν δίνουν καμία σχέση μεταξύ των παραμέτρων διαστροφής που αυτά ορίζουν και των φυσικώς μετρούμενων παραμέτρων των οπτικών συστημάτων [61].

2.4.4 Μη Παραμετρικά Μοντέλα

Ολοκληρώνοντας την ενότητα των μοντέλων ακτινικής διαστροφής αξίζει να αναφερθούν και κάποιες προσπάθειες μη παραμετρικών μοντέλων. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή των Perš και Kovacic [61] που δημιούργησαν ένα κλασματικό μοντέλο το οποίο έχει σε αριθμητή και παρονομαστή εκθετικές συναρτήσεις και δεν προϋποθέτει καμία πρόσθετη παράμετρο για την ακτινική διαστροφή. Δεν σχετίζεται άμεσα με τις πραγματικές φυσικές παραμέτρους του συστήματος και θεωρεί ότι η εστιακή απόσταση αλλάζει κατά μήκος της ακτίνας, δημιουργώντας έτσι την ακτινική διαστροφή. Όπως φαίνεται και από την εξίσωσή του:

$$r_u = -\frac{f \left(e^{\frac{2r_d}{f}} - 1 \right)}{2 e^{\frac{r_d}{f}}} \quad (35)$$

πρόκειται για μοντέλο που ορίζει την ακτινική απόσταση των διορθωμένων εικονοστοιχείων σε σχέση με την αντίστοιχη των αδιόρθωτων και τη σταθερά της μηχανής.

Παρόμοιες προσπάθειες έγιναν από τους Lee et. Al [62], οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα πολυώνυμο τετάρτου βαθμού, οδηγώντας στην ύπαρξη 5 βαθμών ελευθερίας την ώρα που τα περισσότερα μοντέλα διαστροφής είχαν δύο βαθμούς ελευθερίας. Επίσης, οι Hartley και Kang [63] ανέπτυξαν ένα μοντέλο χωρίς πρόσθετες παραμέτρους δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στο κέντρο διαστροφής. Μάλιστα, πρότειναν κι έναν αλγόριθμο εκτίμησής του.

2.4.5 Επιλογή Κατάλληλου Μοντέλου

Οποιοδήποτε από τα παραπάνω μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο βαθμονόμησης για την έκφραση των παραμορφώσεων του συστήματος μηχανής-φακού. Οι Abraham and Förstner [45] πρότειναν μια μέθοδο αξιολόγησης αυτών των μοντέλων, για την επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά με βάση και την απαιτούμενη ταχύτητα και ακρίβεια της διαδικασίας. Όρισαν την αξιολόγηση των μοντέλων μέσω του *minimum description length* (MDL), το οποίο είναι μια ποσότητα που περιγράφει κατά πόσο το μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά την γεωμετρία λήψης της κάθε εικόνας. Αργότερα, οι Ma et al. [28] πρότειναν τη χρήση των στατιστικών μοντέλων GAIC [13] και GMDL [64] για τη σύγκριση μεταξύ πολυωνυμικών και κλασματικών μοντέλων. Στη μελέτη τους όμως δεν εξήχθησαν μονοσήμαντα αποτελέσματα αφού κάθε στατιστικό μοντέλο έδειχνε διαφορετικά μοντέλα της ακτινικής διαστροφής να υπερτερούν, ειδικά σε περιπτώσεις υψηλής διαστροφής. Σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα αυτό έπαιξε η πολυπλοκότητα κάθε μοντέλου, ένα χαρακτηριστικό στο οποίο τα πολυωνυμικά σίγουρα μειωνεκτούσαν. Εν τω μεταξύ όμως, σύμφωνα με τον Kanatoni [65], πιο αξιόπιστο θεωρείται το GAIC, το οποίο υπεδείκνυε τα κλασματικά μοντέλα.

Κατά γενική ομολογία, η πιο συνηθισμένη μορφή μοντέλων είναι η πολυωνυμική. Ωστόσο, σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων τα μη πολυωνυμικά μοντέλα προσφέρουν σχέσεις μικρότερης πολυπλοκότητας (λιγότερες παράμετροι) και δεν απαιτούν κάποια μη γραμμική επαναληπτική διαδικασία για την αντιστροφή τους, σε αντίθεση με τα πολυωνυμικά. Για το λόγο αυτό αποδεικνύονται πιο αποτελεσματικά σε αυτές τις περιπτώσεις. Αυτό το συμπέρασμα όμως, δεν αποτελεί πανάκεια. Κάθε μελέτη και κάθε οπτικό σύστημα έχει τις ιδιαιτερότητές του, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να ικανοποιούνται από πολλά από τα παραπάνω μοντέλα ή να μην ικανοποιούνται πλήρως από κανένα από τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα.

2.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Ο προσδιορισμός του μεγέθους της ακτινικής διαστροφής αποτελεί ίσως το βασικότερο στάδιο στη διαδικασία απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής από μια εικόνα. Συνήθως, εντάσσεται στη διαδικασία της αποκατάστασης του Εσωτερικού Προσανατολισμού.

Η βαθμονόμηση γενικώς είναι η διαδικασία κατά τη οποία διεξάγεται ο έλεγχος της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των φωτογραφικών μηχανών αλλά και των συστημάτων μηχανής-φακού που χρησιμοποιούνται σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Βασικός

της στόχος είναι ο ορισμός στο χώρο της εικόνας ενός μαθηματικού υποκαταστάτου O_E του φυσικού κέντρου προβολής, το οποίο να επιτρέπει τη γεωμετρική ισοδυναμία δεσμών στους χώρους της εικόνας και του αντικειμένου. Διαρθρώνεται από πειραματικές, μετρητικές και υπολογιστικές διαδικασίες [2,3], μέσω των οποίων και με βάση το επιλεγμένο μοντέλο ακτινικής διαστροφής, προσδιορίζονται τα στοιχεία του Εσωτερικού Προσανατολισμού (σταθερά της μηχανής, πρωτεύον σημείο και μέγεθος ακτινικής διαστροφής του φακού). Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μεθόδων βαθμονόμησης που διαφέρουν λόγω των γεωμετρικών περιορισμών που ορίζουν, του εξοπλισμού και των δεδομένων που απαιτούν [33,66-68].

2.5.1 Μέθοδοι Βαθμονόμησης

Οι μέθοδοι βαθμονόμησης που έχουν αναπτυχθεί μπορούν να διαχωριστούν γενικώς σε δύο κατηγορίες, όσες απαιτούν τη λήψη μιας ή περισσότερων εικόνων κι όσες δεν απαιτούν καμία (γωνιόμετρο). Ωστόσο, οι μέθοδοι που δεν απαιτούν τη λήψη κάποιας εικόνας αλλά απλώς την παρατήρηση ενός πεδίου μέσω του φακού της κάμερας βρίσκουν εφαρμογή σχεδόν αποκλειστικά σε πολύ εξειδικευμένα εργαστήρια συνήθως κατασκευαστών. Αυτήν την εργασία θα απασχολήσουν μόνο οι μέθοδοι που απαιτούν εικονιστική πληροφορία.

2.5.1.1 Βαθμονόμηση με πεδία ελέγχου

Η βαθμονόμηση με πεδία ελέγχου είναι μια μέθοδος στην οποία χρησιμοποιείται ένα σύνολο σημείων αντιστοιχίας μεταξύ του απεικονιζόμενου χώρου και της εικόνας (σημεία ελέγχου) [12,69]. Μέσω αυτών των σημείων, πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός από τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του χώρου, στις δισδιάστατες της εικόνας, επιλύοντας τις άγνωστες παραμέτρους του μοντέλου της κάμερας (σταθερά της μηχανής, πρωτεύον σημείο και μέγεθος ακτινικής διαστροφής του φακού). Για τα σημεία αυτά απαιτείται να είναι γνωστές, με μεγάλη ακρίβεια, οι τρισδιάστατες συντεταγμένες τους στο χώρο και συνήθως επιλέγονται να είναι γωνίες, τελείες ή οποιαδήποτε χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν εύκολα να εξαχθούν από εικόνες μέσω υπολογιστή. Τα σημεία αυτά επισημαίνονται πάνω στην εικόνα (αυτομάτως ή με τη βοήθεια του χρήστη) κι έτσι εντοπίζονται οι εικονοσυντεταγμένες τους.

Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι εσωτερικές (σταθερά της μηχανής, πρωτεύον σημείο, ακτινική διαστροφή) και οι εξωτερικές (θέση και προσανατολισμός της μηχανής) παράμετροι του συστήματος μηχανής- φακού, που αντιστοιχούν στη θέση αυτών των σημείων στην εικόνα, με βάση το επιλεγμένο μοντέλο γεωμετρικής απεικόνισης της λήψης. Ωστόσο, κάθε μέθοδος που αναπτύσσεται στηρίζεται σε κάποιο μοντέλο ακτινικής διαστροφής για την προσέγγιση της γεωμετρικής συμπεριφοράς της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής [67], σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης. Συνεπώς, δεν υπάρχει κάποια μέθοδος κοινώς αποδεκτή και αξιόπιστη για το σύνολο των πολυάριθμων εφαρμογών της βαθμονόμησης στα διάφορα επιστημονικά πεδία.

Το πρόβλημα όσων μεθόδων υπολογίζουν ταυτόχρονα με τις εσωτερικές και τις εξωτερικές παραμέτρους, είναι η εμφάνιση μιας συσχέτισης αυτών μεταξύ τους, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στον εσφαλμένο προσδιορισμό τους.

- **Αυτοβαθμονόμηση**

Μια ξεχωριστή μέθοδος αυτής της κατηγορίας είναι η αυτοβαθμονόμηση [70-72]. Σε αυτή τη μέθοδο υπολογίζονται σε ενιαία συνόρθωση τα στοιχεία του Εσωτερικού και Εξωτερικού Προσανατολισμού. Απαιτεί πολλαπλές λήψεις διαφορετικών προσανατολισμών, αλλά κατά γενική ομολογία είναι μια ιδιαίτερα «ισχυρή» μέθοδος επίλυσης, καθώς για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του συστήματος μηχανής-φακού χρησιμοποιούνται οι παρατηρήσεις εικονοσυντεταγμένων όλων των κοινών σημείων στο σύνολο των εικόνων [71]. Η συνόρθωση δέσμης στην αυτοβαθμονόμηση δεν απαιτεί κάποιο αντικείμενο βαθμονόμησης και μπορεί να εφαρμοστεί με ή χωρίς περιορισμούς στο χώρο του αντικειμένου, οι οποίοι υλοποιούνται συνήθως με τη μορφή γνωστών σημείων ελέγχου. Έτσι όμως, απομένουν πολλές παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν, γεγονός που οδηγεί σε ένα πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο.

Εναλλακτική λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελεί η **μέθοδος της μερικής αυτοβαθμονόμησης**, όπου παραδείγματος χάριν, μπορούν να βαθμονομηθούν από πριν η διαφορά κλίμακας μεταξύ των αξόνων του εικονοστοιχείου της εικόνας και η μη καθετότητά τους, ώστε να απομείνει η βαθμονόμηση λιγότερων παραμέτρων [73]. Τέλος, έχει μελετηθεί και η **μέθοδος αυτοβαθμονόμησης βασισμένη σε active vision** [3,24,74], στην οποία οι κινήσεις της φωτογραφικής μηχανής είναι απολύτως ελεγχόμενες (π.χ. περιστροφή γύρω από το οπτικό κέντρο ή κίνηση πάνω στο επίπεδο). Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί στο ότι χρησιμοποιεί έναν απλό αλγόριθμο και μειονεκτεί στην ευελιξία κινήσεων της μηχανής [75,76].

- **Πεδία βαθμονόμησης**

Για τη διευκόλυνση διεξαγωγής των παραπάνω μεθόδων βαθμονόμησης, χρησιμοποιούνται συνήθως ειδικά πεδία βαθμονόμησης τριών, δύο ή μιας διάστασης, διαμορφώνοντας έτσι τις διαφορετικές εκδοχές εφαρμογής τους.

Ένα **τρισδιάστατο πεδίο βαθμονόμησης** [26,31] αποτελείται συνήθως είτε από κάποιο αντικείμενο τριών διαστάσεων, του οποίου η γεωμετρία είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια [64], είτε από διακριτά σημεία στο χώρο με γνωστές [12], από τοπογραφικές μετρήσεις ακριβείας, συντεταγμένες. Σημειώνεται πως η ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού σημείων κατανεμημένων σε περισσότερα του ενός επίπεδα, με διαφορετικές αποστάσεις από την φωτογραφική μηχανή είναι ζωτικής σημασίας για την αποκατάσταση των στοιχείων του Εσωτερικού Προσανατολισμού των λήψεων [137]. Κατά τη βαθμονόμηση σε ένα τέτοιο πεδίο λαμβάνονται εικόνες που αξιοποιούνται για τη συσχέτιση των γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων με τις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες σύμφωνα με τη συνθήκη συγγραμμικότητας.

Αντιθέτως, ένα **δισδιάστατο πεδίο βαθμονόμησης** [24,28,36,39,62,77] συνίσταται συνήθως από μια επίπεδη επιφάνεια με ένα σύνολο κάθετων και παράλληλων μεταξύ τους ευθειών καθώς και μικρό αριθμό σημείων επ' αυτής. Οι γραμμές αυτές μπορούν να εξαχθούν με ακρίβεια από την εικόνα μέσω τεχνικών επεξεργασίας εικόνας αλλά και να εντοπιστούν ευκολότερα από τα σημεία-στόχους στο πεδίο ελέγχου. Απαιτούνται πολλαπλές λήψεις με διαφορετικούς Προσανατολισμούς του πεδίου σε σχέση με τη μηχανή αλλά, δεν απαιτείται η γνώση της κίνησης της επιφάνειας σε αντίθεση με τη μέθοδο του Tsai όπου αυτό απαιτείται. Τέτοιου είδους πεδία είναι εύκολα στην κατασκευή τους και προσφέρουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα βαθμονόμησης γι' αυτό και είναι πιο διαδεδομένα από τα τρισδιάστατα, τα οποία προφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά απαιτούν πιο ακριβό εξοπλισμό. Κάποιοι μέθοδοι Όρασης Υπολογιστών και μέθοδοι αυτοβαθμονόμησης μπορούν να χειριστούν και τρισδιάστατα και επίπεδα πεδία ελέγχου, με την

κατάλληλη γεωμετρία του δικτύου, ενώ μοντέλα όπως του επιπολικού πίνακα αδυνατούν να συμπεριλάβουν επίπεδες επιφάνειες σημείων [4,24,78].

Ένα άλλο είδος πεδίο είναι το **μονοδιάστατο πεδίο βαθμονόμησης**. Αυτό αποτελείται από μια σειρά συνευθειακών σημείων [73,79], όπως για παράδειγμα, μια σειρά από μπάλες που κρέμονται από το ταβάνι. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μονοδιάστατα πεδία υπερτερούν αυτών που χρησιμοποιούν τρισδιάστατα ή δισδιάστατα στο κομμάτι της ταυτόχρονης βαθμονόμησης ενός δικτύου φωτογραφικών μηχανών, αφού, η ταυτόχρονη λήψη εικόνων από διαφορετικές κάμερες που βρίσκονται σε διαφορετικές διευθύνσεις σε σχέση με το πεδίο είναι πολύ πιο εύκολη.

Γενικώς, όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν κάποιο από τα παραπάνω πεδία παρέχουν πολύ ικανοποιητική ακρίβεια και τη δυνατότητα προβαθμονόμησης. Παρά ταύτα η ανάγκη για εξοπλισμό και χώρο για την εγκατάστασή τους και οι ακριβείς τοπογραφικές μετρήσεις, αποτελούν πολλές φορές ανασταλτικούς παράγοντες στην αξιοποίησή τους.

- **Χαρακτηριστικές εφαρμογές αυτών των μεθόδων βαθμονόμησης**

Αξίζει να γίνει μια σύντομη ανασκόπηση των κυριότερων μεθόδων βαθμονόμησης αυτής της κατηγορίας. Η πρώτη σύγχρονη μέθοδος βαθμονόμησης φωτογραφικών μηχανών με χρήση σημείων ελέγχου αναπτύχθηκε το 1982 από τους Hall et al. [80]. Πρόκειται για μια γραμμική μέθοδο με έμμεσο μοντέλο στην οποία συσχετίζονται οι συντεταγμένες του αντικειμένου στο χώρο με τις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες μέσω ενός πίνακα μετασχηματισμού 3×4 . Η επόμενη μέθοδος προτάθηκε το 1986 από τον Faugeras και στηριζόταν στην εξαγωγή των φυσικών παραμέτρων της μηχανής [69,81]. Ωστόσο, αποτελούσε γραμμική μέθοδο, γεγονός που την καθιστούσε γρήγορη αλλά ανακριβή [67].

Στην πορεία εξετάστηκαν μη γραμμικές μέθοδοι ώστε να συμπεριληφθεί σε αυτές και η μοντελοποίηση των παραμορφώσεων του φακού, προκειμένου να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Αρχικά, έγινε μια απλή μετατροπή της μεθόδου του Faugeras σε μη γραμμική και στην οποία αντικαταστάθηκε η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση από μια επαναληπτική διαδικασία, ώστε να εμπεριέχει και την ακτινική διαστροφή του φακού [82]. Το 1987 παρουσιάστηκε η ευρέως γνωστή μέθοδος του Tsai, που απαρτιζόταν από δύο στάδια (εκτίμηση προσεγγιστικών τιμών και ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων) και περιελάμβανε μόνο την ακτινική διαστροφή του φακού. Στη μέθοδο αυτή θεωρήθηκε ότι κάποιες από τις παραμέτρους της μηχανής είναι διαθέσιμες από τον κατασκευαστή κι έτσι μειώθηκαν οι προς προσέγγιση παράμετροι στο πρώτο στάδιο και όσον αφορά στο δεύτερο στάδιο μειώθηκε πολύ το πλήθος των επαναλήψεων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ή πολλές εικόνες ενός τρισδιάστατου ή δισδιάστατου πεδίου βαθμονόμησης, αλλά προϋποθέτει γνωστές συντεταγμένες του πεδίου [4,12].

Μετάπειτα, το 1992, προέκυψε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που συμπεριελάμβανε τρία διαφορετικά είδη παραμόρφωσης του φακού και χρησιμοποιούσε αντικείμενα βαθμονόμησης για την εξαγωγή των παραμέτρων διαστροφής, από τους Weng et. al [64]. Ακολούθως, το 1997 επινοήθηκε από τους Heikkila & Silvén [83], μια ακόμη μέθοδος δύο σταδίων. Σε αυτήν, εκτιμώνται αρχικά προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων της μηχανής μέσω μιας επίλυσης κλειστού τύπου (άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού DLT) [56] και μετά υπολογίζονται οι τελικές παράμετροι χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt, για συντομότερη σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου υπολογισμού του Εσωτερικού Προσανατολισμού. Το μοντέλο προέβλεπε δύο συντελεστές για την ακτινική και την έκκεντρη διαστροφή του

φακού μαζί. Η μέθοδος των Heikkila & Silvén έχει εφαρμογή σε πεδία βαθμονόμησης τριών [26,84-86] ή δύο [83] διαστάσεων, απαιτώντας μία ή περισσότερες λήψεις αντιστοίχως.

Στη συνέχεια, προτάθηκε μια μέθοδος βαθμονόμησης από τον Zhang το 1999 [14], η οποία υλοποιείται μέσω μιας επίπεδης «σκακιέρας» που τοποθετείται και φωτογραφίζεται υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες (περισσότερες των δύο). Στον αλγόριθμο της μεθόδου χρησιμοποιούνται τα εξαχθέντα σημεία από τις γωνίες της «σκακιέρας» για τον υπολογισμό ενός προβολικού μετασχηματισμού μεταξύ των σημείων των εικόνων. Έπειτα, οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι της φωτογραφικής μηχανής ανακτώνται με τη χρήση λύσης κλειστού τύπου, ενώ οι τρίτης και πέμπτης τάξης όροι της ακτινικής διαστροφής αποκαθίστανται με μία γραμμική ελαχιστοτετραγωνική λύση. Μία τελική, μη γραμμική, ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου Levenberg-Marquardt, βελτιώνοντας όλες τις ανακτηθείσες παραμέτρους [28]. Η προαναφερθείσα προσέγγιση του Zhang είναι παρόμοια με αυτή του Triggs (1998), στην οποία απαιτούνται τουλάχιστον 5 εικόνες μίας επίπεδης επιφάνειας-στόχου, όπως η «σκακιέρα» [4,137].

Μετάπειτα, ο Fitzgibbon [52] ασχολήθηκε με μια γραμμική μέθοδο ταυτόχρονου υπολογισμού των παραμορφώσεων λόγω του φακού και της γεωμετρίας πολλαπλών εικόνων. Μια ακόμα μέθοδος των Hartley και Kang [63], η οποία μοιάζει πολύ με την μέθοδο του Zhang, μελετά μια γραμμική, μη επαναληπτική και χωρίς παραμέτρους αλλά όχι ιδιαίτερα ακριβή διαδικασία βαθμονόμησης καθώς δεν εξαλείφεται ο θόρυβος. Θεωρεί ότι η ακτινική διαστροφή είναι μονότονη, κυκλικώς συμμετρική και εξαρτάται μόνο από την ακτινική απόσταση των σημείων από το κέντρο διαστροφής. Η υπόθεση αυτή σημαίνει ότι η απόσταση από το κέντρο της διαστροφής μετά τη διόρθωση είναι μονότονη συνάρτηση της απόστασης πριν τη διόρθωση άρα, η αντιστοιχία των σημείων των δύο εικόνων (διορθωμένης και αδιορθωτης) είναι ένα-προς-ένα και συνεπώς, ο μετασχηματισμός αυτός είναι και πολύ εύκολα αντιστρέψιμος. Απαιτεί πεδίο βαθμονόμησης δύο ή τριών διαστάσεων και πολλαπλές λήψεις με διαφορετικό προσανατολισμό μεταξύ τους. Μπορεί παρ' όλ' αυτά να αξιοποιηθεί σε άλλες μεθόδους βαθμονόμησης, ως μια μέθοδος για καλή αρχική προσέγγιση των παραμέτρων.

Την ίδια χρονιά, αναπτύχθηκε μια μέθοδος βαθμονόμησης από τους Romero και Gomez [36] στην οποία χρησιμοποιούνταν δύο εικόνες μιας επιφάνειας βαθμονόμησης. Η μια εικόνα από αυτές ήταν παραμορφωμένη και προερχόταν από την προς βαθμονόμηση μηχανή και η άλλη είτε σαρωμένη, είτε παρμένη από μηχανή μηδενικών παραμορφώσεων, είτε σχεδιασμένη με προσομοίωση (εικόνα αναφοράς), θεωρούνταν χωρίς παραμορφώσεις και χρησιμοποιούνταν ως οδηγός. Ακόμη, ως χαρακτηριστικά σημεία λαμβάνονταν τα κέντρα μάζας των συστάδων των λευκών εικονοστοιχείων, τα οποία και εξαγόταν αυτομάτως, σε αντίθεση με τη μέθοδο των Tamaki et al. που απαιτούσε ανθρώπινη παρέμβαση. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στηριζόταν σε μια μη γραμμική βελτιστοποίηση για την αντιστοίχιση των σημείων, σύμφωνα με ένα μη παραμετρικό μοντέλο ακτινικής διαστροφής. Αντιθέτως, το 2009 οι Lee et al. [62] πρότειναν μια άμεση, μη επαναληπτική μέθοδο που στόχο έχει τον προσδιορισμό των διανυσμάτων της ακτινικής διαστροφής και της εξίσωσής της απ' ευθείας, χωρίς δηλαδή προσεγγιστικές διαδικασίες. Αυτό επιτυγχάνεται, όπως, και στην μελέτη των Hartley και Kang, με την υπόθεση μονότονης συνάρτησης ακτινικής διαστροφής. Εφαρμόζεται ωστόσο, και αυτή σε επιφάνεια βαθμονόμησης, και μάλιστα, σε «σκακιέρα» και υπολογίζει χωριστά το κέντρο της διαστροφής.

