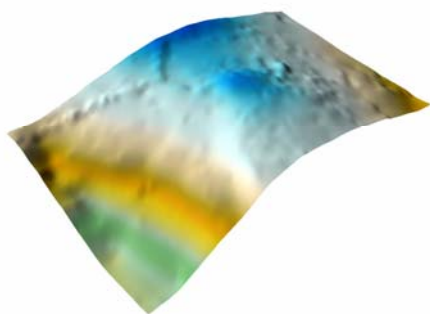




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΠΟΛΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΚΑΡΦΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2009

Πρόλογος

Φτάνοντας στο τέλος των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με την επιστημονική αλλά και με τη γενικότερη ακαδημαϊκή τους βοήθεια συντέλεσαν στην κατάρτισή μου ως Αγρονόμου – Τοπογράφου Μηχανικού αλλά και στην πολύπλευρη ανάπτυξη της προσωπικότητάς μου ως συνειδητοποιημένου πολίτη και επιστήμονα, ικανού να θεωρεί και να αντιλαμβάνεται τις εξελίξεις του επιστημονικού του τομέα όχι μόνο τεχνοκρατικά αλλά διαλεκτικά, κατανοώντας και αναλύοντας τις συσχετίσεις και αλληλεπιδράσεις που αυτές έχουν στο κοινωνικοοικονομικό εποικοδόμημα αλλά και την επίδραση του κοινωνικού και οικονομικού περιβάλλοντος στην ανάπτυξη και εξέλιξη του επιστημονικού μου πεδίου.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να αναφερθώ στον καθηγητή Γιώργο Καρρά που επέβλεψε τη διπλωματική μου εργασία κατά τρόπο που δεν αποσκοπούσε μόνο στην τυπική διεκπεραίωσή της αλλά στην ουσιαστική κατανόηση των ζητημάτων που θεραπεύει η φωτογραμμετρία και στην επαφή μου με τα σύγχρονα πεδία έρευνας που την αφορούν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Έλλη Πέτσα, καθηγήτρια Φωτογραμμετρίας στο Τ.Ε.Ι Αθήνας, και τους Λάζαρο Γραμματικόπουλο, Δρ. Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό Ε.Μ.Π., όσο και τους υποψήφιους διδάκτορες της Σ.Α.Τ.Μ. Ηλία Καλησπεράκη, Αντώνη Πρόκο και Χρήστο Στεντούμη για τη σημαντική βοήθειά τους.

Αισθάνομαι την ανάγκη, ακόμα, να αναφερθώ στον πατέρα μου Δημήτριο Καρφή, καθηγητή των Μαθηματικών, για την αμέριστη συμπαράστασή του.

Τέλος τον κόπο μου τον αφιερώνω στο φοιτητικό κίνημα των ετών 2006–2007 για όλα όσα πέτυχε και για όλα όσα μου έμαθε.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	1
Περιεχόμενα.....	3
Περίληψη	5
Abstract.....	5
Εισαγωγή: Σκοπός και δομή της εργασίας	6
Κεφάλαιο 1 – Η ψηφιακή εικόνα	8
1.1 Τρόποι απόκτησης ψηφιακών εικόνων.....	8
1.2 Χαρακτηριστικά ψηφιακών εικόνων	8
1.3 Σύστημα αναφοράς των ψηφιακών εικόνων.....	10
Κεφάλαιο 2 – Αλγόριθμοι ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος	13
2.1 Χαρακτηριστικά αλγορίθμων ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος	13
2.2 Τελεστής Moravec	15
2.3 Τελεστής Harris	21
Κεφάλαιο 3 – Οι προσανατολισμοί της εικόνας.....	30
3.1 Η εξίσωση συγγραμμικότητας.....	30
3.2 Η εξίσωση συνεπιπεδότητας.....	33
3.3 Σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους	37
3.4 Η επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας	38
Κεφάλαιο 4 - Ψηφιακή συνταύτιση εικόνων	43
4.1 Ορισμός του προβλήματος.....	43
4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος	44
4.3 Μέθοδοι επιφανειακής συνταύτισης.....	47
4.3.1 Μέθοδος του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης.....	47
4.3.2 Μέθοδος των τετραγώνων των απολύτων διαφορών	49
4.3.3 Ελαχιστοτετραγωνική ψηφιακή συνταύτιση	50
4.4 Εύρεση ομολογιών για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού ...	52
Κεφάλαιο 5 – Αξιοποίηση της επιπολικής γεωμετρίας	54
5.1 Επιπολική γεωμετρία στερεοζεύγους	54
5.2 Μετασχηματισμός ζεύγους εικόνων σε επιπολικές	56
5.3 Έλεγχος των επιπολικών εικόνων.....	64
5.4 Εξωτερικός προσανατολισμός επιπολικών εικόνων.....	64
Κεφάλαιο 6 - Αξιοποίηση αδρού DEM στην αναζήτηση ομόλογων σημείων	66
6.1 Η χρήση επιπολικών εικόνων	66
6.2 Διάστημα αναζήτησης βάσει της μέγιστης διαφοράς κατά x παράλλαξη	67
6.3 Η μέθοδος Monoploting.....	68
6.4 Προσδιορισμός διαστήματος αναζήτησης με αντίστροφη φωτογραμμετρία	69
6.5 Προσδιορισμός διαστήματος γραμμών στην αναζήτηση ομολογίας.....	73
Κεφάλαιο 7 - Παραγωγή “πυκνού” ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	74
7.1 Αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	75
7.2 Διαδικασία που ακολουθείται στην παρούσα εφαρμογή.....	75
7.3 Έλεγχος και διόρθωση των ψηφιακών μοντέλων ανά επίπεδο	76
7.4 Χρησιμοποίηση των εικόνων μεγάλης ανάλυσης.....	78
7.5 Εντροπία εικόνας	79
Κεφάλαιο 8 – Εφαρμογές	80
8.1 Γενικά.....	80
8.2 Μεθοδολογία ελέγχου της αξιοπιστίας του ψηφιακού μοντέλου	80
8.3 1 ^ο Μοντέλο.....	82

8.4 2 ^ο Μοντέλο.....	87
Συμπεράσματα	94
Προτάσεις	97
Βιβλιογραφία	99

Περίληψη

Στην εργασία αυτή διερευνώνται βασικές δυνατότητες για την αυτοματοποίηση των φωτογραμμετρικών διαδικασιών του σχετικού προσανατολισμού, εν συνεχεία της δημιουργίας επιπολικών εικόνων και, τέλος, της δημιουργίας κατά το δυνατόν πυκνού ψηφιακού μοντέλου αντικειμένου/εδάφους με χρήση των επιπολικών εικόνων και τη βοήθεια ενός αδρού ψηφιακού μοντέλου της επιφάνειας που έχει παραχθεί στην πρώτη φάση της διαδικασίας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας υλοποιούνται οι αλγόριθμοι των παραπάνω διαδικασιών, αξιολογούνται τα αποτελέσματά τους και εξάγονται συμπεράσματα από την εφαρμογή τους.

Abstract

*An Investigation of Automated Photogrammetric Processes
Using Epipolar Geometry*

Achilles Karfis

Diploma Thesis

School of Rural & Surveying Engineering, National Technical University of Athens

In this thesis, basic approaches are investigated regarding the automation of the photogrammetric processes of relative orientation, of epipolar image generation and, finally, of the creation of a possibly dense digital surface model using the epipolar images and a rough surface model generated in the first stage of the procedure. In this context, the algorithms for these tasks are implemented, their results are evaluated, and conclusions are drawn from their application.

Εισαγωγή: Σκοπός και δομή της εργασίας

Ο προβληματισμός που προκάλεσε την παρούσα εργασία σχετίζεται με την διερεύνηση της δυνατότητας για την αυτοματοποίηση των φωτογραμμετρικών διαδικασιών και την εξοικείωση με τις σχετικές τεχνικές. Είναι σαφές ότι η φωτογραμμετρική έρευνα έχει στραφεί τα τελευταία χρόνια – σε πολλές περιπτώσεις επιτυχώς – στην αυτοματοποίηση της παραγωγής προϊόντων αλλά και την αυτοματοποίηση άλλων διαδικασιών που εκτελεί ο χρήστης, όπως είναι οι διαδικασίες προσανατολισμού.

Αναλυτικότερα, τα ερευνητικά θέματα που απασχόλησαν και απασχολούν τη φωτογραμμετρική κοινότητα είναι η αυτοματοποίηση των προσανατολισμών (εσωτερικός, σχετικός, απόλυτος), του αεροτριγωνισμού ή γενικότερα του φωτοτριγωνισμού (που αποτελεί και τη δυσκολότερη περίπτωση) και η αυτοματοποίηση της συλλογής ψηφιακού μοντέλου εδάφους, αλλά βέβαια και το γενικότερο πρόβλημα της αυτόματης απόδοσης. Οι παραπάνω προσπάθειες προϋπέθεσαν για την φωτογραμμετρική έρευνα τη γνώση τεχνικών επεξεργασίας εικόνας, και συνέδεσαν έτσι το πεδίο της όρασης υπολογιστών με αυτό της φωτογραμμετρίας εισάγοντας νέες τεχνικές όπως είναι εκείνες που υπάγονται στην αναγνώριση προτύπων (pattern recognition).

Η διπλωματική αυτή εργασία έρχεται ως συνέχεια της προσπάθειας του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας για την εξέταση αλγορίθμων και την ανάπτυξη μεθοδολογιών για την αυτοματοποίηση φωτογραμμετρικών διαδικασιών. Ειδικότερα, αποτελεί επέκταση της βασικής προσέγγισης προηγούμενης εργασίας (Στεντούμης, 2007), η οποία αξιοποίησε την δυνατότητα αυτόματης εύρεσης ομόλογων σημείων σε δύο αεροφωτογραφίες με χρήση της μέσης παράλλαξης ως αρχικής προσέγγισης προκειμένου να προσανατολίσει σχετικά το ζεύγος και να ορίσει την επιφάνεια του αντικειμένου απλώς μέσω των ομόλογων σημείων του σχετικού προσανατολισμού. Αυτή η αναζήτηση γίνεται κατά κάποιον τρόπο “τυφλά” και σε ένα μεγάλο παράθυρο αναζήτησης, καταλήγοντας σε ένα σχετικά περιορισμένο σύνολο σημείων με τα οποία επιλύεται αυτόματα ο σχετικός προσανατολισμός. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι, με αυτή την αφετηρία, να αναπτύξει και να εφαρμόσει αυτόματο αλγόριθμο για την αναζήτηση σημείων με πυκνή κατανομή. Τα δεδομένα του σχετικού προσανατολισμού μπορούν να περιορίσουν την αναζήτηση ομολογιών επί της επιπολικής γραμμής, πράγμα που μπορεί να γίνει απλούστερα με μετασχηματισμό των εικόνων σε επιπολικές όπως έγινε στην παρούσα εργασία. Από την άλλη μεριά, η περιοχή αναζήτησης επί της επιπολικής γραμμής ορίζεται από το αναμενόμενο υψόμετρο του αναζητούμενου σημείου, ενώ το διάστημα της αναζήτησης ορίζεται από την αβεβαιότητα αυτής της κατ’ αρχήν εκτίμησης του υψομέτρου. Μεγάλη βοήθεια για τον ορισμό της θέσης και του διαστήματος της αναζήτησης επί των επιπολικών γραμμών μπορεί να προσφέρει – όπως συμβαίνει στην παρούσα εργασία – η χρήση ενός αδρού ψηφιακού μοντέλου της επιφάνειας που προέρχεται από μια πρώτη διαδικασία αυτόματης συνταύτισης εικόνας.

Η μεθοδολογία της εργασίας είναι η εξής. Αρχικά εντοπίζονται με τον τελεστή Harris σημεία ενδιαφέροντος πρόσφορα για καλή συνταύτιση. Ο αυτόματος σχετικός προσανατολισμός πραγματοποιείται με ομολογίες σημείων που εξάγονται με διαδικασία ψηφιακής συνταύτισης, και πιο συγκεκριμένα με τη μέθοδο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης αρχικά και εν συνεχεία με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Κατόπιν, προκειμένου να περιοριστεί η περιοχή αναζήτησης ομόλογων σημείων για την δημιουργία του μοντέλου της επιφάνειας παράγονται επιπολικές εικόνες. Οι συνταύτισεις γίνονται σε αυτές (οπότε και τα παραγόμενα ψηφιακά μοντέλα έχουν συντετα-

γμένες στο σύστημα της βάσης του ζεύγους). Η περιοχή αναζήτησης στη δεξιά επιπολική εικόνα εκτιμάται κατά τις γραμμές, δηλαδή κάθετα στην επιπολική ευθεία, βάσει των σφαλμάτων των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού. Κατά τις στήλες, δηλαδή κατά μήκος της επιπολικής ευθείας, γίνεται εκτίμηση των συντεταγμένων εδάφους του επιλεγμένου σημείου της αριστερής εικόνας με παρεμβολή στο αδρό ψηφιακό μοντέλο της επιφάνειας που έχει προέλθει από τα σημεία του σχετικού προσανατολισμού (monoplotting) και στη συνέχεια το σημείο αυτό “ανεβαίνει” στη δεξιά εικόνα. Προκειμένου να εκτιμηθεί η υψομετρική διαφορά, ορίζεται μια περιοχή στο μοντέλο επιφάνειας και τα σημεία μέσα σε αυτή δίνουν την πληροφορία για τις αναμενόμενες υψομετρικές διαφορές στην περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται ο αριθμός των στηλών όπου γίνεται η αναζήτηση του ομόλογου σημείου. Τέλος, για να είναι αξιολογήσιμα και χρήσιμα τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα (PHOTOmatch) γίνεται μετασχηματισμός από το σύστημα της βάσης στο γεωδαιτικό. Αυτό είναι βέβαια δυνατόν εφόσον είναι γνωστά τα στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού των δύο εικόνων στο γεωδαιτικό σύστημα (πχ, από προηγούμενο αεροτριγωνισμό).