Εν κατακλείδι, το 2013 οι Wang et al. [39] έκαναν μια μελέτη σχετικά με τη χρήση μικροσκοπιών και συγκεκριμένα SDES (Surface Defects Evaluation System) για την αξιολόγηση ελαττωμάτων μιας επιφάνειας. Στη μελέτη τους αυτή χρησιμοποίησαν μια μέθοδο βαθμονόμησης αντίστοιχης λογικής με αυτήν των Romero και Gomez [36], αφού χρησιμοποίησαν και αυτοί εικόνα αναφοράς.

2.5.1.2 Βαθμονόμηση με γεωμετρικούς περιορισμούς

Μια δεύτερη κατηγορία μεθόδων βαθμονόμησης είναι αυτή που αξιοποιεί γεωμετρικές ιδιότητες στο οπτικό πεδίο όπως ευθείες [87] ή σημεία φυγής, παράλληλες γραμμές [33,66,88] ή άλλα γραμμικά στοιχεία, αντί για σημεία αντιστοιχίας γνωστών τρισδιάστατων συντεταγμένων. Πρακτικά πρόκειται για μεθόδους συσχετισμού συντεταγμένων εντός του εικονιστικού πεδίου και γι' αυτό δεν απαιτείται κάποιο πεδίο βαθμονόμησης ή τρισδιάστατη πληροφορία της απεικονιζόμενης σκηνής. Μοναδική προϋπόθεση που τίθεται είναι η ύπαρξη επαρκών γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε όλη την έκταση του οπτικού πεδίου και κυρίως στην περιφέρεια, όπου οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες.

- **Μέθοδοι που βασίζονται σε γραμμικά στοιχεία**

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η προβολή μια ευθείας του χώρου, πάνω στην εικόνα, πρέπει να είναι ευθεία γραμμή. Μια συνθήκη που δεν ικανοποιείται λόγω της επίδρασης της ακτινικής ή και άλλων διαστροφών των φακών, πάνω στην εικόνα. Ιστορικά η πιο αξιοσημείωτη μέθοδος, βασισμένη σε γραμμικά στοιχεία, είναι η βαθμονόμηση με κατακόρυφες γραμμές (*plumb line method*) [16] αλλά η οποία, απαιτεί πολύ χειρωνακτική εργασία [4]. Ακόμη, οι Prescott και McLean [25] διαχωρίζουν τις παραμέτρους διαστροφής από αυτές της μηχανής και διεκπεραιώνεται ξεχωριστή διαδικασία βαθμονόμησης. Μοναδική εξαίρεση σε αυτή την κατηγορία μεθόδων βαθμονόμησης αποτελεί η πρόταση του Bräuer-Burchardt [55], η οποία βασίζεται και αυτή στη λογική συγγραμμικών σημείων αλλά χρησιμοποιεί πεδίο βαθμονόμησης και κατ' επέκταση χρειάζεται σημεία γνωστών τρισδιάστατων συντεταγμένων στο χώρο.

Οι μεθοδολογίες αυτές έχουν μελετηθεί και εξελιχθεί κυρίως από έρευνες στο πεδίο της Όρασης Υπολογιστών και ειδικά σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων παραμορφώσεων (ευρυγώνιοι, υπερευρυγώνιοι φακοί και ενδοσκοπία) όπου, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην απόκτηση διορθωμένων, από την ακτινική διαστροφή, εικόνων κι όχι σε αυτή καθαυτή τη βαθμονόμηση. Γι' αυτό το λόγο, τις περισσότερες φορές, διαδικασίες που στηρίζονται στη λογική των παραπάνω μεθόδων δεν απαντώνται ως αυτόνομες διαδικασίες βαθμονόμησης, αλλά στο πλαίσιο ενός επαναληπτικού αλγορίθμου με αλεπάλληλες προσεγγίσεις των απαραίτητων παραμέτρων και ταυτόχρονης διόρθωσης της εικόνας βάσει αυτών (δες ενότητα 2.7.2).

- **Μέθοδοι βασισμένες σε ευθείες και σημεία φυγής**

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε σημεία φυγής [53,66,89-96] προσδιορίζουν την ακτινική διαστροφή από τρία σημεία φυγής κάθετων μεταξύ τους διευθύνσεων. Χρησιμοποιούν ακόμα τις ιδιότητες παραλληλίας ή καθετότητας ευθειών του χώρου και συγκεκριμένα στηρίζονται στην υπόθεση ότι οι παράλληλες ευθείες του χώρου προβάλλονται στην εικόνα ως συγκλίνουσες στα σημεία φυγής. Επίσης, ορίζουν το πρωτεύον σημείο ως το ορθόκεντρο του τριγώνου των τριών σημείων φυγής. Για τη μελέτη αυτής της υπόθεσης βασίζονται σε μια διαδικασία εξαγωγής, κατάλληλης

ομαδοποίησης και προσαρμογής ακμών με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των σημείων φυγής [93]. Είναι συνήθως μονοεικονικές διαδικασίες [54]. Η εξαγωγή και ομαδοποίηση των ευθυγράμμων τμημάτων γίνεται συνήθως, με βάση τους αλγόριθμους Canny και Burns [32]. Η εκτίμηση των σημείων φυγής γίνεται είτε μέσω του αλγόριθμου Hough [50,54,97,98] είτε με βάση την μέθοδο της σφαίρας του Gauss (ελαχιστοποίηση της διασπορά σημείων φυγής στη σφαίρα του Gauss) [99,100] σε συνδυασμό με την εφαρμογή του αλγόριθμου RANSAC [101] είτε τέλος, μέσω τεχνικών ανάλυσης υψής [102]. Ο τελικός υπολογισμός των σημείων φυγής γίνεται με ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση [32].

Ιδιαίτερη μελέτη σχετικά με τα σημεία φυγής είναι αυτή των Karras et al. [103] όπου, αποδείχθηκε ότι ακόμα και με δύο μόνο σημεία φυγής είναι δυνατόν να υπολογιστούν ο πίνακας στρωφών και η σταθερά της μηχανής, αν υποτεθεί σταθερό πρωτεύον σημείο. Ωστόσο, η αδυναμία αυτή διεξαγωγής ολοκληρωμένης βαθμονόμησης εάν είναι διαθέσιμα μόνο δύο σημεία φυγής στην εικόνα παρακάμφθηκε από τους Grammatikopoulos et al. Αυτοί το 2004 [104] απέδειξαν ότι ο συνδυασμός άσχετων (από την άποψη του απεικονιζόμενου σκηνικού) μεταξύ τους εικόνων με σημεία φυγής σε δύο κάθετες διευθύνσεις, παρέχει επαρκή πληροφορία για τον υπολογισμό της γεωμετρίας της μηχανής. Ακόμη, το 2002 υποστήριξαν ότι υπό προϋποθέσεις η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να παρακαμφθεί αφού, υπό κατάλληλες συνθήκες, ακόμα και ένα μοναδικό και κατάλληλο σημείο φυγής σε μια μη βαθμονομημένη εικόνα μπορεί να αρκεί για αφινική ανακατασκευή στο επίπεδο κι έτσι, να επιτρέπονται μονοδιάστατες μετρήσεις [94,105]. Τέλος, οι ίδιοι το 2007 ανέπτυξαν μέθοδο βαθμονόμησης μηχανής μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Σε αυτήν εκτελείται ταυτόχρονη συνόρθωση όλων των σημείων της εικόνας τα οποία, ανήκουν σε γραμμές που τέμνονται στα τρία κυρίαρχα σημεία φυγής, με την παραδοχή φυσικά ότι αυτά αντιστοιχούν σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις στο χώρο [94].

- **Μέθοδοι βασισμένες σε αντίστοιχα σημεία μεταξύ διαφορετικών εικόνων**

Ως γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εικόνων μπορούν να θεωρηθούν και κάποια σημεία αντιστοιχίας μεταξύ τους, χωρίς όμως να απαιτείται η οποιαδήποτε περαιτέρω πληροφορία για αυτά. Ο Stein [106] και οι Sawhney και Kumar [107,108] αξιοποίησαν αυτά ακριβώς τα σημεία, χρησιμοποίησαν επιπολικούς και τριγραμμικούς περιορισμούς και μελέτησαν τον προσδιορισμό παραμέτρων ακτινικής διαστροφής ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα αυτών των περιορισμών.

2.5.2 Αλγόριθμοι Βαθμονόμησης

Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων αλγόριθμων είναι κάποια λογισμικά αυτοβαθμονόμησης που έχουν αναπτυχθεί από το εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab όπως, το «Fauccal» και το «Calibration_CCD». Στο ίδιο προγραμματιστικό περιβάλλον βέβαια, έχουν αναπτυχθεί πολλοί γνωστοί αλγόριθμοι μερικής αυτοβαθμονόμησης όπως ο «Camera Calibration Toolbox» for Matlab με βάση τη μέθοδο των Heikkila και Silven [83], ή του Bakstein [109], οι «CalDe» και «CalLab» βάσει της μεθόδου των Strobl και Hirzinger [110] και οι «Camera Calibration Tools» και ο «GML Calibration Tools» σύμφωνα με τον Bouguet. Οι δύο τελευταίοι αλγόριθμοι μάλιστα, εντάσσονται στη διαδικτυακή βιβλιοθήκη OpenCV [111,140].

Περίληπτικά, το «Faucal» [141] είναι ελεύθερο στο διαδίκτυο από το 2009 και είναι ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα βαθμονόμησης. Στο λογισμικό αυτό λαμβάνονται υπόψη εικόνες με διαφορετικό προσανατολισμό, μιας επίπεδης «σκακιάρας». Αρχικά, εξάγονται τα σημεία αντιστοιχίας από τις εικόνες και μάλιστα αυτομάτως, μέσω του τελεστή Harris και στη συνέχεια εκτελείται συνόρθωση δέσμης για την εκτίμηση των παραμέτρων Εσωτερικού Προσανατολισμού, σύμφωνα με το μοντέλο του Brown, χωρίς να ασχολείται με εξωτερικές παραμέτρους. Αντίστοιχο του «Faucal» είναι και το «Microsoft Easy Camera Calibration Tool» που υλοποιήθηκε επίσης στο Matlab από τον Z. Zhang [14], όπως και το «Camera calibration toolbox for Matlab» του Heikkila [26], σύμφωνα με τις μεθοδολογίες των ίδιων που αναλύθηκαν παραπάνω.

Το «Calibration_CCD» [138], αναπτύχθηκε επίσης από το εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Υπακούει στη Συνθήκη Συγγραμμικότητας και εφαρμόζει αυτοβαθμονόμηση με τη μέθοδο της δέσμης κατά την οποία υπολογίζονται με ενιαία συνόρθωση τα στοιχεία του Εσωτερικού και Εξωτερικού Προσανατολισμού. Από τα στοιχεία του Εσωτερικού Προσανατολισμού υπολογίζονται οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, η σταθερά της μηχανής αλλά και οι παράμετροι που εκφράζουν την ακτινική διαστρόφη, την έκκεντρη διαστρόφη και τις αφινικές παραμορφώσεις. Η μοντελοποίηση των παραμορφώσεων γίνεται με το μοντέλο του Brown χρησιμοποιώντας δύο παραμέτρους για κάθε μια. Συγκεκριμένα για την ακτινική διαστρόφη χρησιμοποιούνται οι δύο πρώτες παράμετροι (K_1, K_2) του πολυωνύμου της, για την έκκεντρη οι δύο παράμετροί της (P_1, P_2) σύμφωνα με τον Brown και τέλος για τις αφινικές παραμορφώσεις οι παράμετροι (ϵ, λ) για τη διαφορά κλίμακας μεταξύ των αξόνων και τη μη καθετότητα τους [138]. Για την εκτέλεση της συνόρθωσης και τον υπολογισμό των αγνώστων παραμέτρων απαιτούνται κάποιες προσωρινές τιμές. Αυτές εκτιμώνται μέσω της μεθόδου Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT) που εκφράζει την προβολική σχέση εικόνας-τρισδιάστατου χώρου μέσω 11 παραμέτρων.

2.6 ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΣΗΜΕΙΟ

Πρωτεύον σημείο είναι το σημείο προβολής του προβολικού κέντρου του φακού στο εστιακό επίπεδο. Οι συντεταγμένες του σημείου αυτού αποτελούν μέρος των στοιχείων του Εσωτερικού Προσανατολισμού και υπολογίζονται μέσω των μεθόδων βαθμονόμησης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ο ακριβής υπολογισμός αυτών είναι χρήσιμος για την διόρθωση των εικονοσυντεταγμένων έτσι ώστε, η ακτινική απόσταση των εικονοστοιχείων να μετράται με αφετηρία το πρωτεύον σημείο. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η προαναφερθείσα, απλουστευτική και επίφοβη για σφάλματα υπόθεση πολλών μεθόδων βαθμονόμησης ότι, το πρωτεύον σημείο μπορεί να ταυτιστεί με το κέντρο της εικόνας. Παρ' όλ' αυτά υπάρχουν πάντα οι μελέτες κατά τις οποίες κάτι τέτοιο δεν κρίνεται απαραίτητο.

2.7 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

Τα τελευταία χρόνια, λόγω κυρίως της ανάπτυξης της τεχνολογίας, έχουν αυξηθεί πολύ οι υπολογιστικές ικανότητες των συστημάτων επεξεργασίας εικόνας. Μάλιστα, λόγω της ενασχόλησης με την επεξεργασία εικόνας και άλλων επιστημονικών πεδίων πέραν της Φωτογραμμετρίας, όπως αυτού της Όρασης Υπολογιστών, το ενδιαφέρον έχει απομακρυνθεί από την απλή εύρεση των στοιχείων του Εσωτερικού

Προσανατολισμού. Αντιθέτως, η βασική επιδίωξη της πλειονότητας των μελετών σχετικά με την ακτινική διαστροφή, αλλά και της παρούσας εργασίας, είναι πλέον η απόκτηση γεωμετρικώς διορθωμένων εικόνων. Στην ενότητα αυτή πρόκειται να μελετηθεί η διαδικασία επίτευξης αυτού ακριβώς του στόχου, στο πλαίσιο της οποίας, έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες οι οποίες, διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες σχετικά με το αν έχει προηγηθεί ή όχι η εκτέλεση μιας οποιασδήποτε μεθόδου βαθμονόμησης.

2.7.1 Διόρθωση Εικονοσυντεταγμένων με Γνωστά Στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού

Με το δεδομένο ότι έχει προηγηθεί κάποια μέθοδος βαθμονόμησης, θεωρείται ότι είναι γνωστά με μεγάλη ακρίβεια τα στοιχεία του Εσωτερικού Προσανατολισμού ή έστω οι παράμετροι μόνο της ακτινικής διαστροφής (αναλόγως με τη μέθοδο βαθμονόμησης) για το εξεταζόμενο σύστημα μηχανής-φακού. Υπό την προϋπόθεση αυτή λοιπόν, είναι εφικτή η διόρθωση ή καλύτερα η αναγωγή των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων, 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 [139]. Στην ουσία, πρόκειται για έναν αφινικό μετασχηματισμό που αποκαθιστά τη σχέση δύο επίπεδων συστημάτων (αυτού της παραμορφωμένης εικόνας και αυτού της μηχανής) και η επίλυση γίνεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (MET). Κατά την αναγωγή αυτή, γίνεται αρχικά (αν κριθεί απαραίτητο), διόρθωση του πρωτεύοντος σημείου που ουσιαστικώς πρόκειται για μια μετάθεση του συστήματος αναφοράς από το κέντρο της εικόνας στο πρωτεύον σημείο (η διόρθωση αυτή ενσωματώνεται πρακτικά στην εξίσωση συγγραμμικότητας στην πιο απλή της μορφή).

Μετάπειτα, γίνεται απαλοιφή της ακτινικής διαστροφής, για την οποία, απαιτείται μοντέλο που να αποδίδει τις διορθωμένες εικονοσυντεταγμένες συναρτήσεως των παραμορφωμένων. Ωστόσο, το μοντέλο γεωμετρικής απεικόνισης ορίζει την προβολή τρισδιάστατων σημείων του χώρου, στο επίπεδο της εικόνας, χωρίς όμως να δίνει πάντα άμεση λύση στο πρόβλημα της αποκατάστασης του Εσωτερικού Προσανατολισμού. Το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται εάν το διατιθέμενο μοντέλο ακτινικής διαστροφής είναι αντιστρέψιμο με αναλυτικό τρόπο, όπως ισχύει, για παράδειγμα, για τα κλασματικά μοντέλα [28]. Σε αντίθετη περίπτωση, το αντίστροφο μοντέλο βρίσκεται με επαναληπτική αριθμητική μέθοδο, με πίνακα συσχετισμού [36] ή με προσεγγιστική μέθοδο [13,26,83].

Ωστόσο, η νέα εικόνα που θα προκύψει θα έχει διαφορετικές διαστάσεις από την παραμορφωμένη διότι πλέον δεν θα υπάρχει η συμπίεση λόγω του φακού. Ειδικά στην περίπτωση βαρελοειδούς διαστροφής, η διορθωμένη εικόνα θα είναι μεγαλύτερη της αρχικής, δημιουργώντας έτσι κενά στη νέα εικόνα. Συνεπώς, απαιτείται ένας ακόμα μετασχηματισμός που να αντιστοιχίζει κάθε εικονοστοιχείο της διορθωμένης εικόνας, στην αδιόρθωτη, ώστε να καθοριστεί η τιμή του τόνου του γκρι σε αυτό. Εάν δεν οδηγεί σε ακέραια τιμή εικονοστοιχείου της αρχικής τότε, συνήθως, εφαρμόζεται μια ραδιομετρική γραμμική, διγραμμική [36,39] ή δικυβική παρεμβολή σύμφωνα με τα κοντινά εικονοστοιχεία [31,83]. Σε κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις βέβαια και ειδικά σε όσες χρησιμοποιούν μεθόδους βαθμονόμησης με χρήση σημείων φυγής [32,54,108], η διαδικασία αυτή θεωρείται εξαιρετικά χρονοβόρα. Προτιμάται τότε λοιπόν, να υιοθετηθεί μια έμμεση, επαναληπτική μέθοδος διόρθωσης της εικόνας, βασισμένη σε αυτή των Newton-Raphson [112].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της ανωτέρω διαδικασίας, έχει αναπτυχθεί ως αλγόριθμος, σε προγραμματιστική γλώσσα C++ και ανήκει στη βιβλιοθήκη `openCV`, με την ονομασία `cvUndistort2()`.

2.7.2 Διόρθωση Εικονοσυντεταγμένων χωρίς Γνωστά Στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού

Εάν δεν είναι γνωστά τα στοιχεία του Εσωτερικού Προσανατολισμού, διότι δεν έχει προηγηθεί κάποια βαθμονόμηση, εφαρμόζεται απευθείας ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για την εκτέλεση αλληπάλλληλων προσεγγίσεων της ιδανικής εικόνας μέχρι την ικανοποίηση των προϋποθέσεων που έχουν οριστεί. Φυσικά, μπορεί στο πλαίσιο αυτού του επαναληπτικού αλγορίθμου να εντάσσεται και κάποια από τις προαναφερθείσες μεθόδους βαθμονόμησης βασισμένη σε γραμμικά στοιχεία [27], χωρίς όμως αυτό να είναι ο απώτερος στόχος της μελέτης και σίγουρα χωρίς να απαιτείται ανεξάρτητη βαθμονόμηση από πριν. Άλλωστε, αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται για κάθε νέα προσέγγιση της διορθωμένης εικόνας. Επίσης, σαφώς σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου γίνεται αποκατάσταση της οπτικής δέσμης και ανακατασκευή για την παραγωγή μιας νέας προσέγγισης της εικόνας και πάλι όμως χωρίς αυτό να γίνεται χωριστά αλλά ταυτόχρονα με τον προσδιορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών είναι μια νέα εικόνα με διορθωμένες, από την ακτινική διαστροφή, συντεταγμένες και αναλόγως με τη μέθοδο ίσως και διορθωμένο πρωτεύον σημείο, με ή χωρίς αποδιδόμενα στοιχεία του Εσωτερικού Προσανατολισμού. Αποτελούν δηλαδή όχι απλώς διαδικασίες προσδιορισμού αλλά και ταυτόχρονης απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής της εικόνας.

Σε αυτό το είδος μεθόδων γεωμετρικής διόρθωσης των εικονοσυντεταγμένων, το στοιχείο που αξιοποιείται είναι γεωμετρικές ιδιότητες στο οπτικό πεδίο και κυρίως ευθείες [87,113,114]. Η ακρίβειά τους εξαρτάται κυρίως από τον θόρυβο στην εικόνα, την επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (επάρκεια, μέγεθος, ορθότητα), τις μεθόδους εξαγωγής τους και το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την έκφραση της ακτινικής διαστροφής. Λόγω των παραπάνω και της ελλειμματικής παρουσίας αυστηρώς γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη φύση, αυτές οι μέθοδοι εφαρμόζονται κυρίως σε αστικά περιβάλλοντα, όπου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανθρώπινων κατασκευών καλύπτουν τις παραπάνω ανάγκες. Κατά την ανάπτυξη αυτών των μεθόδων έχει απασχολήσει πολύ η αυτοματοποίησή τους για τη βελτίωση της ακρίβειάς τους. Έτσι, αξιοποιούνται αλγόριθμοι εξαγωγής γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως αυτοί των Burns, Canny και Hough.

Οι σημαντικότερες μελέτες σε αυτό το πεδίο εστιάζουν στην αξιοποίηση των ευθειών του χώρου, ως γεωμετρικό χαρακτηριστικό εντός του οπτικού πεδίου. Στις μεθόδους αυτές η βασική υπόθεση είναι ότι οι ευθείες του χώρου πρέπει να προβάλλονται στην εικόνα ως ευθείες. Οι οποιεσδήποτε αποκλίσεις από την ευθειότητα αυτή στην εικόνα, αποδίδονται στην ακτινική διαστροφή. Ακόμη, οι μέθοδοι αυτές προϋποθέτουν (ανάλογα με την κατά περίπτωση μεθοδολογία) την ύπαρξη μιας [32,34,46,108,115-122] ή περισσοτέρων λήψεων [25,123]. Η κεντρική ιδέα εφαρμογής τους είναι η εξαγωγή γραμμικών χαρακτηριστικών από την εικόνα τα οποία, αποτελούν παραμορφωμένη προβολή ευθειών του χώρου και η κατάλληλη διόρθωση των εικονοσυντεταγμένων μέσω μη γραμμικής ελαχιστοτετραγωνικής βελτιστοποίησης ώστε αυτά να προβάλλονται ως ευθείες. Οι περιορισμοί που ορίζονται είναι ότι οι εξαγόμενες γραμμές:

- Πρέπει να έχουν ικανοποιητικό μήκος. Σύμφωνα με τους Choi et al. [30] πρέπει να έχουν μήκος μεγαλύτερο από το μισό της διάστασης ύψους της εικόνας
- Πρέπει να έχουν κατάλληλο προσανατολισμό. Για την ακρίβεια δεν πρέπει να διέρχονται όλες οι διαθέσιμες γραμμές από ένα μοναδικό σημείο στην εικόνα
- Πρέπει να καλύπτουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της εικόνας και ειδικά την περιφέρεια όπου, η ακτινική διαστροφή είναι μεγαλύτερη.

Αρχικά, γίνεται εξαγωγή των γραμμών ή των θεωρούμενων ως συγγραμμικών σημείων είτε αυτομάτως είτε χειροκίνητα με την παρέμβαση του χρήστη [33,49,115,118]. Σύμφωνα με τους Flores et al. [46] άλλωστε, οι μέθοδοι που απαιτούν επίβλεψη και ανθρώπινη παρέμβαση είναι πιο ασφαλείς αλλά ιδιαίτερα χρονοβόρες και αναποτελεσματικές ειδικά σε περιπτώσεις πολλών λήψεων. Όσον αφορά στην αυτόματη εξαγωγή γραμμών ή σημείων που θεωρούνται ότι ανήκουν στην ίδια γραμμή, βασίζεται στο κριτήριο ομοιότητας τοπικού προσανατολισμού και χωρικής συνεκτικότητας και πραγματοποιείται μέσω αλγορίθμων υποψηφιακής ακρίβειας ανίχνευσης ακμών [46,47,124]. Συνήθως, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος που προτάθηκε από τον Burns [25,32,125], ή τον Canny [25,30,50,123,126] ή μια επέκταση του μετασχηματισμού κατά Hough ώστε να περιλαμβάνει και μια παράμετρο για την ακτινική διαστροφή [46]. Ο αλγόριθμος του Canny εφαρμόζεται πολλές φορές και σε κάθε εικονοστοιχείο με σκοπό την ελαχιστοποίηση των εξεταζόμενων εικονοστοιχείων που ανήκουν σε κάθε γραμμή και συνεπώς, την απλοποίηση των υπολογισμών και τη συρρίκνωση του χρόνου σύγκλισης της μετέπειτα επαναληπτικής διαδικασίας.

Στη συνέχεια, γίνονται αλληπάλληλες προσεγγίσεις ώστε να αρθεί η καμπυλότητα των επιλεγμένων γραμμών, να προσαρμοστούν σε μοντέλα ευθειών κι έτσι να οριστεί το γεωμετρικό μοντέλο απεικόνισης και να διορθωθεί η εικόνα. Κυρίαρχη τακτική για την προσαρμογή αυτή αποτελεί η εφαρμογή ελαχιστοτετραγωνικής, μη γραμμικής βελτιστοποίησης (πχ. `lsqnonlin` στο `Matlab`) με κριτήριο σύγκλισης την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποστάσεων των σημείων κάθε εξαγμένου τμήματος από την ευθεία που το προσεγγίζει [25,30]. Τέλος, αφού έχουν διορθωθεί οι εικονοσυντεταγμένες, εφαρμόζεται μια παρεμβολή, γραμμική [58] ή διγραμμική [50] ή *biquadratic* [46] για την απόδοση χρώματος στην εικόνα. Υπάρχουν βέβαια και κάποιες μελέτες που αυτό το βήμα της παρεμβολής δεν είναι αναγκαίο [34,115]. Τέλος, έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμοι αλγόριθμοι αυτής της μορφής, έτσι ώστε να είναι συμβατοί και με το `Matlab`, με την `GNU Octave` [127], κ.ά.

• Χαρακτηριστικές μελέτες

Χαρακτηριστικές μελέτες που πρέπει να σημειωθούν είναι, για παράδειγμα, αυτή του Kang [115] στην οποία, χρησιμοποίησε μια ιδιαίτερη μέθοδο που ονομάζεται «*Radial Distortion Snakes*» [128]. Τα λεγόμενα «*snakes*» είναι γραμμές πάνω στην εικόνα που συμπεριφέρονται σαν συμβατικά παραμορφώσιμες καμπύλες, αλλά συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός συνεκτικού μοντέλου. Διεξάγεται επαναληπτική διαδικασία προσέγγισης των ευθειών, κατά την οποία τα «*snakes*» αλληλεπιδρούν ώστε να δώσουν από κοινού τη βέλτιστη εκτίμηση παραμέτρων ακτινικής διαστροφής για το σύνολο της εικόνας και να προσεγγίσουν τις ακμές στην εικόνα.

Μια άλλη πολύ πρωτότυπη έρευνα είναι των Lee et al. [50] σχετικά με την διόρθωση σε πραγματικό χρόνο εικόνων που έχουν ληφθεί από ενδοσκόπια με δυνατότητα εστίασης κατά τη διεξαγωγή επεμβάσεων ελαχίστως παρεμβατικής χειρουργικής

(MIS). Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με μια επέκταση του αλγορίθμου Hough και ως μέτρο ευθειότητας των γραμμών λαμβάνεται η εντροπία στο χώρο Hough, προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη όλες οι καμπύλες γραμμές της εικόνας. Όσον αφορά στη συνθήκη αλλαγής της εστίασης, δοκιμάζονται διαφορετικές εστιακές αποστάσεις (3-4) και χρησιμοποιείται τελικά μια προσέγγιση. Η μέθοδος φαίνεται να έχει πολύ καλά αποτελέσματα ειδικά αν χρησιμοποιηθεί κάποιο πεδίο βαθμονόμησης, αν και αυτό δεν είναι απαραίτητο. Το μόνο μειονέκτημα της είναι ότι απαιτεί να φαίνεται στις εικόνες το περίγραμμα του ενδοσκοπίου.

Μια εντελώς διαφορετική υπόθεση ότι δηλαδή, οι ευθείες του χώρου απεικονίζονται ως κυκλικά τόξα [120] και το κέντρο διαστροφής επίσης ανήκει σε κύκλο ομόκεντρο αυτού της ευθείας, αποδεικνύεται από τους Wang et al. [34]. Βάσει αυτής πρότειναν μια μη επαναληπτική μέθοδο που υπολογίζει ταυτόχρονα τις παραμέτρους και το κέντρο διαστροφής με παράλληλη διόρθωση της εικόνας. Απαιτεί την ύπαρξη τουλάχιστον τριών παραμορφωμένων ευθειών κάθε μια από τις οποίες, προσαρμόζεται σε έναν κύκλο είτε άμεσα ελαχιστοτετραγωνικά είτε μέσω του αλγορίθμου Levenberg-Marquardt. Με βάση τις εξισώσεις των κύκλων υπολογίζεται το κέντρο διαστροφής και στη συνέχεια οι παράμετροι της. Αν είναι διαθέσιμες μόνο δύο ευθείες επιλύεται με επαναληπτική προσεγγιστική διαδικασία, ενώ αν είναι μόνο μια διαθέσιμη θεωρείται ότι το κέντρο διαστροφής ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας. Επίσης, εάν το εικονοστοιχείο δεν είναι τετραγωνικό τότε, αντί για κύκλο προσαρμογής χρησιμοποιείται έλλειψη.

2.8 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΑΠΑΛΟΙΦΗΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗΣ

Βάσει της θεωρίας και των μεθόδων που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, έχουν αναπτυχθεί λογισμικά επεξεργασίας εικόνας, που υποστηρίζουν ότι μπορούν να διορθώσουν αυτόματα την ακτινική διαστροφή, απαιτώντας από το χρήστη να εισαγάγει απλώς την εικόνα. Τα λογισμικά αυτά ασχολούνται στην πλειονότητά τους με τη γενικότερη έννοια της επεξεργασίας εικόνας και η διόρθωση της ακτινικής διαστροφής είναι απλώς ένα μέρος των δυνατοτήτων τους. Ωστόσο, δεν είναι γνωστή η γεωμετρική ακρίβεια με την οποία πραγματοποιούν αυτή τη διόρθωση, οπότε δεν είναι γνωστό και το πεδίο εφαρμογής τους. Αυτό πρόκειται να διασαφηνιστεί μέσω της μελέτης της παρούσας εργασίας, όσον αφορά σε ένα χαρακτηριστικό δείγμα τέτοιων λογισμικών. Συγκεκριμένα, θα εξεταστούν και θα αξιολογηθούν, ως προς την ικανότητα απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής, τα παρακάτω λογισμικά:

- GML Undistorter
- PTLens
- DxO (έκδοση View Point 2)
- Adobe Photoshop CS (έκδοση 5.1)
- Adobe Photoshop Lightroom (έκδοση 5.3)

Πρέπει να αναφερθεί ότι, στην πλειονότητά τους τα λογισμικά αυτά εκτελούν εσωτερικές διαδικασίες εξάλειψης της ακτινικής διαστροφής, χωρίς να δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη όχι απλώς να επέμβει στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται αλλά ακόμα και να τις γνωρίσει. Έτσι, δεν είναι συνήθως γνωστό το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται αλλά ούτε οι τελικώς υπολογισμένες παράμετροι

ακτινικής διαστροφής. Εξάιρεση σε αυτό αποτελούν τα λογισμικά PTLens και Adobe PhotoshopCS. Η ισχύουσα κατάσταση σχετικά με αυτό θα αναλυθεί παρακάτω στην συνοπτική περιγραφή κάθε λογισμικού χωριστά. Κατά γενική ομολογία πάντως, εφαρμόζονται μη-φυσικά, παραμετρικά μοντέλα χαμηλού βαθμού, γεγονός που τα καθιστά ικανά μόνο για περιορισμένες βελτιώσεις.

Το ισχυρότερο πλεονέκτημα αυτών των λογισμικών είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα αυτόματης διόρθωσης της εικόνας από ακτινική διαστροφή. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας βασίζεται σε δύο ιδιότητες των λογισμικών. Πρώτον, μετά την εισαγωγή της εικόνας, τα λογισμικά ενημερώνονται αυτομάτως για το μοντέλο μηχανής-φακού, που χρησιμοποιήθηκε κατά τη λήψη, μέσω του αρχείου μεταδεδομένων της εικόνας. Ωστόσο, εάν δεν είναι διαθέσιμο ένα τέτοιο αρχείο, η ενημέρωση αυτή γίνεται χειροκίνητα από τον χρήστη μέσω επιλογής από τη διατιθέμενη, από το κάθε λογισμικό, λίστα μοντέλων. Δεύτερον, τα λογισμικά αυτά διαθέτουν μια ευρεία βάση δεδομένων, για πολλά μοντέλα μηχανών και φακών, με τα στοιχεία που απαιτεί καθένα από αυτά τα λογισμικά για την απαλοιφή της ακτινικής διαστροφής από την εικόνα. Σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, προσδιορίζουν μέσω αυτής της βάσης δεδομένων, τις παραμέτρους που θα λάβουν υπόψη για την εκτέλεση της διόρθωσης της διαστροφής.

Η βάση δεδομένων των μοντέλων μηχανής-φακού, που διαθέτουν τα λογισμικά τέτοιου τύπου είναι συνήθως πολύ ευρεία και ανανεώνεται συνεχώς. Ωστόσο, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κάποιο μοντέλο που δεν συμπεριλαμβάνεται στη διατιθέμενη λίστα, υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις. Τα λογισμικά αυτά δίνουν συνήθως τη δυνατότητα εμπλουτισμού της λίστας με συγκεκριμένο μοντέλο, κατόπιν αιτήματος κάποιου χρήστη. Ακόμα, επιτρέπουν στο χρήστη να κάνει ο ίδιος, χειροκίνητα τη διόρθωση, επιλέγοντας το είδος της διαστροφής και το μέγεθος της διόρθωσης. Μάλιστα, ταυτοχρόνως με τη χειροκίνητη διόρθωση, γίνεται και προβολή του αποτελέσματος στην οθόνη, με αποτέλεσμα τη διευκόλυνση και την αύξηση ακρίβειας της διαδικασίας.

2.8.1 Αρχείο Μεταδεδομένων

Όπως είναι σαφές από την προηγούμενη ενότητα, σπουδαίο ρόλο, στην απαλοιφή της ακτινικής διαστροφής μέσω λογισμικών επεξεργασίας εικόνας, παίζει το αρχείο μεταδεδομένων των εικόνων. Σε κάθε μορφή εικόνας (jpeg, tiff, png,...) το αρχείο αυτό ονομάζεται διαφορετικά και είναι μοναδικό για κάθε διαφορετική λήψη. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιούνται αρχεία jpeg, γι' αυτό και θα εξεταστεί το αντίστοιχο αρχείο μεταδεδομένων, αν και ανάλογα στοιχεία ισχύουν και για τις άλλες μορφές εικόνων. Το αρχείο μεταδεδομένων μιας εικόνας της μορφής jpeg ονομάζεται Exif (Exchangeable Image File Format). Το Exif είναι ένα αρχείο που επισυνάπτεται σε εικόνες jpeg αλλά και σε tiff. Αποθηκεύεται αυτομάτως από την ψηφιακή μηχανή και περιέχει πληροφορίες σχετικά με τη μηχανή (μοντέλο μηχανής, φακού, σταθερά της μηχανής, διαστάσεις εικονοστοιχείου κ.ά.), τις ρυθμίσεις που είχαν επιλεγεί (ταχύτητα κλείστρου, άνοιγμα διαφράγματος, εστίαση κ.ά.) και γενικές πληροφορίες για τη λήψη (ημερομηνία, ώρα, τοποθεσία, κ.ά.).

Τέτοιου είδους αρχεία μπορούν να διαβαστούν και να τροποποιηθούν από το χρήστη μέσω ειδικών λογισμικών. Ίδανικά, αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι θα ήταν δυνατόν να εκτελέσει κανείς μια βαθμονόμηση και στη συνέχεια να εισαγάγει τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης στο αρχείο μεταδεδομένων της εικόνας, ώστε, η μετέπειτα αυτόματη απαλοιφή της ακτινικής διαστροφής από κάποιο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας, να είναι πιο αξιόπιστη. Δυστυχώς, αυτό δεν ανταποκρίνεται

στην πραγματικότητα για τα λογισμικά που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Ο λόγος είναι ότι τα λογισμικά αυτά εξάγουν από τα EXIF μόνο τον τύπο της μηχανής και του φακού και στη συνέχεια, χρησιμοποιούν τα στοιχεία της βάσης δεδομένων, άσχετα με τις υπόλοιπες πληροφορίες του αρχείου EXIF. Έτσι, ακόμα κι αν ο χρήστης υπολόγιζε και εισήγαγε στο EXIF την ακριβή σταθερά της μηχανής ή τις παραμέτρους της ακτινικής διαστροφής της συγκεκριμένης λήψης, το λογισμικό θα αναγνώριζε απλώς το μοντέλο μηχανής και φακού, θα αγνοούσε την ενέργεια του χρήστη και θα χρησιμοποιούσε τα στοιχεία της βάσης δεδομένων του.

2.8.2 Τα Εξεταζόμενα Λογισμικά

GML Undistorter

Το GML Undistorter είναι το μοναδικό, από τα εξεταζόμενα, λογισμικό, που δεν είναι εμπορικό προϊόν, αλλά ελεύθερο στο διαδίκτυο. Το μειονέκτημά του είναι ότι δέχεται μόνο εικόνες της μορφής JPEG. Ασχολείται αποκλειστικά με τη διόρθωση της ακτινικής διαστροφής των φακών, συναρτήσει των δεδομένων της «βιβλιοθήκης συστημάτων μηχανής-φακού» του. Είναι πολύ απλό στη χρήση του καθώς το μοντέλο μηχανής-φακού λαμβάνεται αυτομάτως μέσω των μεταδεδομένων της εικόνας. Αν αυτά δεν είναι διαθέσιμα τότε, απαιτείται να δοθούν από το χρήστη έστω και προσεγγιστικά. Παρά ταύτα, υπάρχει η εναλλακτική επιλογή χειροκίνητης διόρθωσης της ακτινικής διαστροφής από το χρήστη [129-131].

PTLens

Το PTLens είναι ένα λογισμικό που ανήκει σε μια ευρύτερη ομάδα λογισμικών που ονομάζεται Panorama Tools. Προσφέρει επεξεργασία εικόνας (JPEG ή TIFF), αλλά, εστιασμένα σε ό,τι αφορά στις παραμορφώσεις λόγω του φακού. Είναι το πιο οικονομικό από τα εμπορικά λογισμικά και ιδιαίτερα φιλικό για Έλληνες χρήστες, καθώς η διεπιφάνεια επικοινωνίας με το χρήστη παρέχεται και στα ελληνικά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως αυτόνομο λογισμικό, είτε ως πρόσθετο (plug-in) του Adobe Photoshop ή του Adobe Photoshop Lightroom και προσφέρεται δοκιμαστική, δωρεάν έκδοσή του για τις πρώτες δέκα εικόνες.

Για την ακρίβεια, το λογισμικό αυτό ασχολείται με την ακτινική διαστροφή, τη σκίαση, την προοπτική απεικόνιση και την χρωματική απόκλιση. Ειδικά για την ακτινική διαστροφή (που είναι και αυτή που κυρίως ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία), έχει τη δυνατότητα διόρθωσης όλων των μορφών της, ακόμα και στην περίπτωση «moustache» διαστροφής ή αυτής λόγω υπερευρυγώνιων ή αρχιτεκτονικών φακών. Για να επιτευχθεί αυτό, στηρίζεται σε αλγορίθμους που παρέχονται από το Panorama Tools, υπολογίζει τις παραμέτρους της ακτινικής διαστροφής και διορθώνει την εικόνα.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί ένα παραμετρικό, μη φυσικό, τρίτου βαθμού μοντέλο για την έκφραση της ακτινικής διαστροφής και την υπόθεση ότι το πρωτεύον σημείο ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας. Το μοντέλο αυτό είναι συνάρτηση της κανονικοποιημένης ακτινικής απόστασης (ρ) πάνω στην εικόνα, η οποία προσδιορίζεται με βάση το μισό της μικρότερης διάστασης (h) της εικόνας. Για την ακρίβεια, θεωρεί ότι το μισό της μικρής διάστασης της εικόνας πρέπει να ισούται με 1, ώστε μέσω της εξίσωσης $\rho = \frac{2r}{h}$ να εξασφαλίζεται η επιθυμητή κανονικοποίηση. Η κανονικοποίηση αυτή δηλώνει ότι ο μεγαλύτερος κύκλος που χωράει εξ ολοκλήρου

στην εικόνα, έχει ακτίνα ίση με 1. Έτσι, το πλήρες μοντέλο που χρησιμοποιεί έχει την παρακάτω μορφή:

$$\rho_d = a\rho_u^4 + b\rho_u^3 + c\rho_u^2 + d\rho_u \quad (36)$$

όπου, ρ_d είναι η κανονικοποιημένη ακτινική διαστροφή στην παραμορφωμένη εικόνα και ρ_u αντιστοίχως στη διορθωμένη [132]. Όπως φαίνεται οι παράμετροι που χρησιμοποιεί είναι τέσσερις μη φυσικές και η κάθε μία από αυτές επηρεάζει διαφορετική περιοχή της εικόνας. Η παράμετρος a επηρεάζει τις γωνίες της εικόνας, η b το εσωτερικό της, η c την εικόνα ως σύνολο, ενώ η d ελέγχει την κλίμακα της διορθωμένης εικόνας. Μάλιστα, η τελευταία είναι συνάρτηση των a, b, c , ισούται με $d = 1 - (a + b + c)$ και θεωρείται, συνήθως, ίση με τη μονάδα ώστε η νέα εικόνα να έχει το ίδιο μέγεθος με την αρχική.

Πρακτικά, για την επίτευξη της διόρθωσης, το λογισμικό διαθέτει μια εκτενή βάση δεδομένων με τις παραμέτρους βαθμονόμησης των συστημάτων μηχανής-φακού. Οι παράμετροι αυτές έχουν προσδιοριστεί με βάση εικόνες που έχουν δοθεί από τους χρήστες του λογισμικού, σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται (από το λογισμικό) σχετικά με τον τρόπο (απόσταση λήψης τουλάχιστον οκτώ μέτρα) και το αντικείμενο απεικόνισης (επίπεδος στόχος με γραμμές καθ' όλο το μήκος). Συγκεκριμένα, για κάθε σύστημα μηχανής-φακού γίνεται βαθμονόμηση για 10-12 διαφορετικές εστιακές αποστάσεις. Λόγω αυτής της διαδικασίας είναι λογικό ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει στη λίστα το ζητούμενο προφίλ φακού, ο χρήστης πρέπει απλώς να προμηθεύσει το διαχειριστή του λογισμικού με τις απαραίτητες εικόνες, ώστε αυτός να εκτελέσει της βαθμονομήσεις και να εμπλουτίσει τη βάση δεδομένων (δωρεάν παροχή).

Το πρόγραμμα δεν απαιτεί στην ουσία τίποτα από το χρήστη, παρά μόνο την εισαγωγή της εικόνας. Το ίδιο αναγνωρίζει από μόνο του το μοντέλο μηχανής, το φακό, την εστιακή απόσταση και το άνοιγμα διαφράγματος, μέσω του αρχείου μεταδεδομένων, δίνοντας βέβαια τη δυνατότητα για αλλαγές στο χρήστη. Σύμφωνα λοιπόν, με την επιλογή προφίλ που έχει γίνει και με βάση τις παραμέτρους βαθμονόμησης που περιέχει η βιβλιοθήκη, πραγματοποιείται η διόρθωση. Ειδικά στην περίπτωση της παραμόρφωσης από υπερευγώνιο φακό, μπορεί ο χρήστης να εκτελέσει τη διόρθωση και χειροκίνητα [47,133,142].

DxO View Point 2

Το DxO View Point 2 είναι ένα εμπορικό προϊόν που εστιάζει στη διόρθωση ακτινικής διαστροφής, προοπτικής απεικόνισης και κεκλιμένου ορίζοντα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αυθύπαρκτη εφαρμογή ή ως πρόσθετο σε άλλα λογισμικά όπως τα Adobe Photoshop, Adobe Photoshop Elements, Adobe Lightroom και Apple Aperture. Λόγω του υψηλού κόστους του, δίνεται η δυνατότητα χρήσης του δωρεάν για ένα μήνα. Δέχεται εικόνες της μορφής JPEG ή TIFF (8 ή 6 bit) ή RAW, ενώ μπορεί να εξαγάγει σε μορφή JPEG, TIFF και DNG.

Διατείνεται ότι είναι ικανό να διορθώσει αυτομάτως κάθε είδους ακτινική διαστροφή, ακόμα και την προερχόμενη από υπερευγώνιους (fish-eye) φακούς. Η διόρθωση αυτή πραγματοποιείται σύμφωνα με τη βιβλιοθήκη χαρακτηριστικών (DxO Optics Modules) των περίπου δεκαπέντε χιλιάδων συνδυασμών μηχανής-φακού που διαθέτει, όπως αυτή έχει οριστεί κατόπιν βαθμονόμησης. Στο πλαίσιο αυτής της βαθμονόμησης η ακτινική διαστροφή ορίζεται σύμφωνα με τις παραμορφώσεις των θέσεων των συγγραμμικών σημείων ενός πεδίου ελέγχου (τα οποία δεν

απεικονίζονται συγγραμμικά λόγω διαστροφής). Συγκεκριμένα, εντοπίζονται τα σημεία που θα έπρεπε να απεικονίζονται ως συγγραμμικά και προσδιορίζεται η ευθεία που τα προσεγγίζει με βάση τα δύο ακραία σημεία. Έτσι η ακτινική διαστροφή υπολογίζεται σύμφωνα με την απόκλιση αυτών των σημείων από την αντίστοιχη ευθεία.

Τέλος, κατά την είσοδο της εικόνας στο εργαλείο αυτό, πραγματοποιείται η αυτόματη αναγνώριση της μηχανής μέσω του αρχείου μεταδεδομένων και ζητείται από το χρήστη να διαλέξει τον τελικό συνδυασμό μηχανής-φακού από τη βιβλιοθήκη. Αν ο συνδυασμός αυτός δεν είναι διαθέσιμος, δίνεται και η δυνατότητα χειροκίνητης επιλογής του είδους και του μεγέθους διόρθωσης της εικόνας [133].

Adobe Photoshop CS5.1

Ένα άλλο εμπορικό λογισμικό που ασχολείται με την επεξεργασία εικόνας, κι εκτός των άλλων διορθώνει την ακτινική διαστροφή είναι το Adobe Photoshop. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η έκδοση Adobe Photoshop CS5.1. Και σε αυτό το λογισμικό παρέχεται δοκιμαστική έκδοση για ένα μήνα. Δέχεται εικόνες σχεδόν όλων των μορφών (JPEG, TIFF, DNG,...), ακόμα και RAW. Για τα RAW αρχεία βέβαια προϋποθέτει τη χρήση ενός επισυναπτόμενου (plug-in) λογισμικού (Camera Raw).