Για την αξιολόγηση της κοινωνικής σκοπιμότητας της εργασίας πρέπει να αξιολογηθεί η χρησιμότητα των φωτογραμμετρικών αυτοματισμών και της παραγωγής λογισμικού. Είναι γνωστό στη φωτογραμμετρική κοινότητα ότι η παραγωγή φωτογραμμετρικού λογισμικού είναι ένα προνομιακό πεδίο για έναν μικρό αριθμό εμπορικών εταιριών σε παγκόσμια κλίμακα. Τίθεται λοιπόν το ζήτημα της διαχείρισης και διάθεσης της τεχνογνωσίας. Το σημαντικότερο όμως ζήτημα ανακύπτει κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε διοικητικό επίπεδο, καθώς η διάθεση της τεχνογνωσίας είναι ένας σημαντικός παράγοντας κατά την οργάνωση διοικητικών δομών που αποσκοπούν στη διαχείριση και προστασία του γήινου περιβάλλοντος, όπως είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου αναπτυξιακού κτηματολογίου. Είναι σαφές ότι η απόκτηση τεχνογνωσίας σε τεχνικά αντικείμενα που είναι απαραίτητα για τη οργάνωση τέτοιων δομών καθιστά την υλοποίησή τους ευκολότερη.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής. Στο πρώτο Κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος χρησιμοποίησης των ψηφιακών εικόνων στη σύγχρονη φωτογραμμετρία και κυρίως ο ορισμός του συστήματος αναφοράς των εικόνων και η ραδιομετρία τους. Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος με έμφαση στον τελεστή Harris που χρησιμοποιείται εδώ. Στο τρίτο Κεφάλαιο αναλύονται οι προσανατολισμοί της εικόνας και ο τρόπος επίλυσης του σχετικού προσανατολισμού με τη μέθοδο των μεικτών εξισώσεων. Το τέταρτο Κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους ψηφιακής συνταύτισης και ειδικότερα εκείνες του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης και της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης. Το πέμπτο Κεφάλαιο αφιερώνεται στη διαδικασία δημιουργίας επιπολικών εικόνων και τη χρησιμότητά τους στην ψηφιακή συνταύτιση. Στο έκτο Κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος χρησιμοποίησης του αρχικού αδρού ψηφιακού μοντέλου για τον ορισμό της περιοχής αναζήτησης πάνω στην επιπολική γραμμή. Στο έβδομο Κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για τη συλλογή ψηφιακού μοντέλου. Τέλος, το όγδοο Κεφάλαιο παρουσιάζει και αξιολογεί πειραματικές εφαρμογές των αλγορίθμων της διπλωματικής εργασίας, η οποία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματά της και την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 1 – Η ψηφιακή εικόνα

1.1 Τρόποι απόκτησης ψηφιακών εικόνων

Όπως είναι γνωστό, η φωτογραμμετρία χωρίζεται χρονικά σε τρεις περιόδους ανεξάρτητα από τις εφαρμογές της. Οι περίοδοι αυτές είναι η εποχή της αναλογικής φωτογραμμετρίας, η εποχή της αναλυτικής φωτογραμμετρίας και, τελευταία, η εποχή της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Παρ' όλο που σε κάθε χρονική περίοδο η χρήση της εκάστοτε πιο σύγχρονης τεχνολογίας μπορούσε να δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα, η ανάπτυξη των κατάλληλων αλγορίθμων όσο και η μετάβαση σε επίπεδο εφαρμογής ήταν πάντα δύσκολη.

Φυσικά, η αλλαγή της όλης φιλοσοφίας αντιμετώπισης των φωτογραμμετρικών προβλημάτων, αλλά και η αποδοχή της φωτογραμμετρίας ως της επιστημονικού κλάδου που μπορεί να δώσει λύσεις σε πλειάδα άλλων ζητημάτων εκτός από εκείνα που μπορούσε να αντιμετωπίσει μέχρι τότε, ήρθε με την έλευση της ψηφιακής εποχής της φωτογραμμετρίας και ειδικότερα της ψηφιακής εικόνας. Μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα ότι η μετάβαση στην ψηφιακή εποχή έγινε με την έλευση της τεχνολογίας των μηχανών CCD. Με την τεχνολογία αυτή γίνεται η λήψη των ψηφιακών εικόνων και επίσης η σάρωση (ψηφιοποίηση) των αναλογικών εικόνων. Η τελευταία διαδικασία παραμένει ευρέως διαδεδομένη, καθώς οι ψηφιακοί φωτογραμμετρικοί σταθμοί (digital photogrammetric workstations) δέχονται βέβαια μόνο ψηφιακές εικόνες, επομένως είναι απαραίτητη η ψηφιοποίηση των αναλογικών εικόνων – που υπάρχουν ή εκείνων που εξακολουθούν να λαμβάνονται με αναλογικές μηχανές – για την είσοδό τους σε αυτά τα συστήματα. Πέραν όμως των κοινών ψηφιακών μηχανών, την τελευταία δεκαετία έχουν εμφανιστεί μια σειρά ψηφιακές αεροφωτομηχανές, των οποίων η χρήση σταδιακά γενικεύεται. Ταυτόχρονα διατίθενται πλέον και πλήθος δεδομένα από δορυφορικές πλατφόρμες, τα οποία βέβαια είναι απευθείας σε ψηφιακή μορφή.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν ψηφιοποιημένες αναλογικές αεροφωτογραφίες και το πρόγραμμα που συντάχθηκε (PHOTOMATCH) αναφέρεται κατ' αρχήν σε ψηφιοποιημένες αεροφωτογραφίες. Σημειώνεται ότι για τις ανάγκες της εργασίας είχαν εξασφαλιστεί και εικόνες από ψηφιακές αεροφωτομηχανές, η διαχείρισή τους όμως αποδείχτηκε σχετικά δύσκολη και έτσι τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν.

1.2 Χαρακτηριστικά ψηφιακών εικόνων

Η ψηφιακή εικόνα αποτελείται από ένα σύνολο εικονοψηφίδων, διατεταγμένων κατά γραμμές και στήλες. Κάθε εικονοψηφίδα λαμβάνει μια ψηφιακή τιμή. Η κλίμακα των ψηφιακών τιμών εξαρτάται από την ραδιομετρική ανάλυση της εικόνας. Για ανάλυση 8-bit οι δυνατές διαφορετικές τιμές (τόνοι) είναι $2^8 = 256$. Συνεπώς μια εικονοψηφίδα σε μια ψηφιακή εικόνα μπορεί να λάβει μια από αυτές τις 256 τιμές. Ορίζεται η ψηφιακή τιμή 0 να αντιστοιχεί στο μαύρο και η ψηφιακή τιμή 255, ή αλλιώς η μέγιστη κάθε φορά τιμή, να αντιστοιχεί στο λευκό. Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά μιας ψηφιακής εικόνας είναι τα εξής.

Γεωμετρική ανάλυση. Στην περίπτωση των απευθείας ψηφιακών εικόνων η ανάλυση αναφέρεται στον αριθμό των εικονοψηφίδων μιας λήψης. Για παράδειγμα, ψηφιακή μηχανή επίγειων λήψεων ανάλυσης 25 Mpixel ισοδυναμεί με εικόνα 5000×5000 εικονοψηφίδων (εάν είναι γνωστή η διάσταση της φωτοευαίσθητης επιφάνειας, είναι δυνατόν να υπολογιστεί το πραγματικό μέγεθος της εικονοψηφίδας). Στην περίπτωση

της ψηφιοποιημένης αναλογικής εικόνας ο αριθμός των εικονοψηφίδων εξαρτάται από την ανάλυση σάρωσής της. Το ενδεικτικό μέτρο της ανάλυσης σάρωσης είναι ο αριθμός των εικονοψηφίδων ανά μία ίντσα (dpi) ή διαφορετικά ο αριθμός των εικονοψηφίδων ανά 25.4 mm.

Ραδιομετρική ανάλυση. Αναφέρεται στον αριθμό των πιθανών ψηφιακών τιμών που μπορεί να έχει μια εικονοψηφίδα. Είναι σαφές ότι μεγαλύτερη ραδιομετρική ανάλυση προσφέρει περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας της εικόνας. Παρ' όλο που η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει αποθήκευση των εικόνων και σε ανάλυση μεγαλύτερη των 8 bit (ή των 24 bit για τις έγχρωμες εικόνες), αυτή έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται πρακτικά σε όλα τα φωτογραμμετρικά συστήματα (Potukoná, 2005). Η βέλτιστη επιλογή ραδιομετρικής ανάλυσης εξαρτάται βέβαια από τη εφαρμογή. Έτσι, εικόνες 1 bit (δυναμικές εικόνες) είναι χρήσιμες στην εξαγωγή ακμών (edge detection) ή στην διαδικασία μετατροπής αρχείων ψηφιδωτής μορφής σε αρχεία διανυσματικής μορφής (raster to vector). Πολύ υψηλή ανάλυση, όπως ανάλυση 12 bit, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ιατρικής ή και σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης προκειμένου να είναι δυνατή η διάκριση στοιχείων που στηρίζεται σε πολύ μικρές διαφορές ραδιομετρίας σε διάφορα κανάλια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Γενικά πάντως στις φωτογραμμετρικές εργασίες έχει επικρατήσει η ανάλυση των 8 bit (ή των 24 bit).

Δύο άλλα χαρακτηριστικά των ψηφιακών εικόνων με μεγάλη σημασία για την ψηφιακή φωτογραμμετρία είναι η φωτεινότητα και η αντίθεση. Για την ανθρώπινη αντίληψη οι έννοιες αυτές είναι ίσως κάπως αφηρημένες. Για την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας όμως έχουν σαφείς μαθηματικούς ορισμούς.

Η φωτεινότητα αντιστοιχεί στη μέση τιμή των τόνων μιας εικόνας. Όσο μεγαλύτερη είναι η μέση τιμή τόσο "φωτεινότερη" είναι κατ' αρχήν η εικόνα.

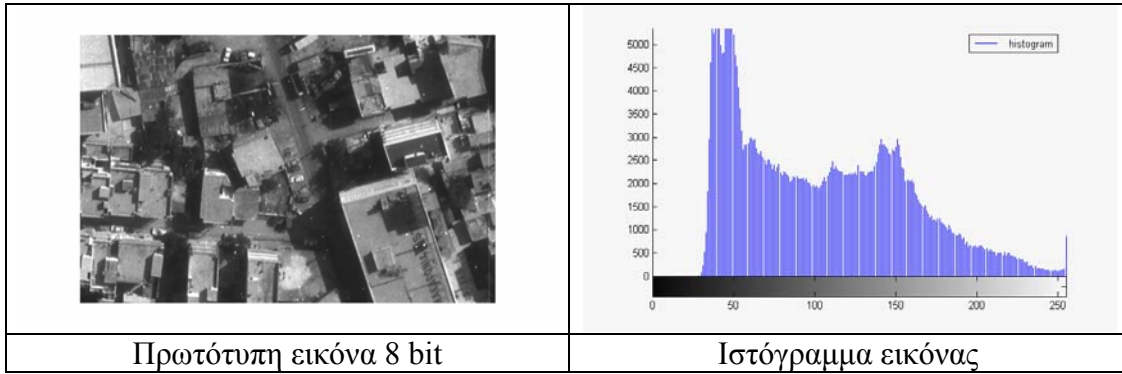
$$\text{Mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M g(i, j)}{NM}, \text{ όπου } g(i, j) \text{ είναι ο τόνος κάθε εικονοψηφίδας.}$$

Η αντίθεση (contrast) αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση της εικόνας και η αναλυτική της έκφραση είναι

$$\text{Std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (g(i, j) - \text{mean})^2}{NM - 1}}$$

Ένας εποπτικός τρόπος για να δει κανείς τον αριθμό των εικονοψηφίδων που λαμβάνουν μια ψηφιακή τιμή είναι το ιστόγραμμα της εικόνας. Παρακάτω δίδεται η μορφή του ιστογράμματος μιας εικόνας.

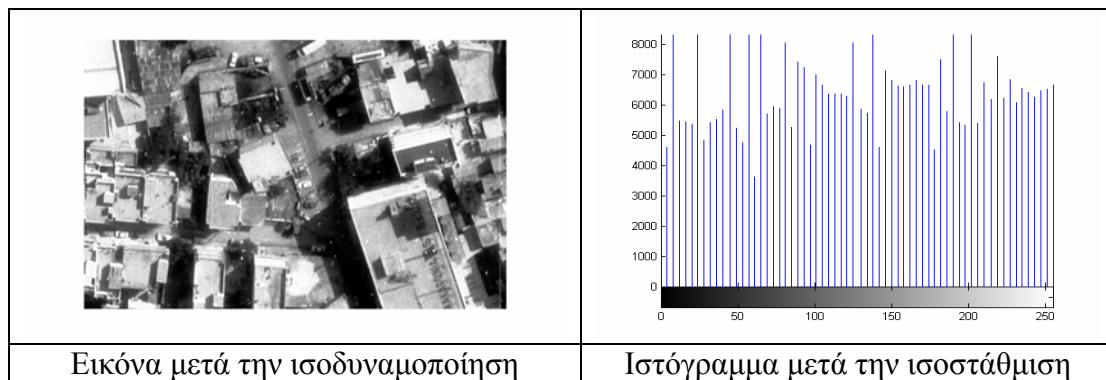
Η μορφή του ιστογράμματος έχει ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμογές της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Έτσι, από το παρακάτω ιστόγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Εμφανίζεται μια περιοχή του φάσματος των ψηφιακών τιμών περί την τιμή 50 με αισθητά μεγαλύτερη συχνότητα. Υπάρχει μια περιοχή του φάσματος των τιμών από 0 μέχρι περίπου την τιμή 30 όπου η συχνότητα είναι μηδενική (δεν υπάρχουν εικονοψηφίδες με τέτοιους τόνους).



Ισοστάθμιση ιστογράμματος. Με τη διαδικασία της ισοστάθμισης του ιστογράμματος κάθε εικονοψηφίδα της αρχικής εικόνας λαμβάνει νέα ψηφιακή τιμή

$$k = \sum_{i=1}^j N_i / T$$

όπου T είναι ο συνολικός αριθμός των εικονοψηφίδων της εικόνας και N_i είναι ο αριθμός των εικονοψηφίδων στο ιστόγραμμα της εικόνας με τιμές μικρότερες ή ίσες της τιμής j. Παρακάτω φαίνονται η εικόνα και το ιστόγραμμά της μετά την ισοστάθμιση.



1.3 Σύστημα αναφοράς των ψηφιακών εικόνων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχουν δύο τρόποι απόκτησης ψηφιακών εικόνων, η απευθείας λήψη τους και η σάρωση αναλογικών εικόνων.

Το σύστημα αναφοράς των απευθείας ψηφιακών εικόνων ορίζεται ως εξής. Από το μέγεθός τους (αριθμός εικονοψηφίδων × αριθμός εικονοψηφίδων) μπορεί να εξαχθούν στο σύστημα της εικόνας οι συντεταγμένες του κέντρου:

$$i_k = \frac{\text{αριθμός_pixel_κατά_γραμμή}}{2} \quad j_k = \frac{\text{αριθμός_pixel_κατά_στήλη}}{2}$$

Η εικονοψηφίδα αυτή (i_k, j_k) ορίζει το κέντρο της εικόνας ως αρχή του συστήματος εικονοσυντεταγμένων. Όμως οι μετρήσεις στις ψηφιακές εικόνες γίνονται στο σύστημα αναφοράς των εικονοψηφίδων που είναι ένα αριστερόστροφο, ενώ οι γνωστές εξισώσεις της φωτογραμμετρίας (συγγραμμικότητας και συνεπιπεδότητας) απαιτούν με-

τρήσεις σε δεξιόστροφο σύστημα. Απαιτείται συνεπώς η μετατροπή των συντεταγμένων σε ένα δεξιόστροφο σύστημα εικονοσυντεταγμένων ως εξής:

$$x = j - j_{\kappa} \text{ και } y = -i + i_{\kappa}$$

Επιπλέον, εφόσον οι εικονοσυντεταγμένες είναι σε μονάδες εικονοψηφίδων, η σταθερά της μηχανής – όπως άλλωστε και όλα τα άλλα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού (πχ. οι συντελεστές των πολυωνύμων της διαστροφής του φακού) – θα πρέπει επίσης να είναι εκφρασμένη σε μονάδες εικονοψηφίδων.

Στην περίπτωση των ψηφιοποιημένων αναλογικών φωτογραφιών η μετατροπή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

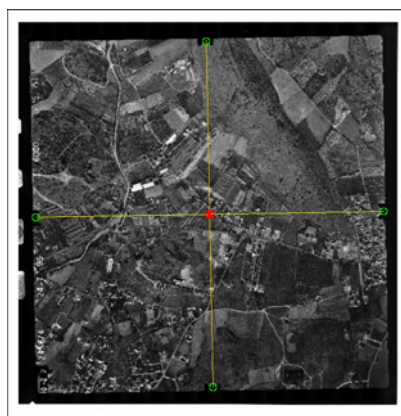
A) Με χρήση του αφινικού μετασχηματισμού που δίνει τις εικονοσυντεταγμένες κάθε εικονοψηφίδας:

$$x = a_1 + a_2i + a_3j$$

$$y = a_4 + a_5i + a_6j$$

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες pixel των εικονοσημάτων και οι εικονοσυντεταγμένες τους από τα στοιχεία βαθμονόμησης της μηχανής.

B) Εκτός από τον τρόπο αυτό, η εικόνα μπορεί να αντιμετωπιστεί και σαν απευθείας ψηφιακή. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ο ορισμός του πρωτεύοντος σημείου (i_0, j_0) από την τομή των εικονοσημάτων, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.



Εικόνα 1. Ορισμός αρχής συστήματος εικονοσυντεταγμένων.

Τότε οι σχέσεις μετατροπής είναι

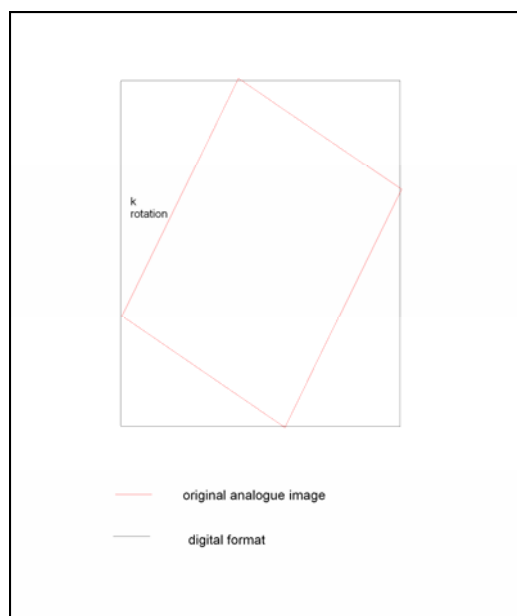
$$x = (j - j_0) \times \text{μέγεθος εικονοψηφίδας}$$

$$y = (-i + i_0) \times \text{μέγεθος εικονοψηφίδας}$$

Ο ορισμός των διαστάσεων της εικονοψηφίδας μπορεί να γίνει από τα τεχνικά στοιχεία του σαρωτή (dots per inch), οπότε η διάσταση σε mm είναι 2.54/dpi. Η διάσταση της εικονοψηφίδας μπορεί να οριστεί και από την γνωστή απόσταση των εικονοσημάτων κατά x ή/και κατά y. Στις εφαρμογές της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και οι

δύο εικόνες του ζεύγους για τον ορισμό της διάστασης ως μέσου όρου των τεσσάρων διαστάσεων. Πρέπει να σημειώσει κανείς ότι, στην πραγματικότητα, θα μπορούσε κανείς να εργαστεί και απευθείας σε μονάδες εικονοψηφίδων (μετασχηματίζοντας όμως και την σταθερά της μηχανής επίσης σε διαστάσεις εικονοψηφίδων).

Υπογραμμίζεται πάντως ότι με αυτόν τον τρόπο ορισμού του συστήματος αναφοράς των εικονοσυντεταγμένων εισάγεται μια στροφή κ_{σ} στο επίπεδο, η οποία οφείλεται στην τοποθέτηση της εικόνας στον σαρωτή (Εικ. 2).



Εικόνα 2. Στροφή κ μεταξύ συστημάτων εικόνας και εικονοσυντεταγμένων.

Η στροφή αυτή είναι η στροφή του συστήματος των εικονοσυντεταγμένων ως προς το σύστημα της εικόνας και προφανώς στα στοιχεία του προσανατολισμού της εικόνας εμφανίζεται πλέον στην γωνία στροφής $\kappa = \kappa_{\epsilon} + \kappa_{\sigma}$, όπου κ_{ϵ} είναι η πραγματική στροφή της εικόνας και κ_{σ} η στροφή κατά την σάρωσή της. Προφανώς, ο σχετικός προσανατολισμός του ζεύγους θα είναι επηρεασμένος κατά κ από την διαφορά των γωνιών στροφής κ_{σ} των δύο εικόνων. Αυτό όμως δεν επηρεάζει την ακρίβεια της λύσης εφόσον οι μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων έχουν γίνει στο σύστημα που αναφέρθηκε και έχει ληφθεί υπόψη το πραγματικό πρωτεύον σημείο των εικόνων.

Αξιολογώντας τους δύο τρόπους ορισμού του συστήματος αναφοράς των εικονοσυντεταγμένων μπορεί να επισημάνει κανείς τα εξής. Ο αφινικός μετασχηματισμός – που απαιτείται στην πρώτη περίπτωση αλλά αποφεύγεται στην δεύτερη – μπορεί να διορθώσει την γωνία κ_{σ} , συνεπώς προκύπτουν τα αληθή αποτελέσματα σχετικού προσανατολισμού του στερεοζεύγους. Ακόμα, ο αφινικός μετασχηματισμός μπορεί να διορθώσει τυχόν γραμμικές παραμορφώσεις των εικόνων. Από την άλλη μεριά, η θεώρηση της εικόνας σαν απευθείας ψηφιακής έχει το πλεονέκτημα αφενός ότι απλουστεύει την διαδικασία παρακάμπτοντας το στάδιο του αφινικού μετασχηματισμού, και αφετέρου ότι οι εικόνες μπορούν πλέον να αποτελέσουν στοιχείο εισόδου σε ορισμένα σύγχρονα φωτογραμμετρικά λογισμικά. Για παράδειγμα, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATCH-T της INFO για να παραχθεί πυκνό ψηφιακό μοντέλο εδάφους για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Το λογισμικό αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να χειρίζεται απευθείας ψηφιακές εικόνες, οπότε απαιτήθηκε η χρήση των ψηφιοποιημένων αναλογικών εικόνων ως απευθείας ψηφιακών.

Κεφάλαιο 2 – Αλγόριθμοι ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος

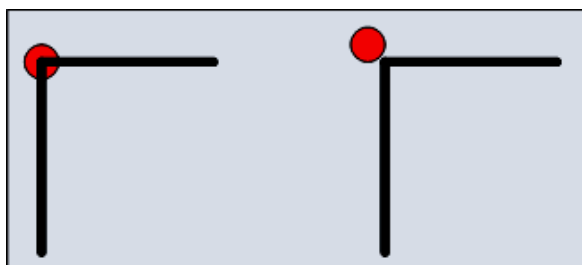
Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται τους τελεστές ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος (interest point operators) ή τελεστές ανίχνευσης άκρων (corner detectors) που έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη φωτογραμμετρία και ειδικότερα στη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης εικόνων. Εκτός από διαδικασίες ψηφιακής συνταύτισης που αποσκοπούν στην εύρεση ομολογιών μεταξύ χαρακτηριστικών (features), όπως ευθείες, ακμές ή σημεία, τα χαρακτηριστικά σημεία είναι πολύ χρήσιμα και σε διαδικασίες επιφανειακής συνταύτισης, προσφέροντας σημεία που διακρίνονται από το περιβάλλον τους και συνεπώς μπορεί εκεί να αναζητηθεί ομολογία περιοχών της εικόνας. Με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία χαρακτηριστικά σημεία που εξάγονται με τον τελεστή Harris.

2.1 Χαρακτηριστικά αλγορίθμων ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος

Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία το χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι τα μεμονωμένα σημεία, τα οποία στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως “σημεία ενδιαφέροντος”. Γι’ αυτό το λόγο το υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού αφιερώνεται στην εκτενή περιγραφή των αλγορίθμων “ανίχνευσης άκρων” (βάσει κυρίως της ιστοσελίδας <http://www.cim.mcgill.ca/~dparks/CornerDetector.htm>).

Μια αλγοριθμική διαδικασία είναι μια συστηματική μέθοδος υπολογισμού (λογισμός), η οποία συνίσταται στο να φτάσει κανένας στο ζητούμενο αποτέλεσμα με μια ακολουθία πράξεων, ντετερμινιστικά καθορισμένη, που εκτελούνται σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες [Λεξικό εννοιών της Unesco]. Ένας αλγόριθμος ανίχνευσης άκρων θα πρέπει να πληρεί τα παρακάτω κριτήρια

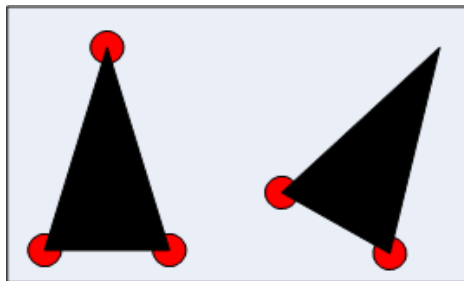
1. Όλα τα “πραγματικά άκρα” πρέπει να ανιχνεύονται.
2. Δεν πρέπει να ανιχνεύονται “λανθασμένα άκρα”.
3. Τα σημεία που ανιχνεύονται ως άκρα πρέπει να λαμβάνουν από τον αλγόριθμο ακριβείς συντεταγμένες στο σύστημα της εικόνας. Η παραπάνω ιδιότητα του αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στη φωτογραμμετρία, όπου τελικός στόχος είναι η εύρεση ακριβών και αξιόπιστων συντεταγμένων αντικειμένου. Επιπλέον αυτή η ιδιότητα είναι που καθορίζει και τη χρησιμότητα ορισμένων αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στο επιστημονικό πεδίο της όρασης υπολογιστών και στη φωτογραμμετρία.



Εικόνα 3. Αποδεκτός και μη αποδεκτός εντοπισμός άκρου.

4. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης πρέπει να εμφανίζει υψηλό ποσοστό επαναληψιμότητας. Δηλαδή τα σημεία που ανιχνεύονται σε μια εικόνα ως άκρα θα πρέπει

να είναι τα ίδια σε όσες επαναλήψεις εφαρμογής του αλγορίθμου γίνουν. Η ιδιότητα αυτή είναι κρίσιμη στις εφαρμογές που αφορούν το επιστημονικό αντικείμενο της φωτογραμμετρίας, καθώς είναι σύνηθες τμήματα του προς απόδοση αντικειμένου να έχουν υποστεί στροφή στο επίπεδο των εικόνων λόγω σημαντικής διαφοράς των στοιχείων του εξωτερικού τους προσανατολισμού. Αυτό αφορά κυρίως την περίπτωση των λήψεων μικρών αποστάσεων (close-range photogrammetry) καθώς στη γενική περίπτωση των αεροφωτογραφιών δεν υπάρχουν τόσο μεγάλες διαφορές στα γωνιακά στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών των αεροφωτογραφιών. Την ιδιότητα αυτή δεν την ικανοποιούν πλήρως οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στη φωτογραμμετρία, όπως ο αλγόριθμος Harris, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Το ποσοστό επαναληψιμότητας ορίζεται ως ο λόγος των σημείων που βρέθηκαν και στις δύο επαναλήψεις του αλγορίθμου προς τον συνολικό αριθμό των σημείων που ανιχνεύτηκαν από τον αλγόριθμο στη δεύτερη επανάληψή του. Παρακάτω δίδεται ένα παραστατικό σκαρίφημα όπου το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου όσον αφορά την επαναληψιμότητα είναι 66.67%.