Όσον αφορά στην αυτόματη διόρθωση της ακτινικής διαστροφής, χρησιμοποιείται παραμετρικό μοντέλο ίδιο με αυτό του PTLens αλλά, έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι ιδιαίτερος αποδοτικό σε περιπτώσεις πολύπλοκης ακτινικής διαστροφής (moustache distortion). Ωστόσο, παρέχει μια ευρεία γκάμα συστημάτων μηχανής-φακού στη «βιβλιοθήκη» του. Μάλιστα, τα προφίλ των διατιθέμενων, από τη βιβλιοθήκη, φακών με δυνατότητα εστίασης, έχουν προκύψει από τη μελέτη της διαστροφής για έξη διαφορετικές εστιακές αποστάσεις. Αρχικά, μέσω του αρχείου μεταδεδομένων, το λογισμικό αναγνωρίζει το σύστημα μηχανής-φακού και επιλέγει ένα προφίλ αλλά, δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει κάποιο διαφορετικό, σε σχέση μάλιστα, με την εστιακή απόσταση και την απόσταση εστίασης. Όποιο προφίλ κι αν επιλέξει τελικά ο χρήστης, μπορεί να το αποθηκεύσει ώστε να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες ρυθμίσεις (μηχανή, φακός, εστιακή απόσταση) κατά την επεξεργασία και άλλων εικόνων. Σε περίπτωση που είτε η χρησιμοποιούμενη εικόνα δεν έχει αρχείο μεταδεδομένων είτε το απαιτούμενο προφίλ δεν συμπεριλαμβάνεται στη βιβλιοθήκη είτε συμπεριλαμβάνεται, αλλά το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, μπορεί να εφαρμοστεί χειροκίνητη ρύθμιση της μορφής και του μεγέθους της διόρθωσης [47,132,133].

Adobe Photoshop Lightroom 5.3

Το επόμενο εμπορικό λογισμικό που μελετήθηκε είναι το Adobe Photoshop Lightroom. Πρόκειται για μια βελτιωμένη έκδοση κάποιων μεμονωμένων χαρακτηριστικών του Adobe Photoshop. Έτσι, χαρακτηρίζεται από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για το Adobe Photoshop, με τη διαφορά ότι διαθέτει πολύ πιο εμπλουτισμένη βάση δεδομένων για τα συστήματα μηχανής-φακού και προνοεί για πολύ μεγαλύτερο εύρος μορφών ακτινικής διαστροφής (π.χ. moustache distortion), με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επίσης, δέχεται ως εικόνες εισόδου, εικόνες των μορφών JPEG, TIFF (8 ή 16 bit), DNG, PNG, PSD (8 ή 6 bit) και RAW.

	Έκδοση που εξετάστηκε	Τιμή	Έκδοση δοκιμής (trial)	URL	Τύποι αρχείων εικόνας που δέχεται	Αυτόνομο ή plug-in	Ασχολείται με	Αυτόματη αναγνώριση του αρχείου μεταδεδομένων	Διόρθωση Ακτινικής Διαστρόφης	
									Χειροκίνητη	Αυτόματη
GML Undistorter	GML Undistorter	0€	-	[143]	JPEG	Αυτόνομο	Ακτινική διαστρόφη	NAI	NAI	<ul style="list-style-type: none"> • Βάση δεδομένων • Άγνωστο μοντέλο • Άγνωστη Βαθμονόμηση
PTLens	PTLens	20€	Για τις 10 πρώτες εικόνες	[144]	JPEG, TIFF	Αυτόνομο ή plug-in σε Photoshop CS και Lightroom	Ακτινική διαστρόφη, σκίαση, προοπτική, χρωματική απόκλιση	NAI	Για υπερυγώνιο φακό	<ul style="list-style-type: none"> • Βάση δεδομένων • Μοντέλο από σχέση (36) • Βαθμονόμηση για 10-12 διαφορετικές f, για φακούς με δυνατότητα εστίασης
DxO	View Point 2	49€ (99€ DxO Pro 9)	Για τις 30 πρώτες μέρες	[145]	JPEG, TIFF, RAW	Αυτόνομο ή plug-in σε Photoshop CS, Lightroom, Elements και Apple Aperture	Ακτινική διαστρόφη, προοπτική, κεκλιμένο οριζόντιο	NAI	NAI	<ul style="list-style-type: none"> • Βάση δεδομένων • Άγνωστο μοντέλο • Βαθμονόμηση με χρήση γραμμικών στοιχείων
Adobe Photoshop CS	5.1	348€ /έτος	Για τις 30 πρώτες μέρες	[146]	JPEG, TIFF, RAW, PNG, ...	Αυτόνομο	Ακτινική διαστρόφη και συνολική επεξεργασία εικόνας	NAI	NAI	<ul style="list-style-type: none"> • Βάση δεδομένων • Μοντέλο από σχέση (36) • Βαθμονόμηση για 6 διαφορετικές f, για φακούς με δυνατότητα εστίασης
Adobe Photoshop Lightroom	5.3	118€ + ΦΠΑ	Για τις 30 πρώτες μέρες	[147]	JPEG, TIFF, DMG, RAW, PNG, Psd	Αυτόνομο	Ακτινική διαστρόφη και συνολική επεξεργασία εικόνας	NAI	NAI	<ul style="list-style-type: none"> • Βάση δεδομένων • Μοντέλο από σχέση (36) • Βαθμονόμηση για 6 διαφορετικές f, για φακούς με δυνατότητα εστίασης

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας πληροφοριών σχετικά με τα λογισμικά

3

ΛΗΨΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

3.1 ΛΗΨΗ ΕΙΚΟΝΩΝ

Όπως έχει προαναφερθεί, βασικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση της επίδοσης διάφορων λογισμικών και αλγορίθμων στην παραγωγή εικόνας απαλλαγμένης από την ακτινική διαστροφή. Πρόκειται δηλαδή για μια μελέτη, που δεν εστιάζει στη γεωμετρική τεκμηρίωση ενός συγκεκριμένου αντικειμένου, ούτε στη συμπεριφορά ενός οπτικού συστήματος. Αντιθέτως, ασχολείται με τη γεωμετρική διόρθωση μιας απεικόνισης ανεξαρτήτως απεικονιζόμενου αντικειμένου και χρησιμοποιούμενου συστήματος μηχανής-φακού. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι, στην πραγματικότητα, η μελέτη αυτή θα μπορούσε να διεξαχθεί για μια οποιαδήποτε λήψη, ενός οποιουδήποτε αντικειμένου, με ένα οποιοδήποτε οπτικό σύστημα. Ωστόσο, για τις ανάγκες συγκρισιμότητας, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες εικόνες σε όλες τις μελετούμενες μεθόδους απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής, για κάθε μέθοδο αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε.

Όσον αφορά τώρα στην τελική επιλογή του απεικονιζόμενου πεδίου, υπήρχαν κάποιοι περιορισμοί. Ένας περιορισμός που τέθηκε είναι ότι στο απεικονιζόμενο πεδίο θα έπρεπε να υπάρχει η δυνατότητα εύκολου εντοπισμού σημείων αντιστοιχίας και φωτοσταθερών, ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού βαθμονόμησης Calibration_CCD, αλλά και η ευκολότερη στερεοσκοπική επεξεργασία. Ένας άλλος περιορισμός ήταν ότι, θα ήταν καλό να περιλαμβάνονται στις λήψεις γραμμικά στοιχεία προκειμένου να γίνονται οπτικώς αντιληπτές οι οποιεσδήποτε γεωμετρικές διορθώσεις της εικόνας. Έτσι, αποφασίστηκε να παρθούν λήψεις ενός τρισδιάστατου πεδίου βαθμονόμησης. Συγκεκριμένα οι λήψεις έγιναν στο εσωτερικό πεδίο βαθμονόμησης που έχει ιδρυθεί στην αίθουσα σταθερών της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Οι λήψεις για τις διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν έγιναν σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στην πρώτη φωτογράφιση (μια εικόνα) το πεδίο αυτό αποτελούνταν από 12 κατακόρυφους στύλους, ομοιόμορφα κατανεμημένους στο χώρο. Όταν όμως, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη φάση λήψεων (ζεύγος δύο εικόνων), στο πεδίο υπήρχαν 11 τέτοιοι στύλοι. Κάθε ένας από αυτούς τους στύλους φέρει 8 κυκλικούς στόχους (φωτοσταθερά). Οι στόχοι αυτοί είναι μετρημένοι με τοπογραφικές μεθόδους ακριβείας και οι τρισδιάστατες συντεταγμένες τους στο χώρο είναι γνωστές με ακρίβεια 1mm.

Για τις λήψεις χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή DSLR Canon EOS MIII (full frame 21MP), με διαστάσεις format 36mm x 24mm και μέγεθος εικονοψηφίδας (pixel) 6.4μm. Χρησιμοποιήθηκε φακός ονομαστικής εστιακής απόστασης 50mm, και οι λήψεις εκτελέστηκαν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εμπεριέχεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κομμάτι του πεδίου βαθμονόμησης στο οπτικό πεδίο του φακού. Τέλος, το προβολικό κέντρο απέχει περίπου 7.00m από την

κοντινότερη σειρά στύλων και 10.00m από την τελευταία και στις δύο φάσεις της φωτογράφισης. Το ζεύγος εικόνων που χρησιμοποιήθηκε λήφθηκε με βάση περίπου 2.5m δημιουργώντας έτσι έναν λόγο βάση-προς-απόσταση 1:3.5 περίπου.

3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ

3.2.1 Μέθοδος Επεξεργασίας

Τα υπό μελέτη λογισμικά επεξεργασίας εικόνας, όπως αναλύθηκαν και παραπάνω, είναι τα DxO View Point 2, Adobe Photoshop CS5.1, Adobe Photoshop Lightroom 5.3, PTLens και GML Undistorter. Όλα αυτά τα λογισμικά έχουν τη δυνατότητα να διορθώνουν, είτε αυτομάτως είτε χειροκίνητα, την ακτινική διαστροφή. Ωστόσο, η χειροκίνητη διόρθωση που προσφέρουν δεν γίνεται με την παρέμβαση του χρήστη στο γεωμετρικό τους μοντέλο, στις παραμέτρους της ακτινικής διαστροφής ή σε οποιαδήποτε άλλη παράμετρο λαμβάνει υπόψη το κάθε λογισμικό. Αντιθέτως, γίνεται μέσω μιας μπάρας αυξομείωσης της διόρθωσης με ταυτόχρονη προεπισκόπηση της μεταβολής στην εικόνα. Όπως είναι σαφές, με τη μέθοδο αυτή, η ακρίβεια της διόρθωσης εξαρτάται καθαρά από την υποκειμενική αντίληψη του χειριστή, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα. Μπορεί για παράδειγμα να επιβληθεί τόσο μεγάλη διόρθωση βαρελοειδούς ακτινικής διαστροφής, ώστε τελικά να επιβαρυνθεί η εικόνα με μηνοειδή διαστροφή, ή αντιστρόφως. Άλλωστε, τα λογισμικά αυτά αναφέρονται κυρίως σε κοινούς χρήστες, των οποίων το κριτήριο συνήθως είναι καθαρά οπτικά αισθητικό, οπότε ο παραπάνω κίνδυνος μεγαλώνει.

Το κλειδί στον αντίποδα του παραπάνω κινδύνου είναι η διόρθωση της διαστροφής χωρίς υπερβολές με βάση κάποιους αντικειμενικούς κανόνες. Ένας άλλος κίνδυνος που ελλοχεύει είναι το ότι οι κοινοί χρήστες, επειδή ακριβώς εστιάζουν στο αισθητικό αποτέλεσμα, ίσως προσπαθήσουν να διορθώσουν ταυτοχρόνως και άλλες παραμορφώσεις, όπως αυτές της προοπτικής ή της χρωματικής εκτροπής. Εφόσον λοιπόν, στην εργασία αυτή ενδιαφέρει αποκλειστικά και μόνο η διόρθωση της ακτινικής διαστροφής με ακρίβεια και αντικειμενικότητα, αποφασίστηκε να εφαρμοστεί σε όλα τα λογισμικά η αυτόματη διαδικασία.

3.2.2 Τύπος Αρχείων

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαθέσιμες στις μορφές αρχείου εικόνας RAW, TIFF και JPEG. Όλοι αυτοί οι τύποι αρχείου διαθέτουν αρχείο μεταδεδομένων αλλά αποδίδουν εικόνες διαφορετικών χαρακτηριστικών. Αναλυτικότερα, μια εικόνα του τύπου RAW είναι μη συμπιεσμένη, χωρίς να έχει εφαρμοστεί σε αυτήν κάποια μετα-επεξεργασία από το λογισμικό της μηχανής. Έτσι, χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλότερη ποιότητα σε σχέση με την αντίστοιχη JPEG ή TIFF. Παρ' όλ' αυτά ακόμα και μια εικόνα της μορφής TIFF εξασφαλίζει αρκετά καλή ποιότητα εικόνας. Ωστόσο, οι δύο παραπάνω τύποι αρχείου γραφικών (RAW, TIFF) αποδίδουν αρχεία μεγάλου μεγέθους, τα οποία καταλαμβάνουν το χώρο του σκληρού δίσκου πολύ γρήγορα κι έτσι καταλήγουν να είναι δύσχρηστα. Αντιθέτως, ο τύπος JPEG αποδίδει αυτομάτως συμπιεσμένες εικόνες, ελαφρώς μειωμένης ποιότητας, αλλά πολύ μικρότερου μεγέθους, από αυτές που θα απέδιδαν οι μορφές RAW ή TIFF. Δίνεται μάλιστα στο χρήστη η δυνατότητα ρύθμισης του επιπέδου συμπίεσης κατά την αποθήκευση ενός τέτοιου αρχείου, σύμφωνα με τις απαιτήσεις ποιότητας εικόνας και διαθέσιμου

χώρου αποθήκευσης. Τέλος, η μορφή JPEG βρίσκει εφαρμογή σε πολύ περισσότερα προγράμματα επεξεργασίας εικόνων.

Συγκεκριμένα για τις εικόνες αυτής της μελέτης τα αρχεία JPEG έχουν μέγεθος περίπου 9KB, σε αντίθεση με τα περίπου 25 ή 61KB των RAW και TIFF, αντιστοίχως. Επίσης, ο μόνος τύπος αρχείου που υποστηρίζουν όλα τα εξεταζόμενα λογισμικά είναι το JPEG. Για την ακρίβεια, όπως έχει προαναφερθεί, τον τύπο RAW δεν υποστηρίζουν τα GML Undistorter και PTLens ενώ τον TIFF το GML Undistorter. Έτσι, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν εικόνες της μορφής JPEG. Το αρχείο μεταδεδομένων που φέρουν οι εικόνες αυτής της μορφής ονομάζεται EXIF και μέσω αυτού τα λογισμικά ενημερώνονταν αυτομάτως για το σύστημα μηχανής-φακού που χρησιμοποιήθηκε.

3.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, όπως προαναφέρθηκε, επιχειρήθηκε η αξιολόγηση διαφόρων λογισμικών επεξεργασίας εικόνας, σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους στη διόρθωση της ακτινικής διαστρόφης. Ως μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση αυτή, απαιτούνταν ένας αντίστοιχος αλγόριθμος απαλοιφής της ακτινικής διαστρόφης. Ο αλγόριθμος αυτός έπρεπε να είναι γνωστής και ελεγχόμενης ακρίβειας ώστε να εξασφαλιστεί η αντικειμενικότητα και ακρίβεια της σύγκρισης. Έτσι, θεωρήθηκε ασφαλέστερο να αναπτυχθεί εξ αρχής ένας καινούριος αλγόριθμος ώστε να παρέχεται πλήρης έλεγχος των αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος αυτός αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, και παράγεται εικόνα απαλλαγμένη από την ακτινική διαστρόφη. Ωστόσο, μέσω του αλγορίθμου δίνεται και η δυνατότητα διόρθωσης του πρωτεύοντος σημείου, αν αυτό είναι επιθυμητό. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση τιμών χρώματος στην τελική εικόνα γίνεται μέσω μιας διαδικασίας παρεμβολής.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου, των απαιτούμενων δεδομένων και της ακολουθίας διεργασιών του αλγορίθμου.

3.3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

- **Διόρθωση πρωτεύοντος σημείου**

Όσον αφορά στη διόρθωση του πρωτεύοντος σημείου, πρέπει να προηγηθεί της διόρθωσης της ακτινικής διαστρόφης και γίνεται μέσω μιας μετάθεσης του δεξιόστροφου συστήματος αναφοράς της εικόνας από το κέντρο, στο πρωτεύον σημείο της. Για το σκοπό αυτό χρειάζεται να είναι γνωστές οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της αρχικής εικόνας και να συσχετιστούν με αυτές του κέντρου της, μέσω της επόμενης σχέσης: (σχήμα)

$$\begin{aligned}x_H &= j_H - j_K \\y_H &= i_K - i_H\end{aligned}\tag{37}$$

όπου x_H, y_H είναι οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος της αρχικής εικόνας στο δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς με αρχή το κέντρο της εικόνας, i_K, j_K συντεταγμένες του κέντρου της αρχικής εικόνας στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας και i_H, j_H συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της αρχικής εικόνας στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας.

Αντίστοιχη διαδικασία εφαρμόζεται και στη νέα εικόνα, ώστε να βρεθούν οι ανηγμένες, στο δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς με αρχή το κέντρο της νέας εικόνας, εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της, ως εξής:

$$\begin{aligned} x_{HH} &= j_{HH} - j_{KK} \\ y_{HH} &= i_{KK} - i_{HH} \end{aligned} \quad (38)$$

Εάν, ωστόσο, δεν είναι επιθυμητό να γίνει αυτή η διόρθωση, τότε το πρωτεύον σημείο θεωρείται ότι ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας, επομένως, ως εικονοσυντεταγμένες του τίθενται αυτές του κέντρου της εικόνας.

- **Διόρθωση ακτινικής Διαστροφής**

Η διόρθωση της ακτινικής διαστροφής, βασίστηκε στο μαθηματικό μοντέλο του Brown χρησιμοποιώντας δύο πρόσθετες παραμέτρους (K_1, K_2) για την έκφρασή της. Το μοντέλο αυτό εκφράζει ένα μετασχηματισμό της παραμορφωμένης εικόνας στη διορθωμένη, λαμβάνοντας υπόψη την ακτινική διαστροφή (Δr), όπως αυτή ορίζεται, συναρτήσει της ακτινικής απόστασης στην παραμορφωμένη εικόνα (r). Για την ακριβή διόρθωση όμως της ακτινικής διαστροφής, απαιτείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός, συνεπώς απαιτείται η αντιστροφή του μοντέλου του Brown. Επειδή, όπως αναλύθηκε και νωρίτερα, το μοντέλο αυτό δεν είναι αντιστρέψιμο με αναλυτικό τρόπο, πραγματοποιήθηκε ένας προσεγγιστικός προσδιορισμός του. Συγκεκριμένα, υιοθετήθηκε η συνηθισμένη υπόθεση ότι η ακτινική διαστροφή μπορεί να προσδιοριστεί συναρτήσει της ακτινικής απόστασης (rr) των εικονοστοιχείων από το πρωτεύον σημείο, στη διορθωμένη εικόνα, και όχι στην παραμορφωμένη. Έτσι, ο αλγόριθμος σχεδιάστηκε ώστε να διατρέχει τη διορθωμένη εικόνα και για κάθε στοιχείο της να υπολογίζει την ακτινική διαστροφή (Δrr), να υπολογίζει την παραμορφωμένη θέση του (x_{new}, y_{new}) σύμφωνα με αυτήν και να την αντιστοιχίζει με μια θέση στην αδιόρθωτη εικόνα (x, y). Με βάση το παραπάνω σκεπτικό διαμορφώθηκε και χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση για τη διόρθωση της ακτινικής διαστροφής:

$$\begin{aligned} x &= x_{new} + (x_{new} - x_{HH}) * (K_{11}rr^2 + K_{22}rr^4) \\ y &= y_{new} + (y_{new} - y_{HH}) * (K_{11}rr^2 + K_{22}rr^4) \end{aligned} \quad (39)$$

όπου x, y οι εικονοσυντεταγμένες στην αρχική εικόνα, ανηγμένες στο δεξιόστροφο σύστημα με αρχή το κέντρο της εικόνας. Επίσης, x_{new}, y_{new} είναι οι συντεταγμένες κάθε εικονοψηφίδας της νέας εικόνας, ανηγμένες στο δεξιόστροφο σύστημα με αρχή το κέντρο της εικόνας (i_{KK}, j_{KK}), σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$x_{new} = j - j_{KK} \quad \text{και} \quad y_{new} = -i + i_{KK} \quad (40)$$

Ακόμα, x_{HH}, y_{HH} είναι οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της νέας εικόνας, ανηγμένες στο δεξιόστροφο σύστημα με αρχή το κέντρο της εικόνας και K_{11}, K_{22} οι παράμετροι της διαστροφής όπως έχουν οριστεί από τον Brown. Τέλος, η ακτινική απόσταση (rr) κάθε εικονοστοιχείου της νέας εικόνας από το πρωτεύον σημείο αυτής, προσδιορίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$rr = \sqrt{(x_{new} - x_{HH})^2 + (y_{new} - y_{HH})^2} \quad (41)$$

- **Παρεμβολή χρώματος**

Η διόρθωση της ακτινικής διαστροφής γίνεται από τη διορθωμένη στην αδιόρθωτη εικόνα, αντιστοιχίζοντας κάθε εικονοψηφίδα της νέας εικόνας με μια θέση στην παραμορφωμένη. Ωστόσο, η θέση αυτή εν γένει δεν είναι το κέντρο κάποιας

εικονοψηφίδας της αρχικής εικόνα. Έτσι, για την σωστή απόδοση χρώματος σε κάθε εικονοψηφίδα της νέας εικόνας, απαιτείται παρεμβολή στα γειτονικά εικονοστοιχεία της αντίστοιχης (στη αδιόρθωτη εικόνα) θέσης της.

Οι εναλλακτικές επιλογές για το είδος παρεμβολής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι συνήθως του εγγύτερου γείτονα, η διγραμμική και η δικυβική. Επιλέχθηκε να εφαρμοστεί διγραμμική παρεμβολή διότι είναι ακριβέστερη του εγγύτερου γείτονα και υπολογιστικά γρηγορότερη και απλούστερη της δικυβικής. Αναλυτικότερα, η διγραμμική παρεμβολή, λαμβάνει υπόψη τα τέσσερα γειτονικά εικονοστοιχεία και θέτει στις τιμές τους βάρη αντιστρόφως ανάλογα των αποστάσεων τους από την θέση ενδιαφέροντος. Επίσης, στην περίπτωση που κάποια εικονοψηφίδα της νέας εικόνας αντιστοιχεί σε θέση εκτός του περιθώριου της αρχικής, της αποδίδεται μαύρο χρώμα (τιμή 0).

3.3.2 Δεδομένα Αλγορίθμου

Τα δεδομένα που απαιτεί ο αλγόριθμος, πέραν της εικόνας που πρόκειται να διορθωθεί, είναι οι παράμετροι της ακτινικής διαστροφής (K_{11} και K_{22}), οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας (i_H, j_H) και η διαφορά των διαστάσεων (D_i, D_j) της διορθωμένης από αυτές της αδιόρθωτης εικόνας.

Κατ' αρχάς, για τις απαραίτητες πρόσθετες παραμέτρους της ακτινικής διαστροφής και τις εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου απαιτείται να έχει προηγηθεί βαθμονόμηση. Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Calibration_CCD, το οποίο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στηρίζεται επίσης στο μοντέλο ακτινικής διαστροφής του Brown και αποδίδει της παραμέτρους K_1 και K_2 για την έκφρασή της. Βεβαίως, στην περίπτωση που πραγματοποιείται διόρθωση μόνο της ακτινικής διαστροφής (όχι και του πρωτεύοντος σημείου), δεν απαιτούνται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης σχετικά με τις εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου. Αντιθέτως, χρησιμοποιούνται στη θέση τους οι εικονοσυντεταγμένες του κέντρου της αρχικής εικόνας.