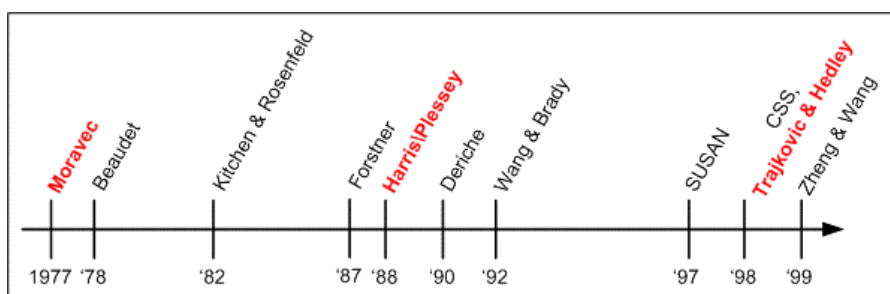


5. Ο αλγόριθμος δεν θα πρέπει να είναι ευαίσθητος στο θόρυβο της εικόνας. Η ανίχνευση ως άκρων στοιχείων της εικόνας που περιέχουν θόρυβο δεν είναι επιθυμητή.
6. Ο αλγόριθμος θα πρέπει να είναι υπολογιστικά ρεαλιστικός. Είναι προφανές ότι αυτό το τελευταίο κριτήριο εξαρτάται από την υπολογιστική ισχύ του συστήματος που διατίθεται.

Κατά χρονολογική σειρά, στη φωτογραμμετρία χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι:

- Αλγόριθμος Moravec
- Αλγόριθμος Förstner
- Αλγόριθμος Harris/Plessey

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται η χρονολογική σειρά των χρησιμοποιηθέντων αλγορίθμων ανίχνευσης άκρων.



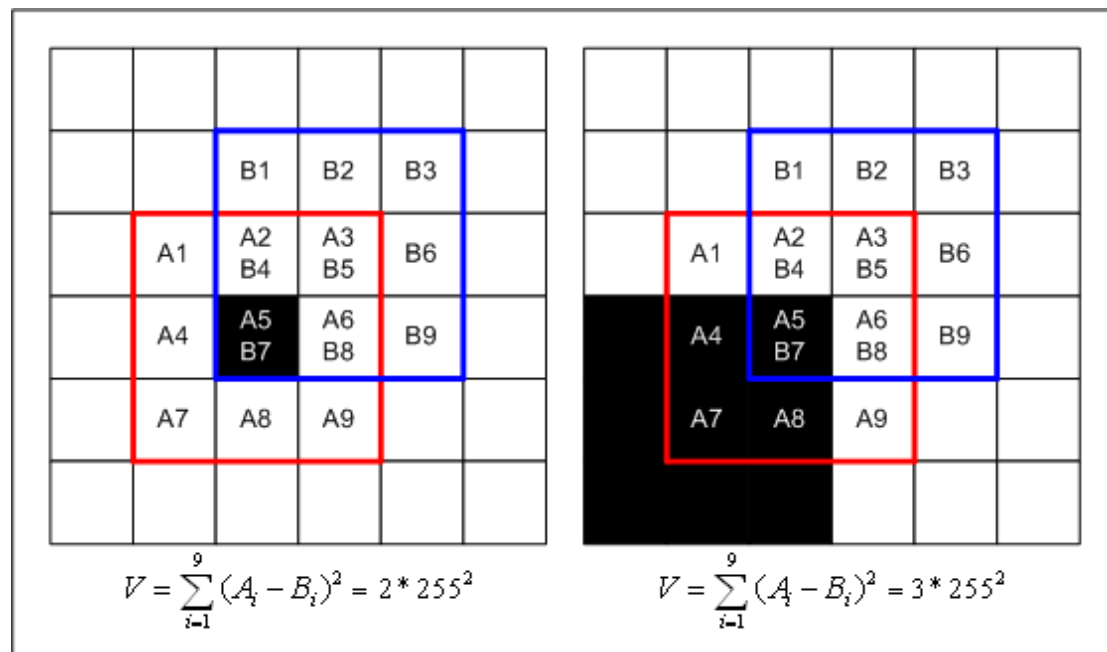
Εικόνα 4. Χρονική διαδοχή χρησιμοποιούμενων τελεστών ανίχνευσης άκρων.

2.2 Τελεστής Moravec

Ο πρώτος λοιπόν τελεστής που χρησιμοποιήθηκε ήταν του Moravec (Moravec, 1977, 1979). Ο Moravec όρισε τα σημεία ως “points of interests”, δηλαδή “σημεία ενδιαφέροντος”. Η ονομασία αυτή χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα για την περιγραφή σημείων που προκύπτουν από κάποια διαδικασία ανίχνευσης άκρων.

Οι αλγόριθμοι ανίχνευσης άκρων ανιχνεύουν σημεία τα οποία έχουν μεγάλη μεταβολή τόνου σε όλες τις διευθύνσεις. Η οντότητα “σημείο” είναι ταυτόσημη εν προκειμένω με την οντότητα “εικονοψηφίδα”. Κάθε εικονοψηφίδα έχει 8 διευθύνσεις στις οποίες κάθε αλγόριθμος ανίχνευσης άκρων πρέπει με κάποιο τρόπο να ελέγξει για την μεταβολής έντασης του τόνου. Για την ανίχνευση της έντασης μεταβολής του τόνου σε όλες τις διευθύνσεις, ο αλγόριθμος Moravec εκτελεί την εξής διαδικασία.

Έστω ότι στην επόμενη εικόνα ελέγχεται η εικονοψηφίδα A5 ως πιθανό άκρο. Στην αριστερή εικόνα ελέγχεται το σημείο ως προς τη γωνιακότητά του στη μια διαγώνια διεύθυνση προς τα κάτω, ενώ στη δεξιά εικόνα προς τα πάνω.



Στην παραπάνω εικόνα υπολογίζεται για κάθε διεύθυνση η ποσότητα

$$V = \sum_{i=1}^9 (A_i - B_i)^2$$

Η ποσότητα αυτή εκφράζει το “μέτρο γωνιακότητας” μιας διεύθυνσης ενός υποψήφιου άκρου. Είναι προφανές ότι σε κάθε διεύθυνση υπολογίζεται και μια διαφορετική τιμή της ποσότητας V. Επιπλέον όλα τα ελεγχόμενα σημεία δεν παρουσιάζουν τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ποσότητας V στην ίδια διεύθυνση. Συνεπώς για τον ορισμό ενός σταθερού αλγόριθμου που θα εντοπίζει τα άκρα μιας εικόνας πρέπει να οριστεί ένα μέτρο που θα είναι αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας στις οκτώ διευθύνσεις.

Το μέτρο αυτό, για να είναι σταθερός ο αλγόριθμος, θα πρέπει να έχει τις εξής ιδιότητες. Πρώτον, θα πρέπει να έχει την ίδια τιμή ανεξάρτητα από τη σειρά με

την οποία θα γίνει ο υπολογισμός των ποσοτήτων V σε κάθε διεύθυνση. Δεύτερον, αυτή θα πρέπει να είναι σαφώς ενδεικτική της γωνιακότητας του σημείου (δηλαδή της εικονοψηφίδα).

Αυτό το μέτρο γωνιακότητας στην περίπτωση του τελεστή Moravec είναι η ελάχιστη τιμή της ποσότητας V στις οκτώ διευθύνσεις ($\min V$). Συνεπώς για κάθε υποψήφιο σημείο της εικόνας έχει κανείς και μια τιμή ελάχιστης έντασης μεταβολής που είναι και το μέτρο γωνιακότητας του σημείου.

Το επόμενο πρόβλημα που πρέπει να λυθεί είναι ο τρόπος επιλογής των σημείων που θα χαρακτηριστούν ως “σημεία ενδιαφέροντος”. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός κατωφλίου τιμών (threshold) που καθορίζει ποια από τα σημεία για τα οποία έχει υπολογιστεί το μέτρο γωνιακότητας θεωρούνται άκρα, και κατά συνέπεια “σημεία ενδιαφέροντος”.

Ένα επιπλέον ζήτημα που χρήζει αναφοράς είναι οι μονάδες της ποσότητας V και κατά συνέπεια και του κατωφλίου τιμών. Από τη σχέση

$$V = \sum_{i=1}^9 (A_i - B_i)^2$$

φαίνεται ότι οι μονάδες της V είναι καθαροί αριθμοί που αντιστοιχούν στις ψηφιακές τιμές των εικονοψηφίδων υψωμένες στο τετράγωνο. Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία αναφέρονται ενδεικτικά τιμές της V για κάποιες ακραίες περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι οι παρακάτω τιμές αναφέρονται σε παράθυρο υπολογισμού της V 3×3 .

Περιγραφή προτύπου	Τιμή της V
Μεμονωμένη εικονοψηφίδα ψηφιακής τιμής 0 (μαύρο) ανάμεσα σε εικονοψηφίδες ψηφιακών τιμών 255 (λευκά).	$8 \times (0-255)^2 = 520200$
Εικονοψηφίδα με τις γειτονικές της ακριβώς όμοιες με αυτή (θεωρείται ψηφιακή τιμή ομογενούς προτύπου 140).	$8 \times (140-140)^2 = 0$

Είναι προφανές ότι οι παραπάνω τιμές αποτελούν τη μέγιστη και την ελάχιστη αντίστοιχα τιμή της V για σύστημα 8 bit και παράθυρο υπολογισμού 3×3 και αναφέρονται για να γίνει αντιληπτό το εύρος τιμών που λαμβάνει η τιμή V . Όπως προαναφέρθηκε, ως μέτρο γωνιακότητας ορίζεται η ελάχιστη τιμή $\min V$ των 8 τιμών V , η οποία βέβαια αντιστοιχεί σε κάποια διεύθυνση. Η διεύθυνση στην οποία αντιστοιχεί δεν αφορά τον αλγόριθμο του Moravec. Ο ορισμός όμως της ελάχιστης τιμής ως κριτηρίου γωνιακότητας εξασφαλίζει την πλήρωση της δεύτερης προϋπόθεσης, δηλαδή να είναι σαφώς ενδεικτικός της γωνιακότητας του σημείου.

Το παραπάνω εξασφαλίζεται με το εξής σκεπτικό. Σε κάθε υποψήφιο σημείο κατά τον υπολογισμό του V σε μια διεύθυνση συμμετέχουν όλα τα γειτονικά σημεία (πχ. στο παράθυρο ελέγχου 3×3 συμμετέχουν 8 σημεία). Συνεπώς η ποσότητα V κάθε διεύθυνσης περιέχει πληροφορία για όλη την περιοχή γύρω από το σημείο. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από τη σχέση υπολογισμού της V , όλες οι διαφορές των τόνων στο θεωρούμενο παράθυρο συμμετέχουν ισοβαρώς στον υπολογισμό της V σε κάθε διεύθυνση. Η εύρεση μεγάλων τιμών του V σε κάποιες διευθύνσεις και μικρών σε άλλες, δηλαδή το μεγάλο εύρος τιμών της V , είναι μια ένδειξη ότι το σημείο πιθανόν να μην είναι γωνιακό. Εάν όμως η ελάχιστη τιμή της V είναι αρκετά μεγάλη τότε αυξάνεται η βεβαιότητα πως το σημείο είναι πράγματι γωνιακό.

Η ελάχιστη τιμή συνεπώς είναι το αυστηρότερο κριτήριο για τη γωνιακότητα ενός σημείου. Επιπλέον, το κριτήριο της ελάχιστης τιμής του V ισχυροποιεί και το κριτήριο του κατωφλίου.

Αναλυτικά ο αλγόριθμος Moravec ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία.

1) Για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζει στο σύστημα της εικόνας την μεταβολή της έντασης (intensity variation) για μια μετατόπιση (u, v) ως εξής.

$$V_{u,v}(x,y) = \sum (I(x+u+a, y+v+b) - I(x+a, y+b))^2$$

όπου οι μετατοπίσεις (u,v) είναι οι

$$(1,0),(1,1),(0,1),(-1,1),(-1,0),(-1,-1),(-1,0),(-1,-1),(0,-1),(1,-1)$$

2) Δημιουργείται, για κάθε εικονοψηφίδα της θεωρούμενης εικόνας, χάρτης γωνιών με βάση τον υπολογισμό του μέτρου γωνιακότητας

$$C(x,y) = \min(V_{u,v}(x,y)).$$

Μετά την παραγωγή του χάρτη γωνιών, όπου σε κάθε εικονοψηφίδα της αρχικής εικόνας υπάρχει στη θέση της ψηφιακής τιμής (τόνος του γκρι) η γωνιακότητα της εικονοψηφίδας C , είναι δυνατό σε αυτόν το νέο χώρο να εφαρμοστούν όλες οι τεχνικές της επεξεργασίας εικόνας.

3) Εφαρμόζεται στον χώρο της γωνιακότητας $C(x,y)$ η τεχνική της κατωφλίωσης με επιλογή κατωφλίου τιμών της γωνιακότητας $C_{critical}$, κάτω από το οποίο οι τιμές γωνιακότητας τίθενται ίσες με το μηδέν. Οι εικονοψηφίδες με τιμές γωνιακότητας μεγαλύτερες από την κρίσιμη ($C > C_{critical}$) θεωρούνται “άκρα”.