Κατά δεύτερον, το άλλο προαπαιτούμενο δεδομένο του αλγορίθμου δηλαδή, η διαφορά των διαστάσεων (D_i, D_j) που θα έχει η νέα εικόνα από αυτές της αρχικής, καθορίζεται από το χρήστη. Η διαφορά αυτή των διαστάσεων των δύο εικόνων προκύπτει διότι η νέα εικόνα διατηρεί την ανάλυση της αρχικής αλλά σε αυτή δεν υπάρχει πλέον η επιρροή (συμπίεση) του φακού. Έτσι, η νέα εικόνα μπορεί να προκύψει μεγαλύτερων ή μικρότερων διαστάσεων της αρχικής, λόγω απαλοιφής βαρελοειδούς ή μηνοειδούς ακτινικής διαστροφής, αντιστοίχως. Για την καθολικότητα του αλγορίθμου (εφαρμογή για κάθε εικόνα και για κάθε μεγέθους ακτινική διαστροφή), δεν χρησιμοποιήθηκε η προκύπτουσα διαφορά των συγκεκριμένων εικόνων αυτής της μελέτης, αλλά, ορίστηκε αυθαίρετα ίση με διακόσιες γραμμές και διακόσιες στήλες (εκατό εκατέρωθεν του κέντρου). Η υπόθεση αυτή είναι υπερβολική αλλά και ικανή να καλύψει περιπτώσεις ακραίων διαστροφών χωρίς απώλεια εικονιστικής πληροφορίας.

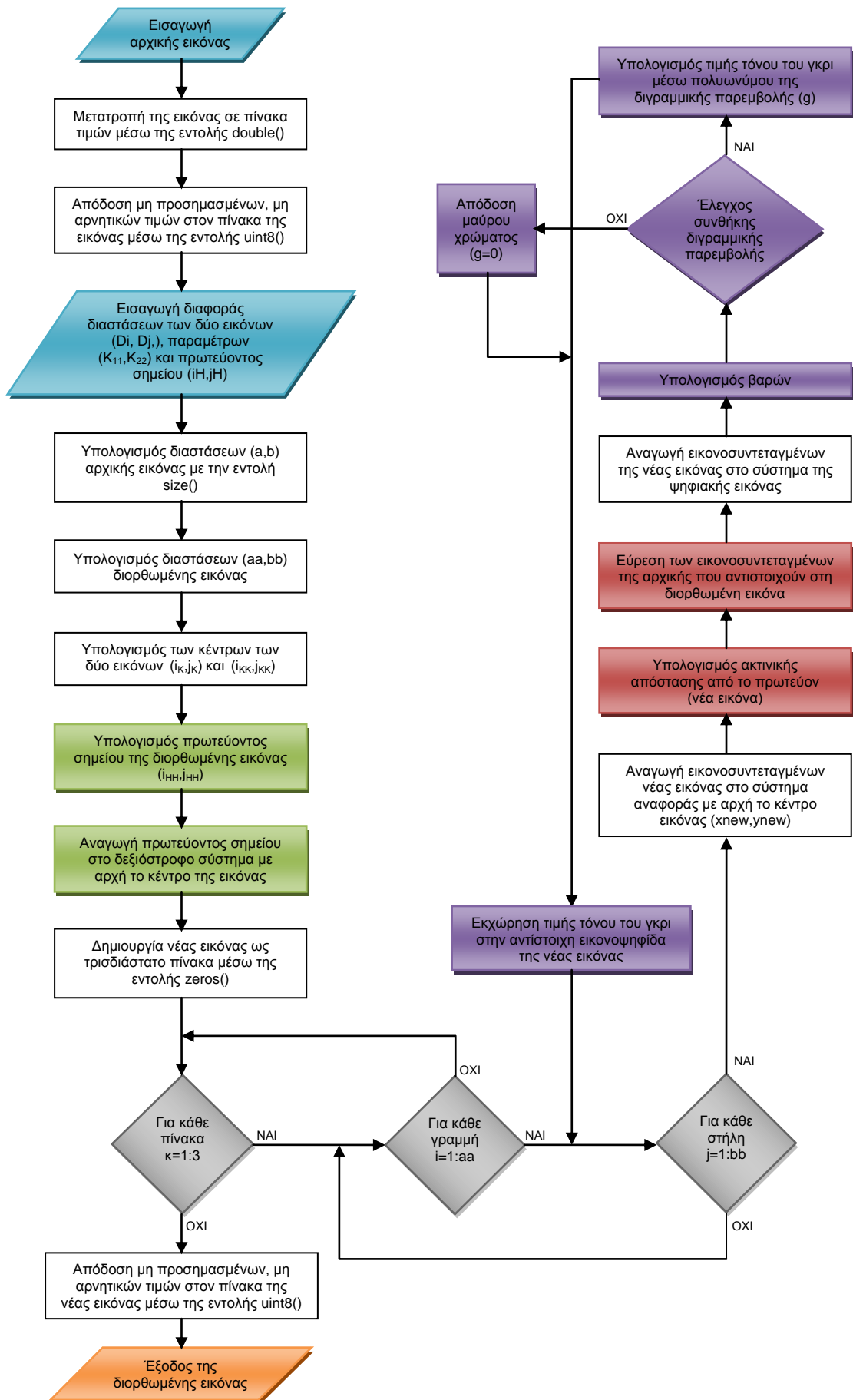
3.3.3 Στάδια Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος διαρθρώνεται από μια ακολουθία διεργασιών που απαρτίζουν τα παρακάτω στάδια επεξεργασίας της αρχικής εικόνας:

- Ο αλγόριθμος «διαβάζει» την παραμορφωμένη εικόνα, η οποία αρχικά, μετασχηματίζεται σε πίνακα τιμών μέσω της εντολής `double()` του Matlab. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται στην εικόνα η εντολή `uint8()` (Unsigned Integers of 8 bits) ώστε να μετατραπούν όλα τα στοιχεία του πίνακα σε μη προσημασμένες και μη αρνητικές ακέραιες τιμές, εύρους από 0 έως και 255.
- Υπολογίζονται οι διαστάσεις της αρχικής εικόνας (a,b) μέσω της εντολής `size()` και σύμφωνα με τη διαφορά των διαστάσεων (Di,Dj) που θα έχει η νέα εικόνα από αυτές της αρχικής (δες ενότητα 3.3.2), υπολογίζονται και οι διαστάσεις της νέας εικόνας (aa,bb), σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$aa = a + Di \text{ και } bb = b + Dj \quad (42)$$

- Υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες των κέντρων των εικόνων στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας. Συγκεκριμένα το κέντρο της αρχικής εικόνας έχει συντεταγμένες: $(i_K, j_K) = (\frac{a}{2}, \frac{b}{2})$ και της νέας: $(i_{KK}, j_{KK}) = (\frac{aa}{2}, \frac{bb}{2})$.
- Βάσει της διαφοράς των διαστάσεων των εικόνων που ορίστηκε παραπάνω και του πρωτεύοντος σημείου της αρχικής εικόνας, υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες, στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας, του πρωτεύοντος σημείου της νέας εικόνας $(i_{HH}, j_{HH}) = (i_H + \frac{Di}{2}, j_H + \frac{Dj}{2})$. Η ίδια σχέση ισχύει είτε έχει επιλεγεί διόρθωση και του πρωτεύοντος σημείου, είτε όχι οπότε και αντί για το πρωτεύον σημείο που υπολογίστηκε μέσω βαθμονόμησης, χρησιμοποιείται το κέντρο της αρχικής εικόνας.
- Γίνεται διόρθωση του πρωτεύοντος σημείου της αρχικής και της νέας εικόνας.
- Δημιουργείται, μέσω της εντολής `zeros()`, ένας μηδενικός πίνακας τριών διαστάσεων που αφορά στη νέα εικόνα. Ουσιαστικά δηλαδή, δημιουργούνται τρεις διδιάστατοι πίνακες με διαστάσεις αυτές που ορίστηκαν νωρίτερα ως διαστάσεις της νέας εικόνας. Ο καθένας από αυτούς τους διδιάστατους πίνακες αντιπροσωπεύει ένα από τα τρία χρώματα: κόκκινο (R), πράσινο (G) και μπλε (B).
- Εξελίσσεται μια επαναληπτική διαδικασία όπου επαναλαμβάνονται τα τρία επόμενα βήματα για κάθε εικονοψηφίδα της νέας εικόνας, μέχρι την ολοκληρωτική συμπλήρωση της.
- Απαλείφεται η ακτινική διαστρόφη.
- Οι αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες (x,y) που βρέθηκαν στην αρχική εικόνα (κατά την απαλοιφή της ακτινικής διαστρόφης), ανάγονται στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας (i,j).
- Εφαρμόζεται διγραμμική παρεμβολή για τις παραπάνω συντεταγμένες της αδιόρθωτης εικόνας, ώστε να γίνει σωστή απόδοση χρώματος στη διορθωμένη.
- Εφαρμόζεται και πάλι η εντολή `uint8`, αλλά στη νέα εικόνα αυτή τη φορά, για την τελική σύνθεση της νέας εικόνας με τη σωστή τελική τιμή χρώματος σε κάθε εικονοψηφίδα της.
- Αποδίδεται και αποθηκεύεται η τελική, διορθωμένη εικόνα.



Παραπάνω παρατέθηκε το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στο οποίο έχουν σημειωθεί με γαλάζιο χρώμα οι εντολές που αφορούν στα απαραίτητα δεδομένα, με πράσινο στη διόρθωση πρωτεύοντος σημείου, με κόκκινο στη διόρθωση ακτινικής διαστροφής, με μοβ στην παρεμβολή, με γκρι στην επαναληπτική διαδικασία και με πορτοκαλί στο τελικό αποτέλεσμα. Οι υπόλοιπες εντολές αφορούν σε μετασχηματισμούς συστημάτων αναφοράς και άλλες εντολές που απαιτούνται από το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab για την επεξεργασία της εικόνας.

4

ΣΥΓΚΡΙΣΗ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πλειθώρα μελετών αξιολόγησης διαφορετικών αλγορίθμων απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής από μια εικόνα [31,46,50,62]. Λίγα ωστόσο, είναι τα παραδείγματα που ασχολούνται με έτοιμα λογισμικά επεξεργασίας εικόνας, είτε ελεύθερα στο διαδίκτυο είτε επί πληρωμή. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι μέθοδοι αξιολόγησης που εφαρμόζονται είναι κυρίως η οπτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και ο υπολογισμός των διαφορών της παραγόμενης εικόνας από μια εικόνα αναφοράς.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, εφαρμόστηκαν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι σύγκρισης και αξιολόγησης των επιδόσεων των λογισμικών και του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Οι μέθοδοι αυτές είναι η οπτική αξιολόγηση των παραγόμενων εικόνων, η αφαίρεση εικόνων, η σύγκριση των καμπυλών της εναπομένουσας ακτινικής διαστροφής και η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τον Προσανατολισμό ζεύγους εικόνων. Για τις τρεις πρώτες μεθόδους χρησιμοποιήθηκε μια κοινή εικόνα του πεδίου βαθμονόμησης, ενώ για την τέταρτη ένα ζεύγος δύο εικόνων του ίδιου πεδίου. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου σύγκρισης ξεχωριστά.

4.1 ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Ακολουθως, παρατίθενται η αρχική, παραμορφωμένη από ακτινική διαστροφή, εικόνα (Εικόνα 4.1) και οι διορθωμένες εικόνες έτσι όπως προέκυψαν από τα διάφορα λογισμικά (Εικόνες 4.2-4.6) και τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας (Εικόνες 4.7-4.8). Φυσικά για λόγους διαχείρισης χώρου εμφανίζονται υπό κλίμακα.



Εικόνα 4.1: Αρχική παραμορφωμένη εικόνα



Εικόνα 4.2: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από την ακτινική διαστρόφη, από το λογισμικό DxO View Point 2



Εικόνα 4.3: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από την ακτινική διαστρόφη, από το λογισμικό Adobe Photoshop CS5.1



Εικόνα 4.4: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από την ακτινική διαστρόφη, από το λογισμικό PTLens:



Εικόνα 4.5: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από ακτινική διαστρόφη, από το λογισμικό Adobe Photoshop Lightroom 5.3



Εικόνα 4.6: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από ακτινική διαστρόφη, από το λογισμικό GML Undistorter



Εικόνα 4.7: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από ακτινική διαστρόφη, από τον αλγόριθμο της εργασίας





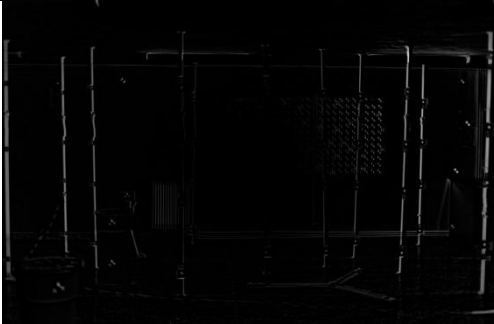

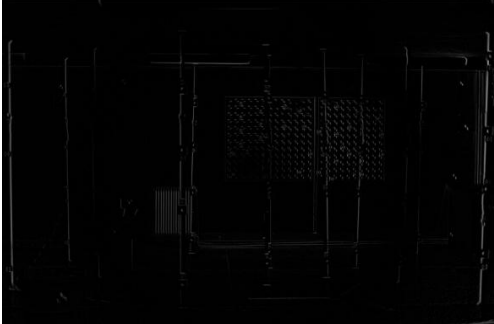

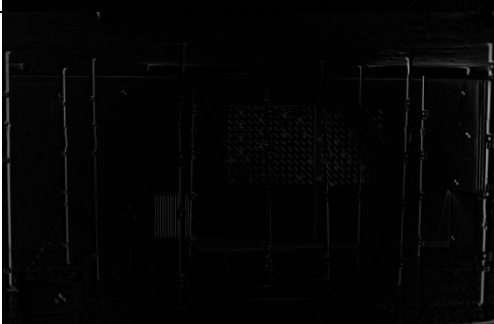


Εικόνα 4.8: Εικόνα διορθωμένη από ακτινική διαστροφή και πρωτεύον σημείο, από τον αλγόριθμο της εργασίας

4.1.1 Συμπεράσματα Οπτικής Σύγκρισης

Αν παρατηρήσει κανείς προσεκτικά μπορεί να αντιληφθεί ότι οι παραγόμενες εικόνες 4.2-4.8, φαίνονται όντως διορθωμένες σε σχέση με τη αρχική 4.1. Δεν είναι βέβαια πολύ προφανής αυτή η διόρθωση, διότι η ενυπάρχουσα, στην αρχική εικόνα, ακτινική διαστροφή δεν είναι μεγάλου μεγέθους. Ωστόσο, η διόρθωση είναι εμφανέστερη στις περιπτώσεις εφαρμογής του αλγορίθμου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγόμενη εικόνα είναι αρκετά μεγαλύτερη (5816x3944) από την αρχική (5616x3744). Συνεπώς, απομένει ένα σύνολο μαύρων εικονοστοιχείων στην περιφέρεια της νέας εικόνας. Έτσι, είναι ορατό το ακριβές καμπυλωμένο περίγραμμα της νέας εικόνας, που κάνει αντιληπτή τη διόρθωση. Μάλιστα, από τον προσανατολισμό της καμπυλότητας των ευθειών του περιγράμματος, αποδεικνύεται ότι η αρχική εικόνα ήταν παραμορφωμένη λόγω βαρελοειδούς ακτινικής διαστροφής. Τέλος, σχετικά με τις δύο εικόνες που έχουν προκύψει από τον αλγόριθμο, μπορεί να γίνει άλλη μια παρατήρηση. Παρατηρώντας πάλι την κατανομή των μαύρων εικονοστοιχείων στο περιθώριο των εικόνων, συμπεραίνεται ότι η εικόνα 4.8 είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω και δεξιά σε σχέση με την 4.7, πράγμα που αποδεικνύει τη διόρθωση του πρωτεύοντος σημείου.

4.2 ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ

Η αφαίρεση των εικόνων αποδίδει μια νέα εικόνα που αποτυπώνει τη διαφορά μεταξύ δύο εικόνων. Έτσι, μπορεί να διαπιστωθεί το ποσοστό μεταβολών που έχουν επιβληθεί σε κάθε περίπτωση στην αρχική εικόνα. Οι αφαιρούμενες εικόνες βεβαίως, πρέπει να είναι ίδιων διαστάσεων, συνεπώς, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή αυτού του κριτηρίου για τη σύγκριση της αρχικής εικόνας, διαστάσεων (5616x3744), με τις εικόνες που έχουν προκύψει από τον αλγόριθμο (5816x3944) και το λογισμικό Dxo View Point 2 (5616x3743). Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις έγινε αφαίρεση των παραχθειςών εικόνων από την αρχική, με τη βοήθεια του Adobe Photoshop CS5.1. Τα αποτελέσματα της αφαίρεσης των εικόνων φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

	Αρχική εικόνα	Εικόνα από λογισμικό	Αποτέλεσμα αφαίρεσης
Adobe Photoshop CS5.1			
PTLens			
Adobe Photoshop Lightroom 5.3			
GML Undistorter			

Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα αφαίρεσης εικόνων

Στις εικόνες που προέκυψαν μετά την αφαίρεση, οι διαφορές των αφαιρούμενων εικόνων εμφανίζονται ως μη μαύρα εικονοστοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι όπου το αποτέλεσμα της αφαίρεσης έχει μαύρο χρώμα, δεν υπάρχουν διαφορές, ενώ όπου εμφανίζονται άλλοι τόνοι του γκρι, υπάρχουν.

4.2.1 Συμπεράσματα από Αφαίρεση Εικόνων

Έτσι, ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το λογισμικό GML Undistorter έδωσε μια εικόνα με πολύ λίγες διαφορές από την αρχική. Συγκεκριμένα, οι διαφορές αυτές είναι αμυδρές και εντοπίζονται στο κομμάτι της εικόνας που απεικονίζεται ένα δισδιάστατο πεδίο βαθμονόμησης, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω στον τοίχο, πίσω από το τρισδιάστατο πεδίο ενδιαφέροντος. Τα υπόλοιπα λογισμικά (Adobe Photoshop CS 5.1, PTLens, Adobe Photoshop Lightroom 5.3), έδωσαν εικόνες με μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις από την αρχική, αλλά και σε διαφορετικές περιοχές της εικόνας. Αυτό, αποδεικνύει ότι τα λογισμικά αυτά υπολογίζουν και διορθώνουν μεγαλύτερα ποσοστά ακτινικής διαστρόφης, αλλά με διαφορετικό τρόπο το καθένα.

Αναλυτικότερα, το Adobe Photoshop CS5.1 φαίνεται να επιφέρει μεγαλύτερες διορθώσεις στην περιφέρεια της εικόνας, διατηρώντας το κέντρο της σχεδόν ανέπαφο. Το PTLens από την άλλη, εφαρμόζει διορθώσεις σε όλη σχεδόν την έκταση της εικόνας, με έμφαση στο κέντρο της, αλλά οι διορθώσεις αυτές είναι μικρότερης έντασης, από αυτές του Adobe Photoshop CS5.1. Αντιθέτως, το Adobe Photoshop Lightroom 5.3, αν και επιφέρει επίσης μεταβολές σε όλη την έκταση της εικόνας, επιμένει περισσότερο στην περιφέρεια. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα δύο λογισμικά της Adobe Photoshop αναμενόταν να έχουν αντίστοιχα αποτελέσματα, λόγω του κοινού μοντέλου και των διεργασιών που ακολουθούν. Ωστόσο, φαίνεται το Lightroom να εμφανίζεται με αρκετή διαφορά από το Photoshop CS ειδικά στο κεντρικό κομμάτι της εικόνας.

Ωστόσο, το ποσοστό και η χωρική έκταση των διορθώσεων δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο αξιοπιστίας των λογισμικών, διότι η ύπαρξη διαφοράς δεν αποτελεί εγγύηση ορθότητας της διόρθωσης. Δηλαδή, δεν είναι γνωστό εάν, για παράδειγμα, οι εικόνες από το Adobe Photoshop Lightroom 5.3 ή το Adobe Photoshop CS5.1 ή το PTLens εμφανίζουν τόσες διαφορές από την αρχική, επειδή το λογισμικό δημιουργίας τους χρησιμοποιεί ένα μοντέλο που υπερβάλλει ή είναι όντως κοντινό της πραγματικότητας. Αντιστοίχως, δεν είναι γνωστό αν το μοντέλο του GML Undistorter υποτιμά την υπάρχουσα, στην αρχική εικόνα, ακτινική διαστρόφη ή όντως βρίσκεται κοντά στην αλήθεια, κι απλώς η αρχική εικόνα έχει πραγματικά πολύ μικρό ποσοστό παραμόρφωσης λόγω ακτινικής διαστρόφης. Το μόνο ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να υιοθετηθεί είναι, ότι όντως τα λογισμικά αυτά διαφοροποιούν την αρχική εικόνα και μάλιστα κατά τον τρόπο που φαίνεται στις εικόνες μετά την αφαίρεση.

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΡΟΦΗΣ

Η τρίτη προσπάθεια σύγκρισης των λογισμικών έγινε με βάση τις καμπύλες για την ακτινική διαστρόφη. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση για όλες τις εξεταζόμενες εικόνες, δηλαδή την αρχική (Εικόνα 4.1) και τις διορθωμένες από τα λογισμικά (Εικόνες 4.2-4.6) και τον αλγόριθμο (Εικόνες 4.7-4.8). Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε και πάλι μέσω του προγράμματος Calibration_CCD, συναρτήσκει τριάντα ενός σημείων αντιστοιχίας, κοινά σε όλες τις εικόνες και σύμφωνα με το παρακάτω μοντέλο ακτινικής διαστρόφης:

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 \quad (43)$$

Ωστόσο, όπως είναι φυσικό και αναμενόμενο, οι διαφορετικές βαθμονομήσεις οδήγησαν σε εντελώς διαφορετικές εκτιμήσεις των ζητούμενων παραμέτρων και

μεγεθών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση των διαφόρων εικόνων.

	c (pixel)	x₀(pixel)	y₀(pixel)	K₁	K₂
Αρχική εικόνα	8089.1776	2784.8797	1858.6171	-2.49240E-09	6.24194E-17
DxO View Point 2	7948.0294	2783.0597	1848.7642	-1.62583E-10	1.11550E-17
Adobe Photoshop CS5.1	8092.5634	2781.2888	1864.0890	1.12310E-010	-1.02040E-17
PTLens	8021.3952	2802.0948	1861.0752	-4.66174E-11	-2.58790E-17
Adobe Photoshop Lightroom 5.3	8056.5452	2746.4680	1859.4514	-4.57503E-10	3.89555E-17
GML Undistorter	8096.2830	2747.0115	1857.5837	-2.54402E-09	7.53151E-17
Undistort LoP	8088.5329	2874.4500	1955.6912	-5.19689E-11	1.06356E-17
Undistort LoP principal	8094.4100	2885.7349	1952.9776	-2.27769E-10	2.78879E-17

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Βαθμονόμησης μέσω του λογισμικού Calibration_CCD

Από τον πίνακα αυτόν παρατηρείται ότι:

- Οι τιμές των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου παρουσιάζουν μια σύγκλιση στις διάφορες εικόνες.
- Συγκλίνουσες τιμές της σταθεράς c της μηχανής αποδίδονται από κάποιες ομάδες εικόνων. Συγκεκριμένα, συγκλίνουν μεταξύ τους οι τιμές που αποδίδουν η αρχική εικόνα και οι εικόνες από τα Adobe Photoshop CS5.1, GML Undistorter, Undistort_LoP και Undistort_LoP principal. Μια άλλη ομάδα συγκλινουσών, αλλά και πολύ μικρότερων των προηγούμενων, τιμών του c προκύπτει για τα DxO View Point 2 και το PTLens, ενώ για το Adobe Photoshop Lightroom 5.3 αποδίδεται μια ενδιάμεση τιμή στη σταθερά της μηχανής.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, η παράμετρος K_2 ορίζεται πάντα, κατά πολλές τάξεις μικρότερη της K_1 και ίδιας τάξης (σε απόλυτη τιμή) για όλες τις εικόνες. Αντιθέτως, στην K_1 υπάρχουν διαφοροποιήσεις σε τρεις τάξεις μεγέθους (σε απόλυτη τιμή).