4) Εκτελείται ο αλγόριθμος ‘αφαίρεσης των μη μεγίστων’ (non maximal suppression). Ο αλγόριθμος αυτός επιτελεί την εξής λειτουργία. Μετά την κατωφλίωση των τιμών γωνιακότητας κάθε εικονοψηφίδας παραμένουν στο χάρτη γωνιακότητας με μη μηδενικές τιμές οι εικονοψηφίδες εκείνες με μέτρο γωνιακότητας που υπερβαίνει το ορισμένο κατώφλι. Σε μια θέση εικονοψηφίδας η οποία είναι πραγματικό άκρο εμφανίζεται ένα σύνολο εικονοψηφίδων περί αυτήν με μη μηδενικές τιμές μέτρου γωνιακότητας. Αυτό συμβαίνει διότι ως γνωστόν η εικόνα αποτελείται από διακεκριμένες δειγματοληψίες τόνων του συνεχούς χώρου τόνων του αντικειμένου. Το σύνολο λοιπόν των εικονοψηφίδων που σε μια θέση εμφανίζονται με μη μηδενικές τιμές αναφέρονται στο ίδιο άκρο. Ο αλγόριθμος όμως πρέπει να δίνει ως άκρο μια εικονοψηφίδα. Επιπλέον, η εικονοψηφίδα αυτή πρέπει να είναι σαφώς και σωστά ορισμένη στο σύστημα των συντεταγμένων της εικόνας. Κατά τον αλγόριθμο αφαίρεσης των μη μεγίστων (non maximal suppression) η εικονοψηφίδα που χαρακτηρίζεται ως άκρο είναι εκείνη που εμφανίζει τη μέγιστη τιμή μέτρου γωνιακότητας σε μια ορισμένη περιοχή. Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος εντοπίζει την περιοχή όπου εμφανίζονται εικονοψηφίδες μη μηδενικού μέτρου γωνιακότητας. Βρίσκει την εικονοψηφίδα με το μέγιστο μέτρο γωνιακότητας και μηδενίζει τα μέτρα γωνιακότητας των υπολοίπων γειτονικών εικονοψηφίδων.

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου, στο χάρτη γωνιακότητας απομένουν με μη μηδενικές τιμές μέτρου γωνιακότητας μόνο οι εικονοψηφίδες που χαρακτηρίζονται ως άκρα.

X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	X	X
X	X	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	2	1	X	X
X	X	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	1	1	X	X
X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Εικόνα 5. Παράδειγμα χάρτη γωνιών

Είναι προφανές ότι στον παραπάνω χάρτη ανιχνεύτηκαν δύο σημεία (εικονοψηφίδες) ως άκρα με βάση τον αλγόριθμο Moravec, οι δύο εικονοψηφίδες με τιμές $C = 2$. Δεν είναι όμως και οι δύο “άκρα”. Απαιτείται συνεπώς ένας αλγόριθμος που θα αφαιρεί τα τοπικά μέγιστα. Στη βιβλιογραφία τα τοπικά αυτά μέγιστα αναφέρονται ως “μεμονωμένες εικονοψηφίδες” (isolated pixels) για να διακρίνονται από τα άκρα. Συνεπώς απαιτείται η ανάπτυξη ενός αλγόριθμου που να αφαιρεί τις “μεμονωμένες εικονοψηφίδες”. Αυτές δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης σημείων για τους παρακάτω λόγους.

- 1) Είναι πιθανό να είναι αποτέλεσμα θορύβου που δεν εξαλείφθηκε κατά τις προγενέστερες διαδικασίες αφαίρεσης του θορύβου (προεπεξεργασία εικόνας).
- 2) Δεν δημιουργούν σαφές και πλήρως κατανοητό πρότυπο για τις τεχνικές του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης και της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης. Πιο αναλυτικά, ένα σημείο που δεν είναι τοπικό μέγιστο (non isolated pixel), όπως για παράδειγμα η γωνία ενός κτιρίου, δημιουργεί ένα πρότυπο που μπορεί να διακριθεί από τον αλγόριθμο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης καθώς η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση στις δύο εικόνες, για ένα υποθετικό παράθυρο κεντραρισμένο στο ομόλογο σημείο, λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές που είναι αισθητά διαφορετικές από τις τιμές ενός γειτονικού σημείου, όπως ένα σημείο που ανήκει στην ακμή του κτιρίου. Κατ’ αυτόν τον τρόπο η συνταύτιση άκρων με τον μέγιστο συντελεστή συσχέτισης καθίσταται πιο “ισχυρή” και αξιόπιστη διαδικασία όταν της ζητείται η ανίχνευση ομόλογων άκρων. Στην περίπτωση όμως του τοπικού μέγιστου (isolated pixel) δεν δημιουργείται ένα σαφές πρότυπο διότι οι τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης δεν επηρεάζονται αισθητά από μια μόνο εικονοψηφίδα. Συνεπώς δεν επηρεάζεται και ο συντελεστής συσχέτισης. Το ίδιο πρόβλημα δημιουργείται και στη διαδικασία της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης. Η διαδικασία της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης βασίζεται στην εύρεση ενός αφινικού μετασχηματισμού που μετασχηματίζει τις εικονοψηφίδες ενός θεωρούμενου παραθύρου στην εικόνα αναφοράς στο ομόλογο παράθυρο στην εικόνα αναζήτησης με τη δέσμευση οι διαφορές των ψηφιακών τιμών (τόνων) μεταξύ των ομολόγων εικονοψηφίδων των δύο παραθύρων να είναι ελάχιστες (κριτήριο βελτιστοποίησης). Η επιτυχία του αλγόριθμου εξαρτάται από την επιτυχή ταύτιση των ομολόγων εικονοψηφίδων των δύο παραθύρων. Είναι προφανές ότι η ταύτιση αυτή δεν μπορεί να είναι επιτυχής στην περίπτωση που τα δύο παράθυρα

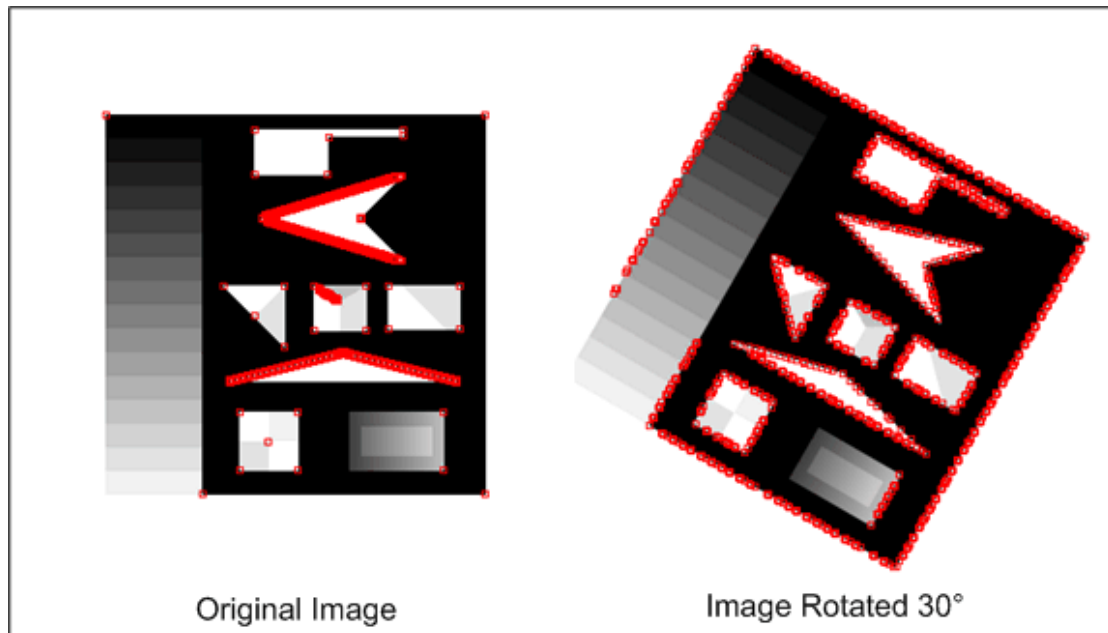
ορίζονται με βάση μια “μεμονωμένη εικονοψηφίδα”.

• *Προβλήματα του αλγορίθμου Moravec*

Το εξαγόμενο αποτέλεσμα του αλγορίθμου Moravec, που είναι αρχικά ο χάρτης μεταβολής εντάσεων (intensity variation), εξαρτάται ή καλύτερα καθορίζεται από τον ορισμό του συστήματος αναφοράς που εν προκειμένω είναι το σύστημα των συντεταγμένων εικόνας (σύστημα pixel). Οι 8 διευθύνσεις κατά τις οποίες υπολογίζονται οι μεταβολές των εντάσεων σύμφωνα με τη σχέση

$$V_{u,v}(x,y) = \sum (I(x+u+a, y+v+b) - I(x+a, y+b))^2$$

καθορίζονται από το σύστημα αναφοράς. Οι τιμές των μεταβολής εντάσεων σε κάθε μια από τις 8 διευθύνσεις, δεδομένου του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας, καθορίζονται από τις ψηφιακές τιμές των γειτονικών της εξεταζόμενης εικονοψηφίδας. Συνιστούν δηλαδή κατά κάποιον τρόπο μια τοπολογία που είναι βέβαια ανεξάρτητη από το σύστημα αναφοράς της εικόνας. Αυτό σημαίνει ότι εάν στραφεί η εικόνα κατά μια γωνία ο αλγόριθμος θα υπολογίσει διαφορετικές μεταβολές έντασης σε κάθε μια από τις 8 διευθύνσεις. Συνεπώς θα προκύψει και διαφορετικό μέτρο γωνιακότητας (C) για το ίδιο άκρο. Δεδομένου δε ότι στην επεξεργασία εικόνων του 3D χώρου που πραγματοποιείται στη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών τα σημεία του χώρου υφίστανται κεντρική προβολή, είναι εύκολο να συνάγουμε το συμπέρασμα ότι τα σημεία που επιλέγονται ως άκρα δεν είναι τα ίδια σε όλες τις εικόνες όπου εμφανίζεται μια περιοχή του 3D χώρου. Η αδυναμία αυτή του αλγορίθμου Moravec ονομάζεται *ανισοτροπία*. Το φαινόμενο φαίνεται παραστατικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 6. Φαινόμενο ανισοτροπίας.

Στην Εικ. 6 φαίνονται δύο απεικονίσεις του ίδιου αντικειμένου. Η δεύτερη προέκυψε από την πρώτη με απλή στροφή κατά 30°. Χαρακτηριστικότερο όλων είναι το παράδειγμα του πρώτου σχήματος, όπου στην αρχική εικόνα ο αλγόριθμος Moravec εξάγει 6 σημεία ενδιαφέροντος, ενώ στη στραμμένη εικόνα εξάγει πάνω από 30 σημεία.

Η ιδιότητα αυτή απαντάται στη διεθνή βιβλιογραφία και με τον όρο “περιστροφική αστάθεια” (rotational instability).

Απόκριση σε θόρυβο

Είναι γνωστό ότι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζεται στην επεξεργασία εικόνας είναι ο θόρυβος που ενυπάρχει σε αυτές. Στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας ο θόρυβος εκφράζεται ως ένας αριθμός εικονοψηφίδων με ψηφιακές τιμές που δεν ανταποκρίνονται στο αντικείμενο που αναπαριστούν αλλά είναι αποτέλεσμα τυχαίων συμβάντων κατά τη λήψη ή τη σάρωσή της εικόνας. Ο θόρυβος στο ιστόγραμμα της εικόνας γίνεται συχνά αντιληπτός ως ένας μικρός αριθμός εικονοψηφίδων που έχουν συνήθως ακραίες τιμές (κοντά στο 0 ή στο 255 σε σύστημα 8 bit). Εντοπίζονται από το ιστόγραμμα στα δύο άκρα του άξονα των ψηφιακών τιμών. Ο θόρυβος στη φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών έχει και μια άλλη πλευρά. Στις εφαρμογές τους πραγματοποιείται συχνά επεξεργασία ζεύγους εικόνων, και μια σημαντική λειτουργία των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται είναι η εύρεση ομολογιών σημείων σε ζεύγος. Οι ομολογίες των σημείων πρέπει να είναι γνωστές με υποψηφιακή ακρίβεια. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τα σημεία που επιλέγονται ως ομόλογα να είναι καλά ορισμένα. Το πρόβλημα είναι ότι η επιλογή ενός καλά ορισμένου σημείου στη μια εικόνα, που όμως αντιστοιχεί σε θόρυβο, και η αναζήτησή του στην άλλη δεν δίνει οδηγεί σε ομολογία, καθώς οι δύο εικονοψηφίδες που ενδεχομένως θα βρεθούν δεν είναι ομολογες (δεν αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο του αντικειμένου). Στην εφαρμογή του αλγορίθμου Moravec τα σημεία που αντιστοιχούν σε θόρυβο επιλέγονται αφού εμφανίζουν σημαντική μεταβολή έντασης και στις 8 διευθύνσεις.

Μεγάλη απόκριση στις ακμές

Εξ ορισμού οι ακμές (edges) στις εικόνες ενός μόνο καναλιού (grayscale images) είναι τμήματα της εικόνας όπου το μέγεθος της κλίσης των τόνων της εικόνας είναι μεγάλο. Αυτό σημαίνει ότι είναι τμήματα της εικόνας όπου η ένταση μεταβάλλεται γρήγορα σε ορισμένες διευθύνσεις. Για παράδειγμα, η μεταβολή έντασης εγκάρσια στη διεύθυνση μιας ευθείας γραμμής είναι μεγάλη, ενώ η ένταση μεταβολής κατά μήκος της γραμμής είναι μικρή.

X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	X	X
X	X	1	2	1	0	0	1	1	0	0	1	2	1	X	X
X	X	2	2	2	0	0	2	1	0	0	1	1	1	X	X
X	X	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Εικόνα 7. Εσφαλμένη ανίχνευση εικονοψηφίδας ως άκρου κατά μήκος ακμής.

Έχει διαπιστωθεί ότι ο αλγόριθμος Moravec είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις περιπτώ-

σεις εκείνες όπου μια εικονοψηφίδα κατά μήκος μιας ακμής έχει σημαντική διαφορά έντασης από τις γειτονικές της της ίδιας ακμής. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο. Σε μια τέτοια περίπτωση η μεταβολή έντασης γύρω και από τις 8 διευθύνσεις θα είναι σχετικά μεγάλη. Συνεπώς σχετικά μεγάλη θα είναι και η ελάχιστη μεταβολή έντασης που είναι το μέτρο γωνιακότητας της εικονοψηφίδας. Κατά συνέπεια θα εμφανίζεται ως άκρο μια εικονοψηφίδα που είναι τμήμα μιας ακμής. Στην Εικ. 7 φαίνεται μια τέτοια περίπτωση.

Το εικονοστοιχείο που υποδεικνύεται στην παραπάνω εικόνα έχει εκτιμηθεί από τον αλγόριθμο ως άκρο. Όπως φαίνεται από τον χάρτη γωνιακότητας το σημείο αυτό έχει το ίδιο μέτρο γωνιακότητας με το πραγματικό άκρο που φαίνεται στον χάρτη. Αυτό σημαίνει ότι το λανθασμένα εκτιμημένο άκρο δεν θα εξαλειφθεί κατά τη διαδικασία της κατωφλίωσης των μέτρων γωνιακότητας.

2.3 Τελεστής Harris

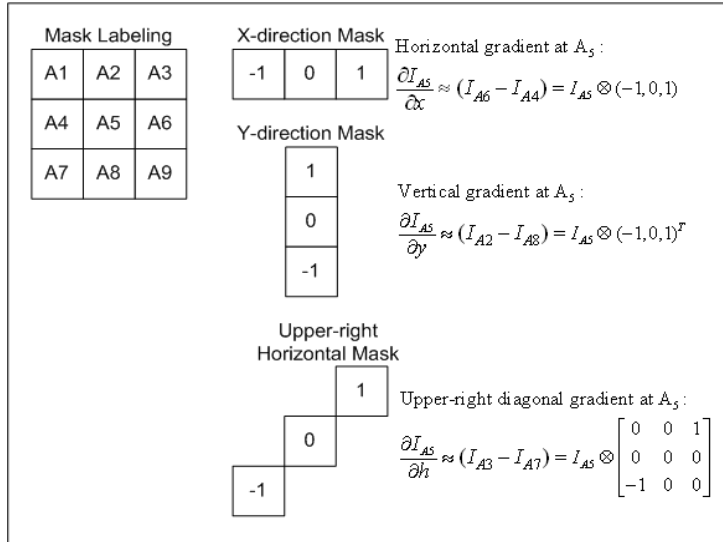
Ο τελεστής αυτός αναπτύχθηκε από τους Chris Harris και Mike Stephens το 1998 ως ένα βήμα χαμηλού επιπέδου (ο όρος εννοείται στη σειρά των ενεργειών επεξεργασίας των εικόνων) που έχει σκοπό να βοηθήσει τους ερευνητές στο επιστημονικό πεδίο της όρασης υπολογιστών, που δραστηριοποιούνταν στην όραση μηχανών με σκοπό να αναπτύξουν μια διαδικασία κατά την οποία ένα robot θα μπορούσε να αντιληφθεί το περιβάλλον του από μια σειρά εικόνων. Ειδικότερα, οι Harris και Stephens ασχολήθηκαν με τη χρησιμοποίηση των τεχνικών ανάλυσης της κίνησης με σκοπό να καταγράψουν το περιβάλλον βασισμένοι σε μια μόνο κάμερα. Όπως ακριβώς λίγα χρόνια πριν και ο Moravec, χρειάζονταν μια μέθοδο αντιστοίχισης σημείων ανάμεσα σε διαδοχικές εικόνες της ίδιας μηχανής. Ανέπτυξαν μια συνδυασμένη μέθοδο που ανιχνεύει άκρα (corners) και γραμμικά στοιχεία (edges), ξεπερνώντας τις αδυναμίες του τελεστή Moravec.

Ο τελεστής Harris διαφέρει από τον Moravec βασικά στον τρόπο με τον οποίο μετρά την αυτοσυσχέτιση (δηλαδή το “μέτρο γωνιακότητας” του αλγορίθμου Moravec που αναφέρθηκε παραπάνω). Αυτός ο τρόπος επιτρέπει τη μέτρηση της διακύμανσης της μεταβολής της αυτοσυσχέτισης (μεταβολή έντασης) γύρω από όλες τις διαφορετικές διευθύνσεις και όχι μόνο κατά τις 8 διευθύνσεις όπως στον αλγόριθμο Moravec. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η χρήση μιας συνάρτησης που θα επιτρέψει τον υπολογισμό της αυτοσυσχέτισης σε όλες τις δυνατές διευθύνσεις περί το εξεταζόμενο σημείο (εικονοψηφίδα).

• Εξαγωγή αναλυτικής μορφής συνάρτησης υπολογισμού της χωρικής αυτοσυσχέτισης

Όπως είναι γνωστό, η ψηφιακή εικόνα αποτελείται από διακριτές εικονοψηφίδες που αποτελούν δειγματοληψία ενός συνεχούς χώρου τόνων. Σε αυτό το σύνολο εικονοψηφίδων μπορεί να υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ γειτονικών εικονοψηφίδων, δηλαδή να διαφοριστεί η εικόνα σε κάποια διεύθυνση. Αυτό γίνεται με τη μαθηματική διαδικασία της συνέλιξης.

Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα θεωρείται μια “μάσκα”, η οποία αποτελεί το πρώτο στοιχείο της πράξης της συνέλιξης. Η μάσκα είναι ένα τμήμα της εικόνας. Θεωρούνται ακόμα δύο μάσκες, μια κατά την x και μια κατά την y διεύθυνση. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι στο παρακάτω παράδειγμα επιδιώκεται να υπολογιστεί η μεταβολή της έντασης περί το στοιχείο A5.



Η κλίση της εικόνας κατά τη διεύθυνση x είναι:

$$\frac{\partial I_{A5}}{\partial x} \approx (I_{A6} - I_{A4}) = I_{A5} \otimes (-1, 0, 1)$$

Η κλίση της εικόνας κατά την y διεύθυνση είναι:

$$\frac{\partial I_{A5}}{\partial y} \approx (I_{A2} - I_{A8}) = I_{A5} \otimes (-1, 0, 1)^T$$

Είναι δυνατός επίσης ο υπολογισμός της κλίσης κατά τις δύο διαγώνιες διευθύνσεις

$$\frac{\partial I_{A5}}{\partial h} \approx (I_{A3} - I_{A7}) = I_{A5} \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

όπου το σύμβολο I δείχνει την ψηφιακή τιμή της αντίστοιχης εικονοψηφίδας. Οι κλίσεις αυτές είναι ασυνεχείς, αναφέρονται συνεπώς στην εικονοψηφίδα όπου υπολογίζονται. Δίνουν τις ίδιες τιμές με εκείνες που δίνει η εφαρμογή του αλγορίθμου Moravec. Το ζήτημα όμως της παρούσας αναζήτησης είναι η εύρεση μιας αναλυτικής σχέσης που θα δίνει την κλίση της εικόνας και όχι μόνο των μεμονωμένων εικονοψηφίδων.

Αν συνδεθεί η έννοια της μερικής παραγώγου ως προς την διεύθυνση με τη διαφορά των τόνων, τότε

$$B_i - A_i \approx \frac{\partial I_{A_i}}{\partial x}$$

Συνεπώς για την μεταβολή έντασης του τελεστή Moravec θα ισχύει για την διεύθυνση x (οριζόντια):

$$V_x = \sum_{i=1}^9 (A_i - B_i)^2 = \sum_{i=1}^9 (B_i - A_i)^2 \approx \sum_{i=1}^9 \left(\frac{\partial I_i}{\partial x}\right)^2, \text{ όπου } \frac{\partial I_i}{\partial x} = I_i \otimes (-1, 0, 1) \approx B_i - A_i$$

Για την διεύθυνση y (κατακόρυφη):

$$V_y = \sum_{i=1}^9 (A_i - B_i)^2 = \sum_{i=1}^9 (B_i - A_i)^2 \approx \sum_{i=1}^9 \left(\frac{\partial I_i}{\partial y}\right)^2, \text{ όπου } \frac{\partial I_i}{\partial y} = I_i \otimes (-1, 0, 1)^T \approx B_i - A_i$$

και για τη διαγώνια διεύθυνση:

$$V_h = \sum_{i=1}^9 (A_i - B_i)^2 = \sum_{i=1}^9 (B_i - A_i)^2 \approx \sum_{i=1}^9 \left(\frac{\partial I_i}{\partial h}\right)^2, \text{ όπου } \frac{\partial I_i}{\partial h} = I_i \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \approx B_i - A_i$$

Από την παραπάνω ανάλυση μπορεί να διαπιστωθεί ότι η μεταβολή έντασης μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$V_{u,v}(x,y) = \sum_{vi} \left(u \frac{\partial I_i}{\partial x} + v \frac{\partial I_i}{\partial y}\right)^2 \quad (\text{Εξ. 1})$$

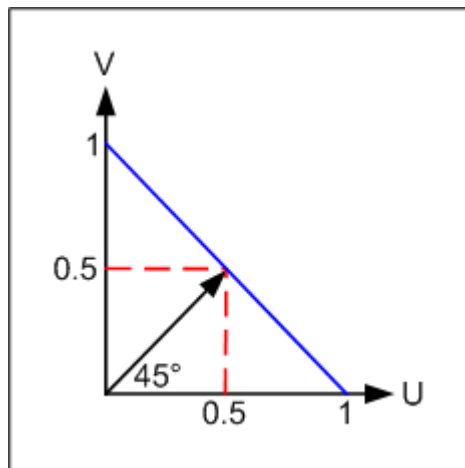
Από διερεύνηση της παραπάνω σχέσης για τις διάφορες τιμές των μεταβλητών u και v εξαγωγή τα εξής συμπεράσματα.

Θέτοντας $(u,v) = (1,0)$ έχει κανείς την προσεγγιστική τιμή της μεταβολής έντασης κατά Moravec στη διεύθυνση x.

Θέτοντας $(u,v) = (0,1)$ έχει κανείς την προσεγγιστική τιμή της μεταβολής έντασης κατά Moravec στη διεύθυνση y.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι η Εξ. (1) δεν είναι ισοδύναμη με την μεταβολή έντασης του αλγορίθμου Moravec, αλλά δίνει μια περίπου όμοια μέτρηση της μεταβολής έντασης σε μια εικονοψηφίδα. Έχει όμως το ζητούμενο πλεονέκτημα της παρούσας αναζήτησης. Επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολή έντασης σε οποιαδήποτε διεύθυνση περί μια εικονοψηφίδα, και όχι μόνο κατά τις 8 διευθύνσεις του αλγορίθμου Moravec.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι δυνατός ο υπολογισμός της αυτοσυσχέτισης σε όλες τις τυχαίες διευθύνσεις περί μια εικονοψηφίδα. Το ζήτημα που ανακύπτει είναι ποιες είναι οι τιμές των παραμέτρων u και v για μια τυχαία επιλεγείσα διεύθυνση. Το πρόβλημα φαίνεται στο επόμενο σκαρίφημα όπου ζητείται η κλίση σε διεύθυνση 45° από το ορθοκανονικό σύστημα.



Από το σχήμα είναι προφανές ότι οι τιμές είναι $(u,v) = (0.5,0.5)$. Στη γενική περίπτωση ισχύει

$$\frac{u}{v} = \tan \omega.$$

Για δεδομένη λοιπόν επιλεγείσα γωνία ω ζητούνται οι τιμές των u και v που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και ικανοποιούν τον παραπάνω λόγο.

Στην πραγματικότητα κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Harris δεν απαιτείται η εύρεση των μεταβολών έντασης σε καθορισμένες διευθύνσεις για τον προσδιορισμό της αυτοσυσχέτισης, καθώς είναι προφανές ότι οι διευθύνσεις αυτές είναι άπειρες. Παρακάτω θα αναλυθεί η διαδικασία προσδιορισμού της αυτοσυσχέτισης.

- Υπολογισμός της αυτοσυσχέτισης

Η μεταβολή έντασης μπορεί να απεικονιστεί με την παρακάτω σχέση

$$V_{u,v}(x,y) = \sum_{\forall i} w_i \left(u \frac{\partial I_i}{\partial x} + v \frac{\partial I_i}{\partial y} \right)^2$$

$$= \sum_{\forall i} w_i \left(u^2 \frac{\partial I_i^2}{\partial x} + 2uv \frac{\partial I_i}{\partial x} \frac{\partial I_i}{\partial y} + v^2 \frac{\partial I_i^2}{\partial y} \right) = Au^2 + 2Cuv + Bv^2$$

όπου $A = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 \otimes w$, $B = \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \otimes w$, $C = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \right) \otimes w$

και w είναι ο πίνακας της Γκαουσιανής εξομάλυνσης της εικόνας.