4.3.1 Βαθμονόμηση Καμπυλών Ακτινικής Διαστροφής

Αποδείχθηκε ότι οι διαφορετικές βαθμονομήσεις οδήγησαν σε διαφορετικούς συνδυασμούς σταθεράς της μηχανής-ακτινικής διαστροφής, πράγμα λογικό αφού υπάρχουν πρακτικά άπειροι τέτοιοι συνδυασμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι οποίοι αποτελούν ισοδύναμες εκφράσεις της συνάρτησης της εικόνας. Οι συνδυασμοί αυτοί ορίζονται με επιλογή της τιμής του c , που ακολούθως αποδίδονται τιμές στην ακτινική διαστροφή, ενώ μια μεταβολή του c κατά Δc , θα επιφέρει αντίστοιχη μεταβολή των τιμών της ακτινικής διαστροφής. Λόγω αυτής της συσχέτισης και αλληλοεξάρτησης του c και της Δr , δεν είναι εύκολη η σύγκριση των καμπυλών που προκύπτουν από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα. Επομένως, οι

προκύπτουσες καμπύλες έπρεπε να βαθμονομηθούν προκειμένου να είναι συγκρίσιμες. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την εύρεση και χρήση της κανονικοποιημένης ακτινικής διαστροφής, η οποία, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, έχει την παρακάτω μορφή:

$$\Delta r' = \Delta r \left(1 + \frac{\Delta c}{c} \right) - \left(\frac{\Delta c}{c} \right) r \quad (5)$$

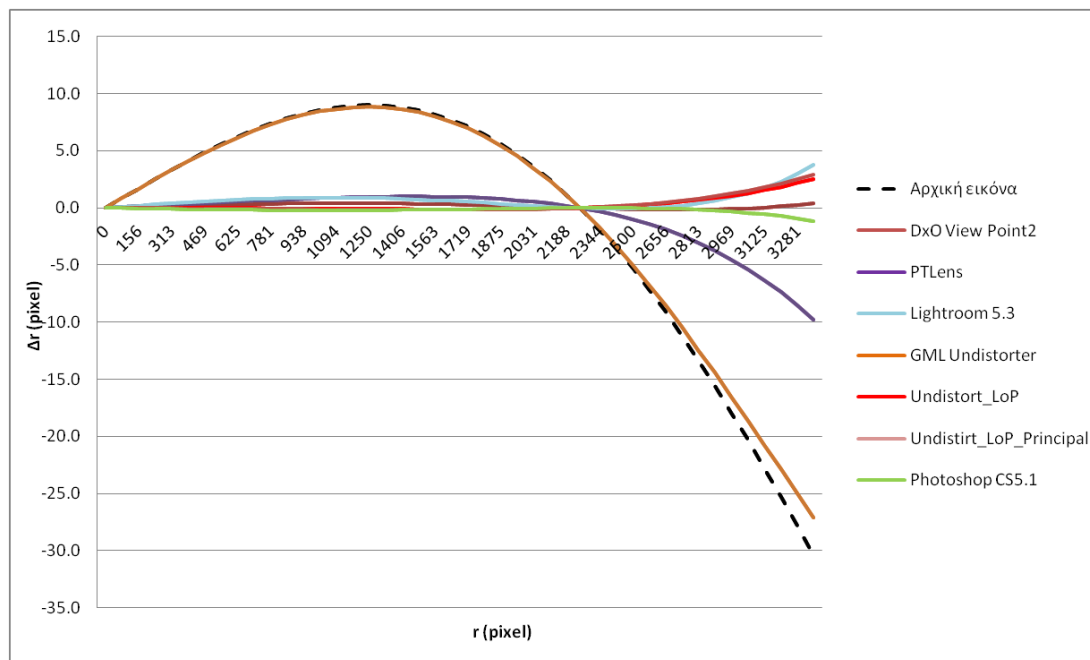
Έτσι, επιχειρήθηκε ο μετασχηματισμός των καμπυλών διαστροφής σε άλλες, με συγκεκριμένες απαιτούμενες ιδιότητες. Ο μετασχηματισμός αυτός πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές γεωμετρικές παραδοχές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ανάλογα διαγράμματα των βαθμονομημένων καμπυλών συναρτήσεως της ακτινικής απόστασης στην εικόνα σε pixel. Το μέγεθος της ακτινικής διαστροφής στα διαγράμματα αυτά, φαίνεται μέσω της καμπυλότητας της γραφικής της παράστασης. Όσο καλύτερα μια γραφική παράσταση προσεγγίζει την ευθεία του άξονα Χ, τόσο λιγότερη ακτινική διαστροφή εκφράζει. Το δόγμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο σύγκρισής τους.

- **Μηδενισμός διαστροφής σε δεδομένη ακτινική απόσταση**

Αρχικά, εφαρμόστηκε ο συνηθέστερος τρόπος, στον οποίο ζητείται ο μηδενισμός της διαστροφής σε κάποια συγκεκριμένη ακτινική απόσταση r_0 , οπότε η μεταβολή του c ορίζεται ως:

$$\Delta c = c \frac{\Delta r_0}{r_0 - \Delta r_0} \quad (6)$$

Η ακτινική απόσταση μηδενισμού της ακτινικής διαστροφής (r_0) επιλέχθηκε ίση με τα $\frac{2}{3}$ της ημιδιαγωνίου της εικόνας και έτσι προέκυψε το επόμενο διάγραμμα:



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα βαθμονομημένων καμπυλών, με μηδενισμό της διαστροφής στα $\frac{2}{3}$ της ημιδιαγωνίου (pixel)

- Ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των τιμών της διαστροφής μέχρι κάποια ακραία ακτινική απόσταση r_0

Επίσης, εφαρμόστηκε κανονικοποίηση της ακτινικής διαστροφής με τον περιορισμό να μηδενίζεται ή να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των τιμών της διαστροφής, μέχρι κάποια ακραία ακτινική απόσταση r_0 . Η απαίτηση αυτή μεταφράζεται στην ελαχιστοποίηση της τιμής του ορισμένου, από 0 έως r_0 , ολοκληρώματος της κανονικοποιημένης διαστροφής, δηλαδή του παρακάτω:

$$D = \int_0^{r_0} [\Delta r(1 + e) - er]^2 dr \quad (7)$$

όπου, $e = \frac{\Delta c}{c}$. Το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να εκφραστεί και ως άθροισμα ορισμένων ολοκληρωμάτων σύμφωνα με τη σχέση

$$D = (1 + e)^2 D_1 - 2(1 + e)e D_2 + e^2 D_3 \quad (44)$$

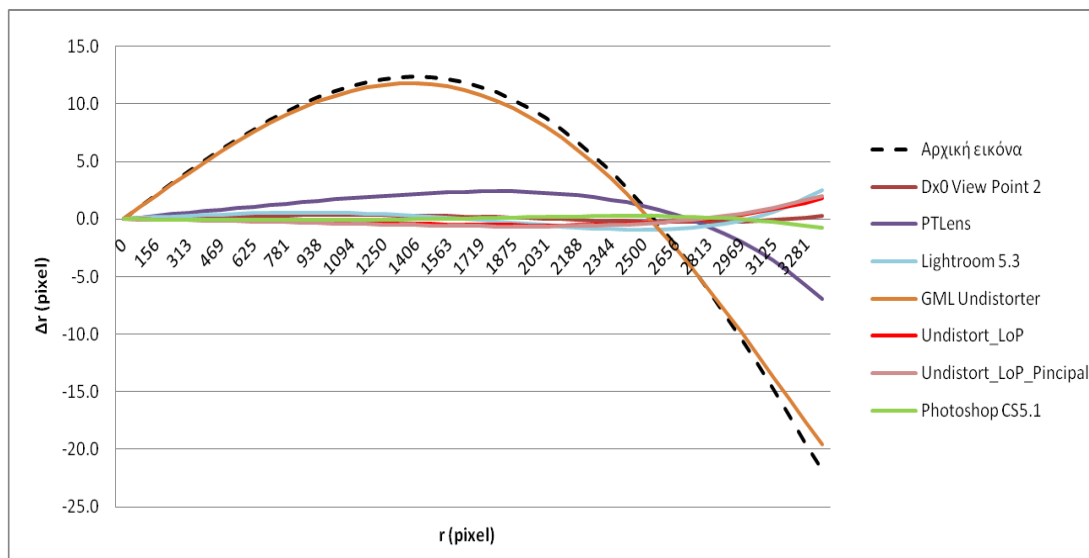
όπου, τα επιμέρους ορισμένα ολοκληρώματα ισούνται με:

$$D_1 = \int_0^{r_0} (\Delta r)^2 dr, \quad D_2 = \int_0^{r_0} (r \Delta r) dr \quad \text{και} \quad D_3 = \int_0^{r_0} (r)^2 dr \quad (45)$$

Όπως έχει αποδειχθεί από τον Καρρά [135], η τιμή του D (μέση τετραγωνική ακτινική διαστροφή σε ολόκληρο το πεδίο μέχρι r_0) ελαχιστοποιείται όταν μηδενίζεται η παράγωγος του ως προς $\frac{\Delta c}{c}$, δηλαδή τελικά για:

$$\Delta c = \frac{c(D_2 - D_1)}{D_1 - 2D_2 + D_3} \quad (46)$$

Με αυτή την ιδιότητα λοιπόν και με τον ορισμό του $r_0=3374$ pixel πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των καμπυλών της ακτινικής διαστροφής, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα.

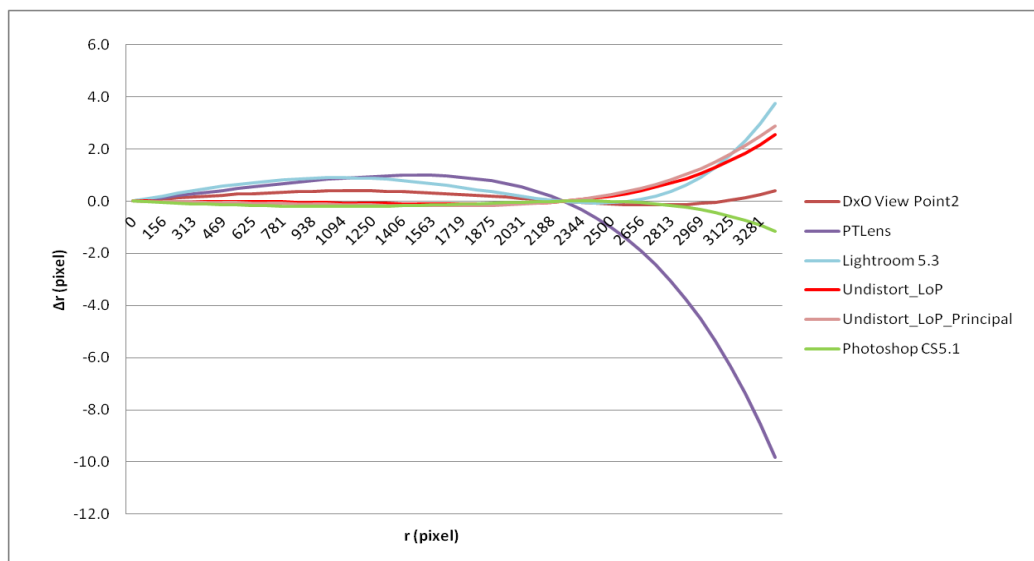


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα βαθμονομημένων καμπυλών, με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των τιμών της διαστροφής μέχρι το r_0 (pixel)

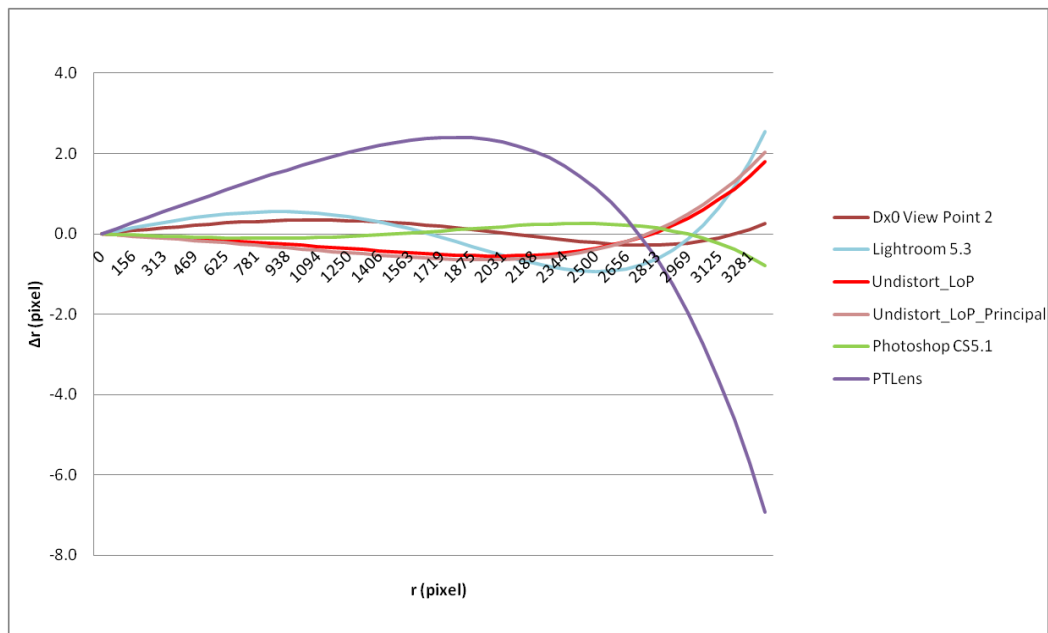
4.3.2 Συμπεράσματα από Σύγκριση Βαθμονομημένων Καμπυλών

Γενικώς, διαπιστώνεται ότι και οι δύο διαδικασίες βαθμονόμησης των καμπυλών δίνουν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις της ακτινικής διαστρόφης, συναρτήσεως της ακτινικής απόστασης πάνω στην εικόνα, φαίνεται να καταδεικνύουν ότι η εναπομένουσα ακτινική διαστρόφη είναι συγκρίσιμου μεγέθους για τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής και των λογισμικών. Μοναδική εξαίρεση σε αυτό αποτελεί το λογισμικό GML Undistorter, το οποίο φαίνεται να μην είναι καθόλου αποδοτικό στην απαλοιφή της ακτινικής διαστρόφης, καθώς η εναπομένουσα στην εικόνα διαστρόφη μετά την επεξεργασία της, σχεδόν ταυτίζεται με τη διαστρόφη της αρχικής εικόνας.

Ωστόσο, δεν δίνεται σαφής εικόνα για την αξιολόγηση και κατάταξη των λογισμικών, που φαίνονται αρχικά να παρουσιάζουν θετικά αποτελέσματα. Για τη διευκόλυνση αξιολόγησής τους θα εξεταστούν οι γραφικές τους παραστάσεις, χωριστά από αυτές των GML και των αρχικών εικόνων, ώστε να παρουσιάζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα. Έτσι, οι συσχετισμοί των αποτελεσμάτων των λογισμικών και του αλγορίθμου της εργασίας, σχετικά με την απαλοιφή της ακτινικής διαστρόφης, είναι πιο ευδιάκριτοι και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ορισμένων βαθμονομημένων καμπυλών, με μηδενισμό της διαστρόφης στα 2/3 της ημιδιαγωνίου (pixel)



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ορισμένων βαθμονομημένων καμπυλών, με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των τιμών της διαστρωφής μέχρι το r_0 (pixel)

Από τα παραπάνω σχήματα (σχήμα 4.4, 4.5) μπορεί με επιφύλαξη να ειπωθεί ότι το PTLens φαίνεται να εμφανίζει τη χειρότερη εικόνα, με τα υπόλοιπα λογισμικά (DxO View Point 2, Adobe Photoshop CS5.1, Lightroom5.3) και τον αλγόριθμο της εργασίας να είναι σχεδόν ισοδύναμα και δύσκολα διαβαθμίσιμα.

Συνοψίζοντας, το GML Undistorter είναι το λογισμικό που μεταξύ των ανωτέρω συγκρινόμενων έχει τα λιγότερο καλά αποτελέσματα. Αρκετά καλύτερα εμφανίζονται τα αποτελέσματα απαλοφής της διαστρωφής στο PTLens και τέλος, πολύ καλύτερα και σχεδόν ταυτιζόμενα αυτά των DxO View Point 2, Adobe Photoshop CS5.1, Lightroom 5.3 και του αλγορίθμου της εργασίας.

4.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Η τελική αξιολόγηση των λογισμικών πραγματοποιήθηκε με τη λήψη, την επεξεργασία και τη συνόρθωση ενός ζεύγους εικόνων σε έναν Ψηφιακό Φωτογραμμετρικό Σταθμό. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ασφαλή, αντικειμενική και ακριβή ποσοτική μέθοδο αξιολόγησης, καθώς γίνεται μέσω της σύγκρισης αριθμητικών αποτελεσμάτων της συνόρθωσης.

Σε αυτή την εργασία, οι συνορθώσεις των ζευγών πραγματοποιήθηκαν στο σύνολό τους μέσω του λογισμικού Photomod της Racurs®, όπου πραγματοποιήθηκε αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού και επίλυση του ζεύγους με συνόρθωση δέσμης. Η επιθυμητή σύγκριση στηρίχτηκε στα αποτελέσματα της συνόρθωσης σχετικά με τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) που προκύπτουν αυτομάτως από το χρησιμοποιούμενο ΨΦΣ.

Οι εικόνες του χρησιμοποιούμενου ζεύγους απεικόνιζαν και πάλι το τρισδιάστατο πεδίο βαθμονόμησης της αίθουσας σταθερών. Εισήχθησαν ξεχωριστά στα διάφορα λογισμικά, ώστε κάθε εικόνα του ζεύγους να διορθωθεί από την ακτινική διαστρωφή και τελικά να προκύψει από κάθε λογισμικό, ένα ζεύγος εικόνων απαλλαγμένων από την ακτινική διαστρωφή. Η ίδια διαδικασία διεκπεραιώθηκε και για τους

προτεινόμενους από την εργασία αλγορίθμους, για διόρθωση ακτινικής διαστρόφης και πρωτεύοντος σημείου. Έτσι, δημιουργήθηκαν επτά ζεύγη εικόνων (5 ζεύγη από τα πέντε λογισμικά και 2 από τους αλγορίθμους), με σκοπό σε αυτά να πραγματοποιηθεί συνόρθωση δέσμης και να υπολογιστούν τα παραγόμενα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS). Συμπληρωματικά με τα παραπάνω ζεύγη εικόνων δημιουργήθηκαν άλλα τρία ζεύγη, τα οποία να μην περιείχαν όλα τις ίδιες εικόνες (αρχικές εικόνες χωρίς διόρθωση της ακτινικής διαστρόφης), αλλά η επίλυσή τους λάμβανε υπόψη διαφορετικά δεδομένα σχετικά με τις παραμέτρους του Εσωτερικού Προσανατολισμού.

4.4.1 Αποκατάσταση Εσωτερικού Προσανατολισμού

Αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού νοείται ως η ανάπλαση της δέσμης ακτίνων μιας εικόνας. Για τη διαδικασία αυτή απαιτείται, από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα, η εισαγωγή των αντίστοιχων στοιχείων, δηλαδή της σταθεράς της μηχανής, των εικονοσυντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου και των παραμέτρων της ακτινικής διαστρόφης. Τα στοιχεία αυτά διαφέρουν στα διάφορα ζεύγη που εξετάστηκαν και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Κατ' αρχάς, όσον αφορά στα διάφορα λογισμικά και στον αλγόριθμο της εργασίας, θεωρήθηκε ότι το πρωτεύον σημείο ταυτίζεται με το κέντρο της εικόνας και ότι οι εικόνες είναι διορθωμένες από ακτινική διαστρόφη, συνεπώς οι παράμετροί της τέθηκαν μηδενικές. Σχετικά με τη σταθερά της μηχανής για τις εικόνες των λογισμικών, λήφθηκε η τιμή από το αρχείο μεταδεδωμένων, συνεπώς πρόκειται για την ονομαστική εστιακή απόσταση. Αντίθετα, όσον αφορά στον αλγόριθμο (και για τις δύο εφαρμογές του, με ή χωρίς διόρθωση πρωτεύοντος σημείου) πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και στις δύο εικόνες και τελικώς, ως σταθερά της μηχανής θεωρήθηκε ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των βαθμονομήσεων των δύο εικόνων. Τώρα σχετικά με τα τρία ζεύγη εικόνων που προαναφέρθηκε ότι χρησιμοποιήθηκαν αξιοποιώντας τις ίδιες εικόνες αλλά με διαφορετικές παραδοχές για τον Εσωτερικό Προσανατολισμό, χρησιμοποιήθηκαν φυσικά, διαφορετικά στοιχεία. Συγκεκριμένα, στα δύο απ' αυτά τα ζεύγη, οι παράμετροι του Εσωτερικού Προσανατολισμού θεωρούνταν άγνωστοι κι έτσι στο ένα ζεύγος πραγματοποιήθηκε αυτοβαθμονόμηση μέσω του λογισμικού Photomod, ενώ στο άλλο όχι, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από το αρχείο μεταδεδωμένων. Για το τελευταίο ζεύγος, οι παράμετροι του Εσωτερικού Προσανατολισμού προσδιορίστηκαν κατόπιν βαθμονόμησης μέσω του λογισμικού CCD_Calibration και συνεπώς, θεωρήθηκαν γνωστές.