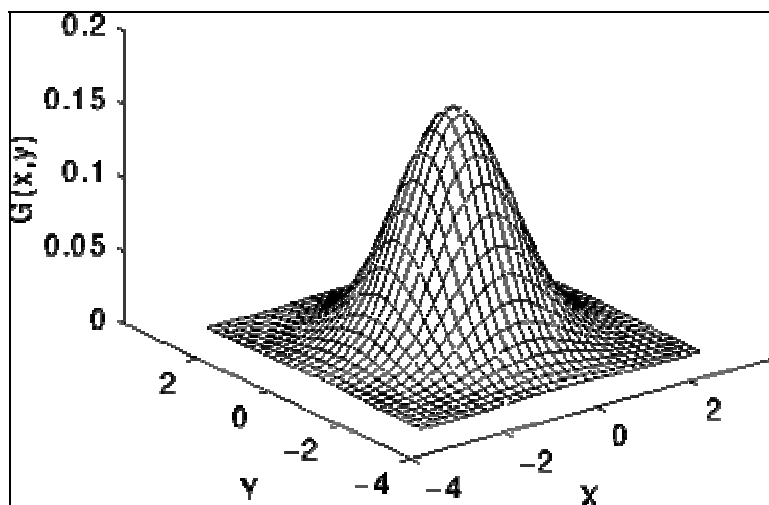
Για την πλήρη περιγραφή των παραπάνω σχέσεων κρίνεται σκόπιμη η αναλυτική αναφορά στη διαδικασία της εφαρμογής του φίλτρου Gauss σε μια εικόνα. Όπως είναι γνωστό, η κατανομή Gauss περιγράφεται από την παρακάτω αναλυτική σχέση που αποτελεί και τη συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας.

$$G(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \text{ όπου } \sigma \text{ είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος}$$

Η σχέση αυτή είναι η συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας για μια μονοδιάστατη μεταβλητή. Για μεταβλητές δύο διαστάσεων η αντίστοιχη σχέση είναι

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

Η μορφή της κατανομής φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 8. Δισδιάστατη κανονική κατανομή.

Η κατανομή αυτή έχει μέση τιμή κατά x και κατά y μηδέν $(0,0)$ και τυπική απόκλιση 1. Για τον ορισμό μιας τέτοιας κατανομής απαιτείται η τιμή της τυπικής απόκλισης σ . Με γνωστή την τιμή αυτή μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές της κατανομής σε κάθε επιθυμητή θέση (x,y) από τη σχέση

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

Επισημαίνεται ότι οι συντεταγμένες της θέσης (x,y) ορίζονται από το κέντρο του παραθύρου. Αναλυτικότερα, εάν επιλεγεί παράθυρο 5×5 το κελί $(3,3)$ θα έχει συντεταγμένες $(0,0)$ και βέβαια θα έχει τη μεγαλύτερη τιμή από τα άλλα κελιά του πίνακα. Δίνεται ένας τέτοιος πίνακας 5×5 .

$$\frac{1}{273} \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ \hline 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ \hline 7 & 16 & 41 & 16 & 7 \\ \hline 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ \hline 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Εκτός από την τυπική απόκλιση πρέπει να προσδιοριστεί και το μέγεθος του παραθύρου της κανονικής κατανομής. Στην αγγλοσαξωνική βιβλιογραφία αυτό αναφέρεται ως “kernel size”. Είναι σαφές ότι στον ορισμό του παραπάνω παραθύρου δεν εμπλέκεται η εικόνα. Η επιλογή όμως των διαστάσεων του παραθύρου έχει άμεση σχέση με αυτή. Θεωρητικά η πιθανότητα που δίνεται από την κανονική κατανομή δε μηδενίζεται σε κανένα σημείο, πράγμα που φαίνεται και από το ότι η καμπύλη της δισδιάστατης κανονικής κατανομής εφάπτεται ασυμπτωτικά στο επίπεδο xy . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για μια εικόνα δεδομένων διαστάσεων οι διαστάσεις του παραθύρου της Γκαουσιανής κατανομής θα έπρεπε να είναι οι ίδιες με τις διαστάσεις της εικόνας. Στην πραγματικότητα επιλέγεται ένα πολύ μικρότερο μέγεθος παραθύρου, δεδομένου ότι η κατανομή Gauss αφορά συνεχείς μεταβλητές ενώ η εικόνα είναι ασυνεχής, καθώς αποτελείται από διακεκριμένες εικονοψηφίδες.

Μετά τον ορισμό του Γκαουσιανού παραθύρου πραγματοποιείται η πράξη της συνέλιξης. Συνεπώς

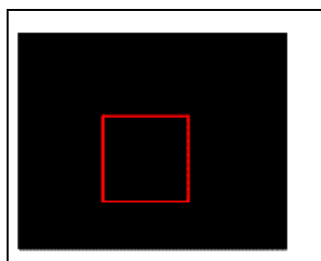
$$V_{u,v}(x,y) = Au^2 + 2Cuv + Bv^2 = [u \quad v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \text{ όπου } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας \mathbf{M} περιέχει όλη την πληροφορία σχετικά με το πρότυπο της περιοχής περί την εικονοψηφίδα (x,y) . Οι ιδιοτιμές του εκφράζουν τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της καμπυλότητας. Επιπλέον, ο \mathbf{M} είναι ανεξάρτητος από τις μεταβλητές u και v των δυνατών θέσεων υπολογισμού της αυτοσυσχέτισης, πράγμα που προσδίδει στον \mathbf{M} μια ανεξαρτησία από την επιλογή των παραμέτρων u και v . Σημειώνεται όμως ότι αυτή η ανεξαρτησία αφορά το γεγονός ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός της αυτοσυσχέτισης για κάθε θέση (u,v) με βάση τον γνωστό πίνακα \mathbf{M} . Ο πίνακας \mathbf{M} δεν είναι περιστροφικά ανεξάρτητος, καθώς τα στοιχεία του υπολογίζονται από τις κλίσεις της εικόνας κατά την οριζόντια (x) και κατακόρυφη (y) διεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι και οι ιδιοτιμές του λ_1 και λ_2 δεν είναι ανεξάρτητες από τις δύο αρχικές διευθύνσεις υπολογισμού των κλίσεων της εικόνας (οι αρχικές διευθύνσεις υπολογισμού των κλίσεων κατά x και y εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς των εικονοσυντεταγμένων). Αυτό σημαίνει ότι αν στη θέση των δύο προαναφερθεισών διευθύνσεων x και y τεθούν δύο άλλες κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, τότε τα στοιχεία του \mathbf{M} θα είναι διαφορετικά.

Αυτή είναι και η αιτία που, όπως θα εξηγηθεί και στο κεφάλαιο των μειονεκτημάτων του αλγορίθμου Harris, τον καθιστά περιστροφικά ασταθή.

Για να γίνει πλήρως κατανοητή η αρχή στην οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος, μπορεί να θεωρηθεί νοητά η θέση του παραθύρου υπολογισμού της αυτοσυσχέτισης σε σχέση με τη μορφή της εικόνας. Με μια αφαιρετική προσέγγιση της πραγματικότητας θεωρείται η περίπτωση ομοιογενούς μαύρης περιοχής σε λευκό υπόβαθρο εικόνας. Το παράθυρο υπολογισμού της αυτοσυσχέτισης μπορεί να έχει 4 δυνατές θέσεις. Για κάθε μια από τις δυνατές θέσεις ελέγχονται ποιοτικά οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{M} . Όπως αποδεικνύεται υπάρχει μια σαφής ποιοτικά ένδειξη από τη σύγκριση των δύο ιδιοτιμών του πίνακα \mathbf{M} .

1. Να βρίσκεται εντός της ομοιογενούς περιοχής της εικόνας. Όπως θα γίνει κατανοητό από τα επόμενα, αυτή η περίπτωση είναι ισοδύναμη με την τοποθέτηση του παραθύρου εξ ολοκλήρου εκτός της ομοιογενούς περιοχής.

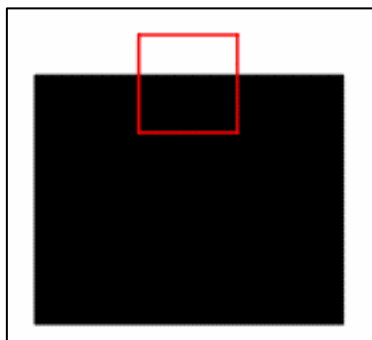


Στην περίπτωση αυτή οι κλίσεις της εικόνας κατά x και κατά y είναι μηδενικές. Αυτό σημαίνει $A = 0$, $B = 0$ και $C = 0$.

$$\text{Άρα } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Οι ιδιοτιμές ενός μηδενικού πίνακα είναι μηδενικές. Συνεπώς $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$. Στη γενική περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι όταν οι ιδιοτιμές είναι περίπου ίσες και σχεδόν μηδενικές, τότε το σημείο είναι εσωτερικό μιας ομοιογενούς περιοχής.

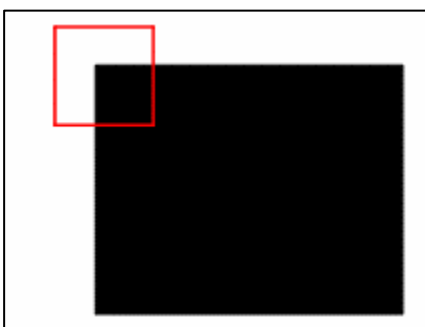
2. Να βρίσκεται κατά μήκος μιας ακμής της εικόνας.



Στην περίπτωση αυτή οι κλίσεις της εικόνας κατά μήκος της ακμής είναι μικρές, ενώ κάθετα στην ακμή μεγάλες. Αυτό σημαίνει ότι μια από τις δύο ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{M} θα είναι μεγάλη και η άλλη μικρή. Συνεπώς μπορεί να ειπωθεί ότι όταν ισχύει

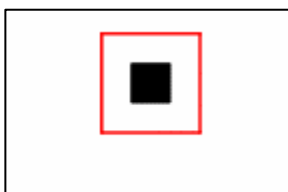
$\lambda_1 \gg \lambda_2$ ή $\lambda_2 \gg \lambda_1$, τότε το σημείο βρίσκεται κατά μήκος ακμής.

3. Να βρίσκεται σε ένα άκρο της εικόνας



Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη και η ελάχιστη ιδιοτιμή λ_1 και λ_2 θα έχουν μεγάλες τιμές, καθώς οι κλίσεις της εικόνας και κατά x και κατά y είναι σημαντικές. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί πως όταν και οι δύο ιδιοτιμές είναι μεγάλες, τότε το σημείο μπορεί να θεωρηθεί ως άκρο.

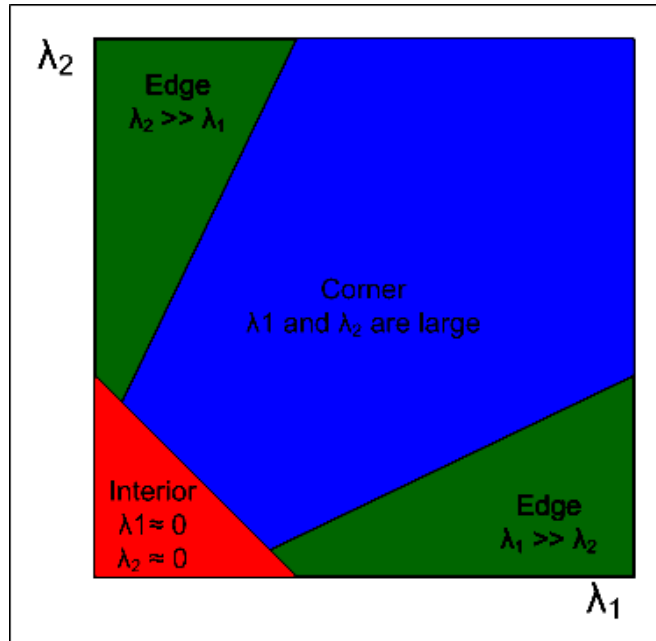
4. Να περιλαμβάνει μια μεμονωμένη εικονοψηφίδα (isolated pixel)



Η τελευταία αυτή περίπτωση είναι όμοια με την προηγούμενη όσον αφορά τις τιμές που λαμβάνουν οι ιδιοτιμές λ_1 και λ_2 του πίνακα \mathbf{M} . Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά. Η εικονοψηφίδα που θεωρείται ως άκρο δεν αποτελεί άκρο μιας οντότητας (πχ. ενός κτιρίου) αλλά αποτελεί μια μεμονωμένη εικονοψηφίδα η οποία δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη καθώς δεν είναι βέβαιο ότι αποτελεί υπαρκτή οντότητα του αντικειμένου. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι μεμονωμένες εικονοψηφίδες οφείλονται σε θόρυβο. Για παράδειγμα, ένα προβληματικό pixel μιας κάμερας CCD ή ενός σαρωτή δίδει ως αποτέλεσμα μια μεμονωμένη εικονοψηφίδα σε κάθε λήψη. Οι δύο μεμονωμένες εικονοψηφίδες δεν είναι ομόλογες και δεν υπάρχει λόγος αναζήτησης μη υπαρκτών ομολογιών. Το ζήτημα της απομάκρυνσης των μεμονωμένων εικονοψηφίδων θα αναλυθεί στην συνέχεια.

Για την παραστατική απεικόνιση των παραπάνω δίδεται το επόμενο διάγραμμα που παρουσιάζει τη διαμέριση του 2D χώρου που ορίζεται από τις ιδιοτιμές λ_1 και λ_2 στα παραπάνω τρία πρότυπα. Δηλαδή στο πρότυπο της ομοιογενούς περιοχής, το πρότυπο της ακμής και το πρότυπο του άκρου. Σημειώνεται ότι το πρότυπο της μεμονωμένης εικονοψηφίδας είναι το ίδιο με το πρότυπο του άκρου.

Είναι σαφές πλέον ότι το ζήτημα της ανίχνευσης άκρων ανάγεται στο ζήτημα των κριτηρίων διαχωρισμού του δισδιάστατου χώρου των ιδιοτιμών του πίνακα \mathbf{M} . Το ζήτημα αυτό είναι ένα κλασικό ζήτημα στη συντακτική αναγνώριση προτύπων. Αναφέρεται ως πρόβλημα ορισμού μιας συνάρτησης διαχωρισμού. Με τον ορισμό μιας τέτοιας συνάρτησης είναι φανερό ότι μπορεί να γίνει η ταξινόμηση των εικονοψηφίδων της εικόνας στις τρεις κατηγορίες που ορίζονται από τα ανωτέρω πρότυπα. Συνεπώς μπορούν να ανιχνευτούν τα άκρα της εικόνας.