Συνοπτικά τα ζεύγη εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα παρακάτω:

- Αρχικές εικόνες με γνωστό Εσωτερικό Προσανατολισμό από βαθμονόμηση
- Αρχικές εικόνες με άγνωστο Εσωτερικό Προσανατολισμό
- Αρχικές εικόνες με αυτοβαθμονόμηση
- Παραγόμενες, από το DxO ViewPoint 2 εικόνες, χωρίς Εσωτερικό Προσανατολισμό
- Παραγόμενες, από το Adobe Photoshop CS 5.1 εικόνες, χωρίς Εσωτερικό Προσανατολισμό
- Παραγόμενες, από το PTLens εικόνες, χωρίς Εσωτερικό Προσανατολισμό
- Παραγόμενες, από το Adobe Photoshop Lightroom 5.3 εικόνες, χωρίς Εσωτερικό Προσανατολισμό
- Παραγόμενες, από το GML Undistorter εικόνες, χωρίς Εσωτερικό Προσανατολισμό
- Παραγόμενες, από τον αλγόριθμο διόρθωσης ακτινικής διαστρόφης εικόνες, με γνωστή σταθερά της μηχανής

- Παραγόμενες, από τον αλγόριθμο διόρθωσης ακτινικής διαστρώσης και πρωτεύοντος σημείου εικόνες, με γνωστή σταθερά της μηχανής

Οι παράμετροι που εισήχθησαν στο πρόγραμμα για την αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού των ζευγών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

(pixel)	c	x ₀	y ₀	K ₁	K ₂
Αρχικές εικόνες χωρίς στοιχεία	7812.5	0	0	0	0
Αρχικές εικόνες με βαθμονόμηση	8113.9103	-20.1636	-27.2605	-2.67113E-09	8.43865E-17
Αρχικές εικόνες με αυτοβαθμονόμηση					
DxO View Point 2	7812.5	0	0	0	0
Adobe Photoshop CS 5.1	7812.5	0	0	0	0
PTLens	7812.5	0	0	0	0
Adobe Photoshop Lightroom 5.3	7812.5	0	0	0	0
GML Undistorter	7812.5	0	0	0	0
Undistort LoP	8113.9103	0	0	0	0
Undistort LoP Principal	8113.9103	0	0	0	0

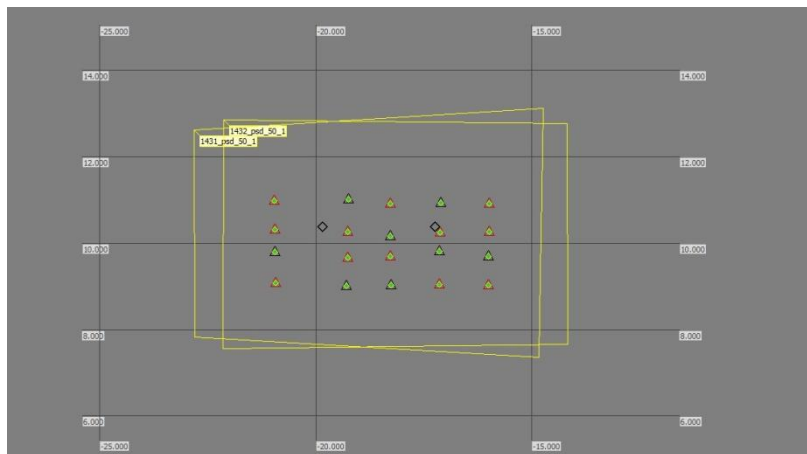
Πίνακας 4.2: Παράμετροι για την αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού στα διάφορα ζεύγη εικόνων

4.4.2 Συνόρθωση Δέσμης

Για την επίλυση των Προσανατολισμών των ζευγών επιλέχθηκε η μέθοδος της συνόρθωσης δέσμης. Μέσω της μεθόδου αυτής επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη αποκατάσταση της γεωμετρίας λήψης, η διασφάλιση της στερεοσκοπικής όρασης, ο συσχετισμός των ζευγών με το γεωδαιτικό δίκτυο και ο προσδιορισμός της κατάλληλης κλίμακας και θέσης του πεδίου. Απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας βεβαίως, ήταν μέσω αυτής της μεθόδου να προσδιοριστεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κάθε ζεύγους σε κάθε διεύθυνση, για την επίτευξη της επιθυμητής αξιολόγησης των διάφορων μεθόδων απαλοιφής της ακτινικής διαστρώσης. Αυτό οδήγησε και στη χρήση παραπάνω σημείων από τα θεωρητικώς απαραίτητα.

Η διαδικασία συνόρθωσης δέσμης που ακολουθήθηκε είναι όμοια για όλα τα ζεύγη εικόνων. Μάλιστα, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια σημεία σε όλα τα ζεύγη προκειμένου να εξασφαλιστεί η αντικειμενικότητα της σύγκρισής τους. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 20 σημεία των οποίων οι γεωδαιτικές συντεταγμένες ήταν γνωστές με ακρίβεια 0.001m. Για την ακρίβεια, τα 12 από αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως φωτοσταθερά και τα 8 ως σημεία ελέγχου, αφού θεωρήθηκαν ένα ικανοποιητικό και αντιπροσωπευτικό δείγμα σημείων για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν ώστε να είναι κατά το δυνατόν ομοιόμορφα καταναμημένα σε όλη την έκταση του επικαλυπτόμενου, το οποίο βέβαια κάλυπτε σχεδόν το σύνολο κάθε

εικόνας, λόγω της πολύ μεγάλης επικάλυψης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα σκαρίφιμα των σκοπευμένων σημείων σε ένα από τα ζεύγη εικόνων, όπου με κόκκινο τρίγωνο συμβολίζονται τα φωτοσταθερά και με μαύρο τα σημεία ελέγχου.



Εικόνα 4.9: Σκαρίφιμα κατανομής φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου σε ζεύγος εικόνων

4.4.3 Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square error)

Όπως έχει προαναφερθεί η εξεταζόμενη διαδικασία αξιολόγησης των λογισμικών, θέτει ως κριτήριο το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) της συνόρθωσης κάθε ζεύγους εικόνων, σε όλες τις διευθύνσεις. Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός αυτού του σφάλματος απαιτείται η α priori εκτίμηση του σφάλματος σκόπευσης. Για μετρήσεις από ποιοτικές εικόνες η τιμή της ακρίβειας μέτρησης τίθεται 0.5pixel. Η εκτίμηση αυτή υιοθετήθηκε και στην περίπτωση της παρούσας μελέτης. Το σφάλμα αυτό, όπως προδίδει και το όνομα του, σχετίζεται με το μέσο σφάλμα και υπακούει στην παρακάτω σχέση:

$$RMS \approx \sqrt{2} E_{mean} \quad (47)$$

Η τιμή του σε κάθε διεύθυνση χωριστά είναι:

$$RMS_X = \sqrt{\frac{\sum (X_m - X_g)^2}{n}}$$

$$RMS_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_g)^2}{n}} \quad (48)$$

$$RMS_Z = \sqrt{\frac{\sum (Z_m - Z_g)^2}{n}}$$

όπου, X_m, Y_m, Z_m είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες όπως υπολογίστηκαν κατά τη συνόρθωση και X_g, Y_g, Z_g γεωδαιτικές συντεταγμένες όπως αυτές έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα από το χρήστη.

4.4.4 Αποδεκτή τιμή RMS

Οι περιορισμοί που τίθενται για την αξιολόγηση του RMS έχουν άμεση σχέση με τη γεωμετρία του εκάστοτε μοντέλου, καθώς εξαρτώνται κυρίως από την βέλτιστη δυνατή ακρίβεια του τελικού προϊόντος, βάσει της ακρίβειας σκόπευσης και του μεγέθους της εδαφοψηφίδας. Είναι λοιπόν σαφές ότι, για τον προσδιορισμό της αποδεκτής τιμής RMS απαιτείται ο υπολογισμός του μεγέθους της εδαφοψηφίδας, για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Το μέγεθος του εικονοστοιχείου του αισθητήρα (6.4μm*6.4μm)
- Η κλίμακα των εικόνων. Το απεικονιζόμενο πεδίο έχει από 7 έως και 10m απόσταση από το προβολικό κέντρο (απόσταση λήψης) και η εστιακή απόσταση ισούται με 50mm. Έτσι, η κλίμακα των εικόνων ορίζεται σε ένα εύρος από 1:140 έως 1:200, βάσει της σχέσης $\frac{1}{k_p} = \frac{c}{H}$.

Επιλέχθηκε να προσδιοριστεί το μέγεθος της εδαφοψηφίδας με βάση τη μικρότερη κλίμακα (1:200) και σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_g = P_p * k_p \quad (49)$$

όπου, k_p , P_p ο συντελεστής κλίμακας και το μέγεθος εικονοστοιχείου της εικόνας και P_g το μέγεθος της εδαφοψηφίδας.

Έτσι, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας ορίστηκε ίσο με $P_g=6.4\mu\text{m}*200=1.3\text{mm}$. Συνεκτιμώντας το ότι η ακρίβεια σκόπευσης έχει οριστεί ίση με 0.5 pixel, συμπεραίνεται ότι το αποδεκτό οριζοντιογραφικό RMS ισοδυναμεί κατ' απόλυτη τιμή με $0.5*1.3\text{mm}=0.65\text{mm}$. Χονδρικά, βεβαίως, μπορεί να θεωρηθεί και ίσο με 1mm.

4.4.5 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται τα τελικά RMS της συνόρθωσης σε όλα τα ζεύγη εικόνων, για τα φωτοσταθερά και τα σημεία ελέγχου. Αυτά είναι τα στοιχεία βάση των οποίων επιλέχθηκε να γίνει η αξιολόγηση των λογισμικών σε αυτή τη μέθοδο.

Συγκεκριμένα ο πρώτος πίνακας αποδίδει τα αποτελέσματα σχετικά με τα φωτοσταθερά, ενώ ο δεύτερος αυτά σχετικά με τα σημεία ελέγχου. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων βεβαίως, τα στοιχεία που λαμβάνονται κυρίως υπόψη είναι αυτά των σημείων ελέγχου.

(mm)	RMS _x	RMS _y	RMS _z	Αποδεκτή τιμή RMS
Αρχικές εικόνες χωρίς στοιχεία	1.56	1.22	1.45	0.65
Αρχικές εικόνες με βαθμονόμηση	0.47	0.35	0.13	0.65
Αρχικές εικόνες με αυτοβαθμονόμηση	0.30	0.19	0.12	0.65

DxO View Point 2	0.79	0.39	0.12	0.65
Adobe Photoshop CS 5.1	1.17	0.82	0.18	0.65
PTLens	0.83	0.51	0.13	0.65
Adobe Photoshop Lightroom 5.3	1.21	1.47	0.43	0.65
GML Undistorter	1.47	1.17	1.34	0.65
Undistort LoP	0.31	0.23	0.14	0.65
Undistort LoP Principal	0.19	0.22	0.09	0.65

Πίνακας 4.3: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των φωτοσταθερών

(mm)	RMS _x	RMS _y	RMS _z	Αποδεκτή τιμή RMS
Αρχικές εικόνες χωρίς στοιχεία	2.03	1.71	25.90	0.65
Αρχικές εικόνες με βαθμονόμηση	0.68	0.38	2.81	0.65
Αρχικές εικόνες με αυτοβαθμονόμηση	0.36	0.45	2.76	0.65
DxO View Point 2	0.89	0.75	1.19	0.65
Adobe Photoshop CS 5.1	1.75	1.49	4.73	0.65
PTLens	1.59	1.15	3.45	0.65
Adobe Photoshop Lightroom 5.3	1.28	1.76	4.14	0.65
GML Undistorter	2.11	1.62	26.30	0.65
Undistort LoP	0.33	0.34	1.44	0.65
Undistort LoP Principal	0.29	0.28	1.30	0.65

Πίνακας 4.4: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των σημείων ελέγχου

Στους παραπάνω πίνακες έχουν επισημανθεί με κόκκινο χρώμα τα αποτελέσματα που υπερβαίνουν το αποδεκτό όριο, όπως αυτό ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Μερικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν πάνω στα παραπάνω δεδομένα είναι ότι:

- Παρατηρείται μια γενικότερη αδυναμία στην υψομετρική ακρίβεια, σε σχέση με την οριζοντιογραφική. Το φαινόμενο όμως αυτό είναι δικαιολογημένο γιατί

η υψομετρική ακρίβεια ούτως ή άλλως είναι χειρότερη της οριζοντιογραφικής στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές

- Τα σφάλματα κατά την X και Y διάσταση σε κάθε ζεύγος είναι αντιστοίχων μεγεθών.
- Τα σφάλματα των φωτοσταθερών είναι μικρότερα από αυτά των σημείων ελέγχου, όπως είναι προφανές, αφού βάσει αυτών (των φωτοσταθερών) κι όχι των σημείων ελέγχου, επιλύεται η συνόρθωση. Η διαφορά όμως αυτή δεν είναι μεγάλη και κυμαίνεται στο 5%-40% περίπου των σφαλμάτων των σημείων ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα:

- Τα μικρότερα σφάλματα προκύπτουν για τις αρχικές εικόνες κατόπιν αυτοβαθμονόμησης και για τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία. Τα σφάλματα αυτών μάλιστα ισούνται περίπου με το μισό του αποδεκτού ορίου, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αλγορίθμων και τη δυναμική της συνόρθωσης που εκτελείται κατά την αυτοβαθμονόμηση.
- Τη μεγαλύτερη ακρίβεια όλων, με μικρή βέβαια διαφορά, εμφανίζει ο αλγόριθμος που διορθώνει το πρωτεύον σημείο.
- Ελαφρώς μεγαλύτερα RMS αλλά και πάλι μικρότερα του ορίου, προκύπτουν για το ζεύγος των αρχικών εικόνων στο οποίο η αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού έγινε με στοιχεία βαθμονόμησης.
- Επόμενο σε ακρίβεια ζεύγος είναι αυτό που έχει παραχθεί από το DxO. Τα σφάλματά του υπερβαίνουν κατά τι το καθορισμένο όριο, παραμένοντας όμως μικρότερα του 1mm. Έτσι, μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτά.
- Σε αντιδιαστολή με τα προηγούμενα, απογοητευτική είναι η εικόνα του GML Undistorter και φυσικά των αρχικών εικόνων χωρίς στοιχεία Εσωτερικού Προσανατολισμού, με τα οριζοντιογραφικά RMS τους να φτάνουν ή και να ξεπερνούν το τριπλάσιο του αποδεκτού ορίου.
- Τα υπόλοιπα λογισμικά (Lightroom 5.3, PTLens, Photoshop CS5.1), κινούνται γύρω και λίγο παραπάνω από το διπλάσιο του ορίου. Ωστόσο, με την χοντρική θεώρηση 1mm που μπορεί να γίνει, μπορεί να είναι και πάλι εκτός του περιορισμού αλλά αναλόγως με την εφαρμογή, ίσως μπορούν να γίνουν δεκτά. Πάντως, σίγουρα η εικόνα τους είναι αρκετά θετική.

5

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

5.1 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα μελέτη αναδείχθηκαν τα χαρακτηριστικά και η αξιοπιστία των εξεταζόμενων εμπορικών ή ελεύθερων λογισμικών, σχετικά με την ικανότητα απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής από τις εικόνες. Έτσι, τα χαρακτηριστικά τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Πρόκειται για λογισμικά που στην πλειονότητά τους (εκτός του GML Undistorter) φαίνεται να παρουσιάζουν πολύ θετικά αποτελέσματα αναλόγως βέβαια με την απαιτούμενη ακρίβεια. Χαρακτηριστικό είναι πάντως ότι για τις εικόνες που έχουν προκύψει από αυτά τα λογισμικά (και ειδικά από το DxO) η προκύπτουσα ακρίβεια μετά τη συνόρθωση είναι σχεδόν αντίστοιχη αυτής της κλασικής φωτογραμμετρικής μεθόδου, όπου δεν πραγματοποιείται διόρθωση κάθε μεμονωμένης εικόνας αλλά βαθμονόμηση και μετέπειτα Προσανατολισμός του μπλοκ.
- Η επίδοσή τους φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ακόμα και σε ακραίες τιμές ακτινικής διαστροφής (υπερευρυγώνιοι φακοί). Ειδικά το PTLens ισχυρίζεται ότι υποστηρίζει και αρχιτεκτονικούς φακούς.
- Φυσικά η επίδοσή τους εξαρτάται απόλυτα από το αν το χρησιμοποιούμενο σύστημα μηχανής-φακού εμπεριέχεται στη βάση δεδομένων τους. Σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα που αποδίδουν είναι υποδεέστερης ορθότητας.
- Τα περισσότερα από αυτά δεν περιορίζονται στη διόρθωση μόνο της ακτινικής διαστροφής. Αντιθέτως, προσφέρουν τη δυνατότητα διόρθωσης και άλλων παραμορφώσεων ή γενικότερης επεξεργασίας της εικόνας (περικοπή, κλίμακα, φίλτρα, αφαίρεση ή πρόσθεση στοιχείων, κ.ά.). Αυτό βεβαίως, οδηγεί και στην παρέμβασή τους πάνω στην ανάλυση της εικόνας (ειδικά το PTLens).
- Είναι πολύ εύχρηστα λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα μεγάλο εύρος χρηστών όχι κατ' ανάγκη ενημερωμένων σε θέματα διόρθωσης της γεωμετρίας των φακών. Όσον αφορά βέβαια στη σωστή διόρθωση της ακτινικής διαστροφής είναι αναγκαίο ο χρήστης να έχει γνώση του φαινομένου και των διεργασιών που μπορεί να εκτελέσει μέσα από αυτά τα λογισμικά. Μόνο έτσι μπορεί να εξασφαλιστεί η ακριβέστερη και ορθότερη (για τα δεδομένα του λογισμικού) απαλοιφή της ακτινικής διαστροφής.
- Δεν είναι στατικά, αλλά συνεχώς εξελίσσονται, βελτιώνονται και ανανεώνονται. Ειδικώς σχετικά με την ακτινική διαστροφή, η βάση δεδομένων των διατιθέμενων μοντέλων μηχανής-φακού, εμπλουτίζεται από έκδοση σε

έκδοση, παρακολουθώντας έτσι τις εξελίξεις της τεχνολογίας και τα σύγχρονα οπτικά μέσα της αγοράς.

5.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Τελικώς τα λογισμικά αυτά φαίνονται να παρέχουν μια πολύ ικανοποιητική ακρίβεια σε συνδυασμό με πολύ μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας. Έτσι, τα περισσότερα από αυτά κρίνονται κατάλληλα για την αντιμετώπιση της ακτινικής διαστροφής και ειδικά σε εφαρμογές που ο διαθέσιμος χρόνος είναι περιορισμένος ή απαιτείται η γεωμετρική τεκμηρίωση του συνόλου μια μεγάλης έκτασης περιοχής αλλά ταυτοχρόνως και κάποιων λεπτομερειών της. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων εφαρμογών είναι η διαδικασία δημιουργίας πανοράματος, ή τρισδιάστατου μοντέλου.

Η υπεροχή τους αυτή σχετικά με το χρόνο επεξεργασίας έγκειται σε τρεις παραμέτρους:

- Όλες οι διαδικασίες υπολογισμού και απαλοιφής της ακτινικής διαστροφής είναι απολύτως αυτοματοποιημένες και ιδιαίτερας γρήγορες.
- Απαλλάσσει το χρήστη από τον περιορισμό του πλήθους των εικόνων που μπορεί να λάβει. Αυτό συμβαίνει διότι οι εικόνες μπορούν να διορθωθούν διαδοχικά σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, άσχετα με τις διαφορές που μπορεί να έχουν (εστίαση, απόσταση λήψης, κ.ά.), ειδικά εάν όλες οι εικόνες έχουν ληφθεί από το ίδιο μοντέλο μηχανής-φακού. Συνεπώς, ο χρήστης μπορεί να επισπεύσει τη διαδικασία προγραμματισμού λήψης και λήψης των εικόνων, χωρίς να αυξήσει στην ουσία το υπολογιστικό κόστος. Μάλιστα, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει εικόνες από διάφορες πηγές (π.χ. διαδίκτυο), εάν αυτές είναι διαθέσιμες, εκμηδενίζοντας έτσι τις απαραίτητες λήψεις.
- Δεν απαιτείται η ολοκλήρωση της διαδικασίας των Προσανατολισμών για τη λήψη γεωμετρικής πληροφορίας. Κάθε εικόνα, μετά τη διόρθωσή της είναι ικανή να παράσχει σχετική γεωμετρική πληροφορία για την περιοχή που απεικονίζει.

Όπως προαναφέρθηκε, τα λογισμικά αυτά δίνουν λύσεις και σε εφαρμογές όπου απαιτείται η γεωμετρική τεκμηρίωση του συνόλου μια περιοχής αλλά ταυτοχρόνως και κάποιων λεπτομερειών της. Με αυτό νοείται ότι μπορούν πολύ εύκολα και γρήγορα να διορθωθούν οι ληφθείσες εικόνες και να εφαρμοστεί σε αυτές μια συνόρθωση δέσμης για την παραγωγή μιας ορθοφωτογραφίας ή ενός τρισδιάστατου μοντέλου, ανεξάρτητα από την έκταση της περιοχής. Την ελευθερία αυτή παρέχει η δυνατότητα γρήγορης και οργανωμένης επεξεργασίας μιας μεγάλης ομάδας εικόνων. Ωστόσο, παραλλήλως, μπορούν να ληφθούν εικόνες λεπτομερειών από μικρότερη απόσταση λήψης, να διορθωθούν ανεξάρτητα από τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο και να αξιοποιηθούν για την λεπτομερέστερη μελέτη κάποιων χαρακτηριστικών. Το όφελος σε αυτό, χρησιμοποιώντας τα εξεταζόμενα λογισμικά, είναι ότι ναι μεν η εστιασμένη αυτή γεωμετρική πληροφορία είναι διαθέσιμη, χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνονται οι εικόνες που την παρέχουν στο μοντέλο του συνόλου της περιοχής, άρα χωρίς αυτό να επιβαρύνεται από επιπλέον εικόνες και άρα υπολογιστικό κόστος.

5.3 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ

Ποιο είναι όμως το καταλληλότερο λογισμικό:

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν είναι μονοσήμαντη. Η γεωμετρική ακρίβεια των παραγομένων εικόνων φάνηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου αποδείχθηκε ότι το μοναδικό μάλλον ακατάλληλο λογισμικό είναι το GML Undistorter. Από την άλλη, τα πιο ποιοτικά και μάλιστα σε αποδεκτά όρια αποτελέσματα προέκυψαν από το DxO, ενώ τα υπόλοιπα λογισμικά (PTLens, Lightroom, Photoshop CS) εμφανίζουν μεγαλύτερα σφάλματα αλλά γενικώς μικρά. Οι διαφορές ειδικά των τελευταίων λογισμικών είναι μικρές κι έτσι, δε μπορεί να προκύψει μια τελική πρόταση σχετικά με το ποιο από αυτά πρέπει να χρησιμοποιηθεί, αναλόγως με την επιδιωκόμενη ακρίβεια.

Ωστόσο, κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω, αποδεκτής ακρίβειας, λογισμικών είναι ότι δυστυχώς πρόκειται για εμπορικά προϊόντα. Συνεπώς, ένα κριτήριο επιλογής μπορεί να αποτελέσει η τιμή τους. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.1 η τιμή του PTLens είναι πολύ πιο χαμηλή από τα υπόλοιπα λογισμικά και προσιτή για σχεδόν σε κάθε χρήστη. Αντιθέτως, οι τιμές του Photoshop CS και του Photoshop Lightroom είναι πολύ πιο υψηλές και ίσως υπερβολικές. Η διαφορά αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην περίπτωση του PTLens παρέχονται πολύ λιγότερες δυνατότητες επεξεργασίας της εικόνας. Εντούτοις, δεν δικαιολογείται για το κομμάτι της διόρθωσης της ακτινικής διαστρόφης, όπου τα λογισμικά αυτά είναι σχεδόν ταυτόσημα. Μια ενδιαμέση κατάσταση ισχύει για το λογισμικό DxO View Point αλλά και για το DxO Pro, που είναι το ολοκληρωμένο «πακέτο» της εταιρίας, το οποίο παρέχει περισσότερες επιλογές επεξεργασίας της εικόνας και είναι ίδιο με το DxO View Point σε ότι αφορά τη διόρθωση της ακτινικής διαστρόφης.

Εν κατακλείδι, φαίνεται ότι από άποψη ακρίβειας των αποτελεσμάτων, ευελιξίας στην επεξεργασία της εικόνας και οικονομικού κόστους, η ασφαλέστερη επιλογή είναι το DxO.

6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

- [1] Faugeras, O. (1993). *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*. MIT press.
- [2] Maoling, Q., Songde, M., & Yi, L. (2000). Overview of camera calibration for computer vision. *Acta Automatica Sinica*, 26(1), 43-55.
- [3] Qi, W., Li, F., & Zhenzhong, L. (2010, May). Review on camera calibration. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2010 Chinese* (pp. 3354-3358). IEEE.
- [4] Remondino, F., & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266-272.
- [5] Ito, M. (1990). Robot vision modelling-camera modelling and camera calibration. *Advanced robotics*, 5(3), 321-335.
- [6] Finsterwalder, R., & Hofman, W. (1968). *Photogrammetrie*, Wyalter de Gruyter and Co.
- [7] Schöler, H. (1964). Dipl.-Ing. Dr. hc Franz Manek deceased. *Photogrammetria*, 19, 2-3.
- [8] Brown, D. C. (1968). "Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras".Final report,Part 1, U.S. Army Contract: DA-44-009-AMC-1457,(X), BA Systems Inc., Florida. Clarke, T., Wang, X., & Fryer, J. (1998). "The Principal Point and CCD Cameras". *Photogrammetric Record*, 16(92): 293–312 .
- [9] Ray, S. F. (2002). *Applied photographic optics* (Vol. 3). Oxford: Focal Press.
- [10] Abdel-Aziz, Y. I. (1971). Karara. HM (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- [11] Fraser, C. S. (1982). On the use of non-metric cameras in analytical non-metric photogrammetry. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 24(5), 156-166.
- [12] Tsai, R. Y. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(4), 323-344.
- [13] Wei, G. Q., & De Ma, S. (1994). Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 16(5), 469-480.

- [14] Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 666-673). IEEE.
- [15] Brown, D. C. (1966). Decentering distortion of lenses. *Photometric Engineering*, 32(3), 444-462.
- [16] Brown, D. C. (1971). Lens distortion for close-range photogrammetry. *Photometric Engineering*, 37(8), 855-866.
- [17] Brown, D. C. (1972). Calibration of close range cameras. *Int. Archives Photogrammetry*, 19(5).
- [18] Conrady, A. E. (1919). Lens-systems, Decentered. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 79, 384-390.
- [19] Fraser, C. S. (1997). Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 52(4), 149-159.
- [20] Grün, A. (1997). Fundamentals of videogrammetry—A review. *Human movement science*, 16(2), 155-187.
- [21] Grün, A., & Beyer, H. A. (2001). System calibration through self-calibration. In *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision* (pp. 163-193). Springer Berlin Heidelberg.
- [22] Slama, C. C., Theurer, C., & Henriksen, S. W. (1980). *Manual of photogrammetry* (No. Ed. 4). American Society of photogrammetry.
- [23] Tsai, R. Y. (1986). An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986*.
- [24] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(11), 1330-1334.
- [25] Prescott, B., & McLean, G. F. (1997). Line-based correction of radial lens distortion. *Graphical Models and Image Processing*, 59(1), 39-47.
- [26] Heikkila, J. (2000). Geometric camera calibration using circular control points. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(10), 1066-1077.
- [27] Mallon, J., & Whelan, P. F. (2004, August). Precise radial un-distortion of images. In *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on* (Vol. 1, pp. 18-21). IEEE.
- [28] Ma, L., Chen, Y., & Moore, K. L. (2004). Rational radial distortion models of camera lenses with analytical solution for distortion correction. *International Journal of Information Acquisition*, 1(02), 135-147.
- [29] Claus, D., & Fitzgibbon, A. W. (2005, June). A rational function lens distortion model for general cameras. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on* (Vol. 1, pp. 213-219). IEEE.
- [30] Choi, K. S., Lam, E. Y., & Wong, K. K. (2006). Automatic source camera identification using the intrinsic lens radial distortion. *Optics express*, 14(24), 11551-11565.
- [31] Park, J., Byun, S. C., & Lee, B. U. (2009). Lens distortion correction using ideal image coordinates. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 55(3), 987-991.

- [32] Gonzalez-Aguilera, D., Gomez-Lahoz, J., & Rodríguez-González, P. (2011). An automatic approach for radial lens distortion correction from a single image. *Sensors Journal, IEEE*, 11(4), 956-965.
- [33] Devernay, F., & Faugeras, O. (2001). Straight lines have to be straight. *Machine vision and applications*, 13(1), 14-24.
- [34] Wang, A., Qiu, T., & Shao, L. (2009). A simple method of radial distortion correction with centre of distortion estimation. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 35(3), 165-172.
- [35] Devernay, F., & Faugeras, O. D. (1995, September). Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. In *SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*(pp. 62-72). International Society for Optics and Photonics.
- [36] Romero, L., & Gomez, C. (2007). *Correcting Radial Distortion of Cameras with Wide Angle Lens Using Point Correspondences*. na.
- [37] Kilpelä, E. (1981). Compensation of systematic errors of image and model coordinates. *Photogrammetria*, 37(1), 15-44.
- [38] Richter, K., Mader, D., Seidl, K., & Maas, H. G. (2013). Development of a geometric model for an all-reflective camera system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86, 41-51.
- [39] Wang, S., Liu, D., Yang, Y., Chen, X., Cao, P., Li, L., ... & Shen, Y. (2014). Distortion correction in surface defects evaluating system of large fine optics. *Optics Communications*, 312, 110-116.
- [40] Fraser, C. S., Shortis, M. R., & Ganci, G. (1995, September). Multisensor system self-calibration. In *Photonics East'95* (pp. 2-18). International Society for Optics and Photonics.
- [41] El-Hakim, S. (1986). A real-time system for object measurement with CCD cameras. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26(Part V).
- [42] Ebner, H. (1976). Self calibrating block adjustment. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 44, 128-139.
- [43] Grün, A. (1978, March). Experiences with self-calibrating bundle adjustment. In *Proc. ACSM-ASP Convention, Washington, DC*.
- [44] Tang, R. (2012a). New mathematical self-calibration models in aerial photogrammetry. In: *DGPF Tagungsband 21*. pp. 457–469
- [45] Abraham, S., & Förstner, W. (1997). Zur automatischen Modellwahl bei der Kalibrierung von CCD-Kameras. In *Mustererkennung 1997* (pp. 147-155). Springer Berlin Heidelberg.
- [46] Alemán-Flores, M., Alvarez, L., Gomez, L., & Santana-Cedrés, D. (2014). Line detection in images showing significant lens distortion and application to distortion correction. *Pattern Recognition Letters*, 36, 261-271.
- [47] Hugemann, W. (2010). Correcting lens distortions in digital photographs. *Ingenieurbüro Morawski+ Hugemann: Leverkusen, Germany*.
- [48] Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press.

- [49] Alvarez, L., Gomez, L., & Sendra, J. R. (2010). Algebraic lens distortion model estimation. *Image Processing On Line*, (2010).
- [50] Lee, T. Y., Chang, T. S., Wei, C. H., Lai, S. H., Liu, K. C., & Wu, H. S. (2013). Automatic Distortion Correction of Endoscopic Images Captured With Wide-Angle Zoom Lens. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 60(9), 2603-2613.
- [51] Shah, S., & Aggarwal, J. K. (1996). Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation*. *Pattern Recognition*, 29(11), 1775-1788.
- [52] Fitzgibbon, A. W. (2001). Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on* (Vol. 1, pp. 1-125). IEEE.
- [53] Brauer-Burchardt, C., & Voss, K. (2001). A new algorithm to correct fish-eye-and strong wide-angle-lens-distortion from single images. In *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on* (Vol. 1, pp. 225-228). IEEE.
- [54] Brauer-Burchardt, C., & Voss, K. (2002, June). Automatic correction of weak radial lens distortion in single views of urban scenes using vanishing points. In *Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on* (Vol. 3, pp. 865-868). IEEE.
- [55] Bräuer-Burchardt, C. (2004). A simple new method for precise lens distortion correction of low cost camera systems. In *Pattern Recognition* (pp. 570-577). Springer Berlin Heidelberg.
- [56] Melen, T. (1994). Geometrical modelling and calibration of video cameras for underwater navigation, trond. melen@ itk. unit. no. *Master's thesis, Norges Tekniske Høgskole Trondheim*.
- [57] Basu, A., & Licardie, S. (1995). Alternative models for fish-eye lenses. *Pattern Recognition Letters*, 16(4), 433-441.
- [58] Asari, K. V., Kumar, S., & Radhakrishnan, D. (1999). A new approach for nonlinear distortion correction in endoscopic images based on least squares estimation. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 18(4), 345-354.
- [59] Smith, W. E., Vakil, N., & Maislin, S. A. (1992). Correction of distortion in endoscope images. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 11(1), 117-122.
- [60] Schwartz, E. L. (1980). Computational anatomy and functional architecture of striate cortex: a spatial mapping approach to perceptual coding. *Vision research*, 20(8), 645-669.
- [61] Perš, J., & Kovacic, S. (2002, February). Nonparametric, model-based radial lens distortion correction using tilted camera assumption. In *Proceedings of the Computer Vision Winter Workshop* (Vol. 1, pp. 286-295).
- [62] Lee, S. H., Lee, S. K., & Choi, J. S. (2009). Correction of radial distortion using a planar checkerboard pattern and its image. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 55(1), 27-33.
- [63] Hartley, R., & Kang, S. B. (2007). Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 29(8), 1309-1321.

- [64] Weng, J., Cohen, P., & Herniou, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(10), 965-980.
- [65] Kanatani, K. (2002, January). Model selection for geometric inference. In *The 5th Asian Conference on Computer Vision, Melbourne, Australia*, pp. xxi-xxxii.
- [66] Caprile, B., & Torre, V. (1990). Using vanishing points for camera calibration. *International journal of computer vision*, 4(2), 127-139.
- [67] Salvi, J., Armangué, X., & Batlle, J. (2002). A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern recognition*, 35(7), 1617-1635.
- [68] Fryer, J. G., & Brown, D. C. (1986). Lens distortion for close-range photogrammetry. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 52(1), 51-58.
- [69] Faugeras, O. D., & Toscani, G. (1986, June). The calibration problem for stereo. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (Vol. 86, pp. 15-20).
- [70] Brown, D. C. (1989). A strategy for multi-camera on-the-job self-calibration. *Institut Fur Photogrammetrie Stuttgart, Festschrift, Friedrich Ackermann, zum,60*.
- [71] Clarke, T. A., & Fryer, J. G. (1998). The development of camera calibration methods and models. *The Photogrammetric Record*, 16(91), 51-66.
- [72] Grün, A., & Huang, T. S. (2001). Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision. 2001. ISBN: 3540652833.
- [73] Zhang, Z. (2004). Camera calibration with one-dimensional objects. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 26(7), 892-899.
- [74] Fu-Chao, H. Z. Y. W. (2002). A Review on Some Active Vision Based Camera Calibration Techniques [J]. *Chinese Journal of Computers*, 11, 003.
- [75] Hartley, R. I. (1994). Projective reconstruction and invariants from multiple images. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 16(10), 1036-1041.
- [76] Stein, G. P. (1995, June). Accurate internal camera calibration using rotation, with analysis of sources of error. In *Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on* (pp. 230-236). IEEE.
- [77] Xiao, Z., Jin, L., Yu, D., & Tang, Z. (2010). A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view. *Measurement*, 43(6), 747-754.
- [78] Triggs, B. (1998). Autocalibration from planar scenes. In *Computer Vision—ECCV'98* (pp. 89-105). Springer Berlin Heidelberg.
- [79] Zhang, Z. (2002). Camera calibration with one-dimensional objects. In *Computer Vision—ECCV 2002* (pp. 161-174). Springer Berlin Heidelberg.
- [80] Hall, E. L., Tio, J. B., McPherson, C. A., & Sadjadi, F. A. (1982). Measuring curved surfaces for robot vision. *Computer*, 15(12), 42-54.
- [81] Faugeras, O. D., & Toscani, G. (1987, February). Camera calibration for 3D computer vision. In *Proceedings of International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, Tokyo, Japan, 240-247

- [82] Salvi, J. (1998). *An approach to coded structured light to obtain three dimensional information*. Universitat de Girona.
- [83] Heikkila, J., & Silvén, O. (1997, June). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 1106-1112). IEEE.
- [84] Kanatani, K. (1993). *Geometric computation for machine vision*. Oxford University Press, Inc..
- [85] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (1992). *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing* (New York. *Cambridge University Press*, 636-9.
- [86] Strang, G. (2003). *Introduction to linear algebra. Cambridge Publication*.
- [87] Wang, L. L., & Tsai, W. H. (1991). Camera calibration by vanishing lines for 3-D computer vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(4), 370-376.
- [88] Beardsley, P., Murray, D., & Zisserman, A. (1992, January). Camera calibration using multiple images. In *Computer Vision—ECCV'92* (pp. 312-320). Springer Berlin Heidelberg.
- [89] Cipolla, R., Drummond, T., & Robertson, D. P. (1999, September). Camera Calibration from Vanishing Points in Image of Architectural Scenes. In *BMVC*(Vol. 99, pp. 382-391).
- [90] Grammatikopoulos, L., Karras, G., Petsa, E., & Kalisperakis, I. (2006). A unified approach for automatic camera calibration from vanishing points, volume XXXVI de 5. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- [91] Liebowitz, D., & Zisserman, A. (1998, June). Metric rectification for perspective images of planes. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1998. Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 482-488). IEEE.
- [92] Sturm, P., & Maybank, S. (1999). A method for interactive 3d reconstruction of piecewise planar objects from single images. In *The 10th British Machine Vision Conference (BMVC'99)* (pp. 265-274).
- [93] Zhang, Z., Matsushita, Y., & Ma, Y. (2011, June). Camera calibration with lens distortion from low-rank textures. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on* (pp. 2321-2328). IEEE.
- [94] Grammatikopoulos, L., Karras, G., & Petsa, E. (2007). An automatic approach for camera calibration from vanishing points. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 62(1), 64-76.
- [95] Brauer-Burchardt, C., & Voss, K. (2000). Robust vanishing point determination in noisy images. In *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on* (Vol. 1, pp. 559-562). IEEE.
- [96] van den Heuvel, F. A. (1999). Estimation of interior orientation parameters from constraints on line measurements in a single image. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 32(Part 5).
- [97] Collins, R. T., & Beveridge, J. R. (1993, June). Matching perspective views of coplanar structures using projective unwarping and similarity matching. In *Computer*

- Vision and Pattern Recognition, 1993. Proceedings CVPR'93., 1993 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 240-245). IEEE.
- [98] Tuytelaars, T., Van Gool, L., Proesmans, M., & Moons, T. (1998, January). The cascaded Hough transform as an aid in aerial image interpretation. In *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on* (pp. 67-72). IEEE.
- [99] Barnard, S. T. (1983). Interpreting perspective images. *Artificial intelligence*, 21(4), 435-462.
- [100] Becker, S. C., & Bove Jr, V. M. (1995, April). Semiautomatic 3D-model extraction from uncalibrated 2D-camera views. In *IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology* (pp. 447-461). International Society for Optics and Photonics.
- [101] Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.
- [102] Rasmussen, C. (2004, July). Grouping dominant orientations for ill-structured road following. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on* (Vol. 1, pp. I-470). IEEE.
- [103] Karras, G. E., Patias, P., & Petsa, E. (1993, September). Experiences with rectification of non-metric digital images when ground control is not available. In *CIPA XV International Symposium*.
- [104] Grammatikopoulos, L., Karras, G., & Petsa, E. (2004). Camera calibration combining images with two vanishing points. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 35(5), 99-104.
- [105] Grammatikopoulos, L., Karras, G., & Petsa, E. (2002). Geometric information from single uncalibrated images of roads. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial INFORMATION Sciences*, 34(5), 21-26.
- [106] Stein, G. P. (1997, June). Lens distortion calibration using point correspondences. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 602-608). IEEE.
- [107] Sawhney, H. S., & Kumar, R. (1999). True multi-image alignment and its application to mosaicing and lens distortion correction. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 21(3), 235-243.
- [108] Bräuer-Burchardt, C., & Voss, K. (2000). Automatic lens distortion calibration using single views. In *Mustererkennung 2000* (pp. 187-194). Springer Berlin Heidelberg.
- [109] Bakstein, H. (1999). A complete DLT-based camera calibration with a virtual 3D calibration object. *Department of Mathematics and Physics*.
- [110] Strobl, K. H., & Hirzinger, G. (2008, May). More accurate camera and hand-eye calibrations with unknown grid pattern dimensions. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* (pp. 1398-1405). IEEE.
- [111] Bakken, R. H., Eilertsen, B. G., Matus, G. U., & Nilsen, J. H. (2009). Semi-automatic camera calibration using coplanar control points. In *Proceedings of NIK Conference* (pp. 37-48).
- [112] Süli, E., & Mayers, D. F. (2003). *An introduction to numerical analysis*. Cambridge university press.

- [113]Wang, L. L., & Tsai, W. H. (1990). Computing camera parameters using vanishing-line information from a rectangular parallelepiped. *Machine Vision and Applications*, 3(3), 129-141.
- [114]Pajdla, T., & Werner, T. (1997). Correcting radial lens distortion without knowledge of 3-D structure.
- [115]Kang, S. B. (2001). Radial distortion snakes. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 84(12), 1603-1611.
- [116]Thormählen, T., Broszio, H., & Wassermann, I. (2003, March). Robust line-based calibration of lens distortion from a single view. In *Proceedings of MIRAGE* (pp. 105-112).
- [117]Bukhari, F., & Dailey, M. N. (2010). Robust radial distortion from a single image. In *Advances in Visual Computing* (pp. 11-20). Springer Berlin Heidelberg.
- [118]Bukhari, F., & Dailey, M. N. (2013). Automatic radial distortion estimation from a single image. *Journal of mathematical imaging and vision*, 45(1), 31-45.
- [119]Ahmed, M., & Farag, A. (2005). Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 14(8), 1215-1230.
- [120]Strand, R., & Hayman, E. (2005, September). Correcting Radial Distortion by Circle Fitting. In *BMVC*.
- [121]Barreto, J. P., & Araujo, H. (2002). Geometric properties of central catadioptric line images. In *Computer Vision—ECCV 2002* (pp. 237-251). Springer Berlin Heidelberg.
- [122]Tardif, J. P., Sturm, P., & Roy, S. (2006). Self-calibration of a general radially symmetric distortion model. In *Computer Vision—ECCV 2006* (pp. 186-199). Springer Berlin Heidelberg.
- [123]Jiandong, Z., Liyan, Z., & Xiaoyu, D. (2009). Accurate 3D target positioning in close range photogrammetry with implicit image correction. *Chinese Journal of Aeronautics*, 22(6), 649-657.
- [124]Kim, D., Park, J., Jung, J., Kim, T., & Paik, J. (2014). Lens distortion correction and enhancement based on local self-similarity for high-quality consumer imaging systems. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 60(1), 18-22.
- [125]Burns, J. B., Hanson, A. R., & Riseman, E. M. (1986). Extracting straight lines. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (4), 425-455.
- [126]Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6), 679-698.
- [127]Ojanen, H. (1999). Automatic correction of lens distortion by using digital image processing. *Rutgers University, Dept. of Mathematics technical report*.
- [128]Kass, M., Witkin, A., & Terzopoulos, D. (1988). Snakes: Active contour models. *International journal of computer vision*, 1(4), 321-331.
- [129]Lee, H. S., Lee, S. M., Chung, S. I., & Lee, H. H. (2009, September). Implementation of 3D undistorting algorithm for stereo camera. In *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2009. IDAACS 2009. IEEE International Workshop on* (pp. 414-419). IEEE.

- [130]Leme, E. F. P., Lopez, L. J. R., & Goroso, D. G. Optometric-lab: a Stereophotogrammetry Tool for Eye Movements Records.
- [131]Ahn, S. J., Shin, S. W., Kim, H. J., Chung, S. T., & Yoon, S. J. (2012). Study on accuracy improvement of Registration for Transcranial Magnetic Stimulation. *IJCSNS*, 12(2), 20.
- [132]Neale, W. T., Hessel, D., & Terpstra, T. (2011). *Photogrammetric measurement error associated with lens distortion* (No. 2011-01-0286). SAE Technical Paper.
- [133]Shih, Y., Guenter, B., & Joshi, N. (2012). Image enhancement using calibrated lens simulations. In *Computer Vision–ECCV 2012* (pp. 42-56). Springer Berlin Heidelberg.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [134]Πέτσα Ε. (2000). *Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*, Διδακτικές Σημειώσεις, ΤΕΙ Αθήνας
- [135]Καρράς Γ. (1992). *Η Τοπογραφία Moiré ως Μέθοδος της Φωτογραμμετρίας Μικρών Αποστάσεων στη Βιοστερεομετρία*, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- [136]Ξυνογαλάς Ε. (2010). *Βαθμονόμηση Αναλογικών Μηχανών Αεροφωτογράφησης με τη Χρήση Πεδίου Ελέγχου*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- [137]Αγραφιώτης, Π., Γεωργόπουλος Α. (2012), *Αξιολόγηση και Σύγκριση Μεθόδων Βαθμονόμησης Φωτογραφικών Μηχανών*, 4^ο Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012
- [138]Σαμαρά Α. (2004). *Διερεύνηση Βαθμονόμησης Ψηφιακής Μηχανής*, Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορικής», Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- [139]Γεωργόπουλος Α. και Γεωργίου Η. (1998), *Σύγκριση Αναλυτικών και Ψηφιακών Φωτογραμμετρικών Συστημάτων Χαμηλού Κόστους*, Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ Ι Ιαν.-Απρ. 1998 τ.18, τεύχ.1 σ.9-24

Ιστολεπίδες

- [140]J.-Y. Bouguet. Camera calibration toolbox for Matlab.
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
Τελευταία ενημέρωση 02/12/2013
- [141]<http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/photo/staff/gkarras/faucal.html>
Τελευταία ενημέρωση 01/02/2010
- [142]http://hugin.sourceforge.net/docs/manual/Lens_correction_model.html
- [143]<http://graphics.cs.msu.ru/en/node/898>
- [144]<http://epaperpress.com/ptlens/>

[145]<http://www.dxo.com/intl>

[146]<http://www.adobe.com/eeurope/products/photoshop.html>

[147]<http://www.adobe.com/eeurope/products/photoshop-lightroom.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 4.1: Αρχική παραμορφωμένη εικόνα.....	43
Εικόνα 4.2: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από την ακτινική διαστροφή, από το λογισμικό DxO View Point 2	44
Εικόνα 4.3: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από την ακτινική διαστροφή, από το λογισμικό Adobe Photoshop CS5.1	44
Εικόνα 4.4: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από την ακτινική διαστροφή, από το λογισμικό PTLens:.....	44
Εικόνα 4.5: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από ακτινική διαστροφή, από το λογισμικό Adobe Photoshop Lightroom 5.3	45
Εικόνα 4.6: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από ακτινική διαστροφή, από το λογισμικό GML Undistorter	45
Εικόνα 4.7: Εικόνα αυτομάτως διορθωμένη από ακτινική διαστροφή, από τον αλγόριθμο της εργασίας	45
Εικόνα 4.8: Εικόνα διορθωμένη από ακτινική διαστροφή και πρωτεύον σημείο, από τον αλγόριθμο της εργασίας	46
Εικόνα 4.9: Σκαρίφιμα κατανομής φωτοσταθερών και σημείων ελέγχου σε ζεύγος εικόνων	56

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας πληροφοριών σχετικά με τα λογισμικά.....	34
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Βαθμονόμησης μέσω του λογισμικού Calibration_CCD49	
Πίνακας 4.2: Παράμετροι για την αποκατάσταση του Εσωτερικού Προσανατολισμού στα διάφορα ζεύγη εικόνων	55
Πίνακας 4.3: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των φωτοσταθερών	58
Πίνακας 4.4: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα των σημείων ελέγχου.....	58

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Επίδραση ακτινικής διαστροφής (Πηγή: Πετσά, 2000).....	5
Σχήμα 2.2: Ακτινική Διαστροφή (Πηγή: Πετσά, 2000)	6
Σχήμα 2.3: Στο μοντέλο διαστροφής FOV, η απόσταση cm είναι ανάλογη προς τη γωνία μεταξύ των CM και του οπτικού άξονα Cz (Πηγή: Devernay and Faugeras, 2001).....	17

Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα αφαίρεσης εικόνων	47
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα βαθμονομημένων καμπυλών, με μηδενισμό της διαστροφής στα 2/3 της ημιδιαγωνίου (pixel)	50
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα βαθμονομημένων καμπυλών, με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των τιμών της διαστροφής μέχρι το r_0 (pixel)	51
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ορισμένων βαθμονομημένων καμπυλών, με μηδενισμό της διαστροφής στα 2/3 της ημιδιαγωνίου (pixel)	52
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ορισμένων βαθμονομημένων καμπυλών, με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των τιμών της διαστροφής μέχρι το r_0 (pixel)	53