Εικόνα 9. Διαγραμματική απεικόνιση του 2D χώρου των ιδιοτιμών του \mathbf{M} .

Η διαδικασία της κατασκευής της συνάρτησης διαχωρισμού είναι η κρίσιμότερη διαδικασία για την περάτωση του αλγορίθμου. Οι Harris and Stephens (1988) προτείνουν την ακόλουθη συνάρτηση διαχωρισμού:

$$C(x,y) = \det(\mathbf{M}) - k \times (\text{trace}(\mathbf{M}))^2$$

$$\text{όπου } \det(\mathbf{M}) = \lambda_1 \lambda_2 = AB - C^2$$

$$\text{trace}(\mathbf{M}) = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{και } k: \text{ σταθερά}$$

Είναι προφανές ότι διαφορετική τιμή της σταθεράς k δίνει διαφορετικά όρια διαχωρισμού μεταξύ των προτύπων. Οι βέλτιστες τιμές της σταθεράς k προσδιορίστηκαν εμπειρικά και είναι μεταξύ των τιμών 0.04 και 0.06.

Όταν οι άκρες και τα εσωτερικά σημεία έχουν θετική την ποσότητα του μέτρου γωνιακότητας (C), οι ακμές έχουν αρνητικό μέτρο γωνιακότητας. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μια τιμή κατωφλίσωσης για τον διαχωρισμό των άκρων από τα εσωτερικά σημεία. Συνήθως, τα εσωτερικά σημεία παρουσιάζουν χαμηλές τιμές του μέτρου γωνιακότητας. Ο γενικός κανόνας κατά την εφαρμογή είναι λοιπόν ότι η τιμή κατωφλίσωσης πρέπει να είναι αρκούντως υψηλή ώστε να αποφεύγεται η ανίχνευση άκρων που οφείλονται σε θόρυβο. Έτσι, η επιλογή υψηλής τιμής κατωφλίσωσης είναι ένας τρόπος να αποφεύγεται η ανίχνευση μεμονωμένων εικονοψηφίδων (isolated pixels).

Η διαδικασία εφαρμογής του αλγορίθμου Harris/Plessey είναι η εξής:

1. Για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζεται ο πίνακας αυτοσυσχέτισης \mathbf{M} .
2. Δημιουργείται ο χάρτης γωνιών με υπολογισμό του μέτρου γωνιακότητας (C).
3. Εφαρμόζεται στο χάρτη γωνιών η επιλεγείσα τιμή κατωφλίσωσης. Οι εικονοψηφίδες με τιμή που δεν υπερβαίνει την τιμή κατωφλίσωσης αποκτούν μηδενική τιμή μέτρου γωνιακότητας.
4. Εφαρμόζεται ο αλγόριθμος “αφαίρεσης των μη μεγίστων” (non maximal suppression) για την εύρεση των τοπικών μεγίστων, τα οποία αποτελούν και τις εικονοψηφίδες που χαρακτηρίζονται ως άκρα.

Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος των Harris/Plessey. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η υλοποίηση αλγορίθμου από τον

Peter Kovési. Στην υλοποίηση αυτή ο συντάκτης της χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό μέτρο γωνιακότητας και όχι εκείνο που προτείνεται στη βιβλιογραφία. Ως μέτρο χρησιμοποιεί την ποσότητα

$$C_{KOVESI}(x,y) = \frac{AB - C^2}{A + B}$$

$$\text{όπου } A = \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 \otimes w, B = \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \otimes w, C = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right) \otimes w$$

Όπως αναφέρει ο Kovési, αυτός ο τρόπος μέτρησης προτάθηκε από την Alison Noble το 1989 στη διδακτορική της διατριβή *Descriptions of Image Surfaces* (Dept. of Engineering Science, Oxford University).

- *Μειονεκτήματα του αλγορίθμου Harris/Plessey*

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του αλγορίθμου, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

- 1) Ευαισθησία στο θόρυβο

Ο αλγόριθμος Harris είναι ευαίσθητος στο θόρυβο εξαιτίας της χρήσης των κλίσεων. Είναι εύκολο να κατανοηθεί ότι μια εικονοψηφίδα οφειλόμενη σε θόρυβο έχει μεγάλες κλίσεις προς όλες τις διευθύνσεις. Το μειονέκτημα αυτό του αλγορίθμου είναι διαχειρίσιμο με τη χρήση του Γκαουσιανού παραθύρου. Μεγαλύτερο παράθυρο σημαίνει και ελάττωση του θορύβου. Επίσης η αύξηση της τυπικής απόκλισης υπολογισμού του Γκαουσιανού παραθύρου μπορεί να μειώσει το θόρυβο.

- 2) Περιστροφική ανισοτροπία

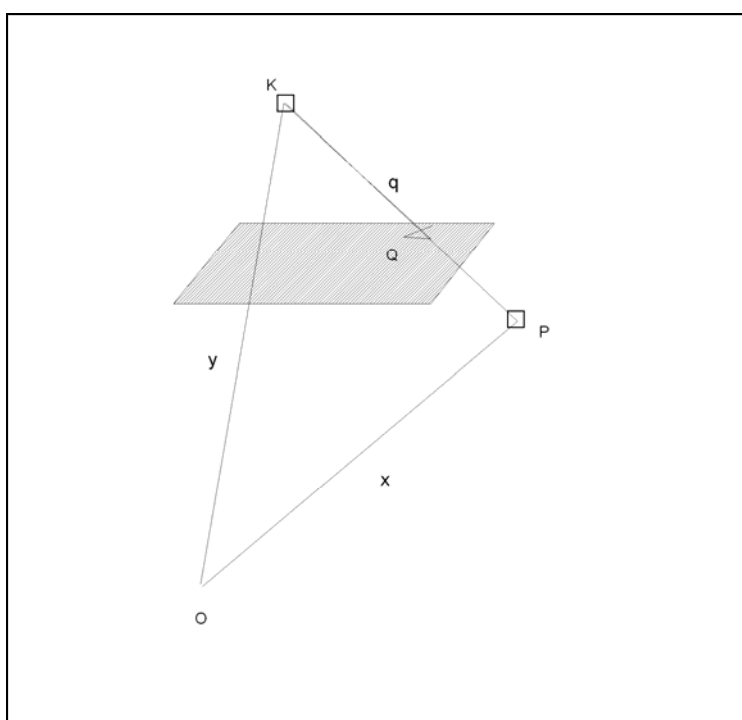
Ο αλγόριθμος Harris/Plessey είναι περιστροφικά ασταθής. Δεν πρέπει να γίνεται παρερμηνεία του γεγονότος ότι ο πίνακας αυτοσυσχέτισης \mathbf{M} μετά τον αρχικό υπολογισμό του μπορεί να δώσει την κλίση της εικόνας σε οποιαδήποτε διεύθυνση με την ιδιότητα της περιστροφικής ισοτροπίας. Αναλυτικότερα, ο πίνακας \mathbf{M} υπολογίζεται από τις κλίσεις της εικόνας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνσή της. Περιστρέφοντας την εικόνα αλλάζουν οι κλίσεις κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις. Συνεπώς αλλάζουν και τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{M} .

Κεφάλαιο 3 – Οι προσανατολισμοί της εικόνας

3.1 Η εξίσωση συγγραμμικότητας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν συνοπτικά οι προσανατολισμοί μιας μεμονωμένης εικόνας και ενός στερεοζεύγους (Δερμάνης, 1991). Ως γνωστόν, για την εξαγωγή των συντεταγμένων αντικειμένου απαιτείται η γνώση του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής και του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας. Για την θεωρητική τεκμηρίωση των προσανατολισμών θα γίνει αναφορά στη γεωμετρία της λήψης. Η γεωμετρία που σχηματίζεται τη στιγμή της λήψης απεικονίζεται στην Εικ. 10.

Ορίζεται συμβατικά ως O η αρχή του συστήματος συντεταγμένων του χώρου. Το σημείο K είναι το προβολικό κέντρο της λήψης. Το σημείο P είναι τυχαίο σημείο του αντικειμένου.



Εικόνα 10. Η γεωμετρία της εξίσωσης συγγραμμικότητας.

Στο παραπάνω σχήμα ορίζονται τα εξής διανύσματα.

$\vec{x} = \vec{OP}$ που είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου του αντικειμένου

$\vec{y} = \vec{OK}$ που είναι το διάνυσμα θέσης του προβολικού κέντρου

$\vec{p} = \vec{KP}$ είναι το διάνυσμα που συνδέει το προβολικό κέντρο με το σημείο του αντικειμένου.

$\vec{q} = \vec{KQ}$ είναι το διάνυσμα που συνδέει το προβολικό κέντρο με την προβολή του σημείου του αντικειμένου στην εικόνα

Μεταξύ των διανυσμάτων \vec{x} , \vec{y} και \vec{p} είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι ισχύει η σχέση

$$\vec{x} = \vec{y} + \vec{p} \quad (\text{Εξ. 1})$$

Τα σημεία K, Q και P είναι συγγραμμικά. Συνεπώς μεταξύ των διανυσμάτων \vec{p} και \vec{q} ισχύει η σχέση

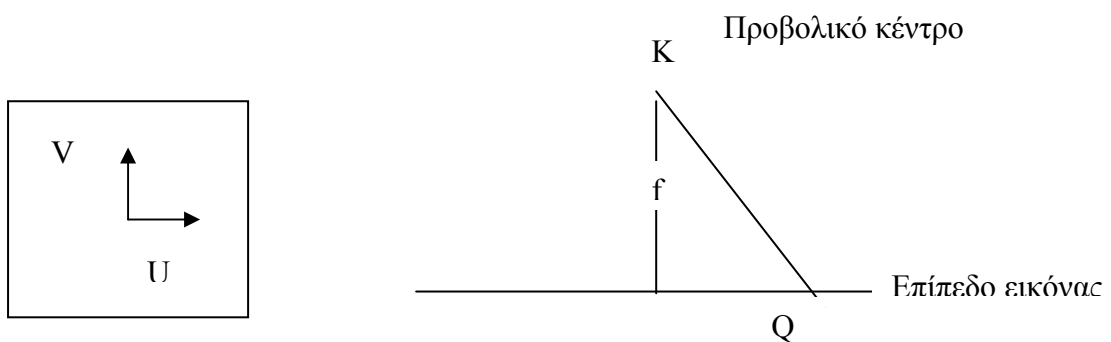
$\vec{p} = \lambda \vec{q}$ (Εξ. 2), όπου λ φυσικός αριθμός. Η Εξ. (1) λόγω της (2) γράφεται ως

$$\vec{x} = \vec{y} + \lambda \vec{q} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Τα διανύσματα \vec{x} και \vec{y} έχουν τις εξής συντεταγμένες στο τρισσορθόγωνιο σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου.

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \vec{y} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα $\vec{p} = \vec{KP}$ είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου P του αντικειμένου στο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας.



Το διάνυσμα $\vec{q} = \vec{KQ}$ είναι το διάνυσμα θέσης της προβολής του σημείου P στην εικόνα στο σύστημα συντεταγμένων της εικόνας. Το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας (U, V, W) ορίζεται ως εξής. Ως αρχή έχει το πρωτεύον σημείο που ορίζεται από την προβολή του προβολικού κέντρου στο επίπεδο της εικόνας. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για την εύρεση της αρχής απαιτείται μόνο η γνώση των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής (x_o, y_o, f). Η τρίτη διάσταση του συστήματος της εικόνας ορίζεται από την εστιακή απόσταση του φακού (συμβατικά χρησιμοποιείται εδώ η εστιακή απόσταση f αντί της σταθεράς c της μηχανής). Συνεπώς το σημείο P του αντικειμένου έχει συντεταγμένες στο σύστημα της εικόνας

$$P = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}$$

Αντίστοιχα, το σημείο Q έχει συντεταγμένες στο ίδιο σύστημα $q = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$. Είναι σαφές

όμως ότι επειδή το σημείο Q βρίσκεται στο επίπεδο της εικόνας μπορεί να πάρει συγκεκριμένες τιμές με βάση τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της εικόνας. Κατά τη διεύθυνση U έχει $x-x_0$, κατά τη διεύθυνση V $y-y_0$ και κατά τη διεύθυνση W $-f$, όπως όλα τα σημεία που ανήκουν στο επίπεδο της εικόνας. Αναλυτικότερα

$$q = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 4})$$

Από τη Εξ. (1) είναι γνωστό ότι $\vec{x} = \vec{y} + \vec{p} \Rightarrow \vec{p} = \vec{x} - \vec{y}$. Αυτή η σχέση ορίστηκε με βάση το σύστημα αναφοράς του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα για να ισχύει αυτή η σχέση θα πρέπει οι συντεταγμένες του διανύσματος \vec{p} να είναι εκφρασμένες στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου. Όπως προαναφέρθηκε όμως, οι συντεταγμένες του αναφέρονται στο σύστημα της εικόνας. Κατά συνέπεια απαιτείται η γνώση ενός μετασχηματισμού συντεταγμένων για τη μετάβαση από το σύστημα της εικόνας στο σύστημα του αντικειμένου.

Ένα 3D σύστημα συντεταγμένων έχει 6 βαθμούς ελευθερίας ως προς ένα άλλο 3D σύστημα αναφοράς. Οι βαθμοί αυτοί ελευθερίας αντιστοιχούν σε 3 στροφές και 3 μεταθέσεις. Τα στοιχεία αυτά είναι τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$). Τα παραπάνω στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού είναι οι στροφές και οι μεταθέσεις του συστήματος αναφοράς του αντικειμένου, στο οποίο σύστημα αναφέρονται τα διανύσματα θέσης του προβολικού κέντρου \vec{y} και το διάνυσμα θέσης του σημείου του αντικειμένου \vec{x} . Συνεπώς ισχύει

$$\vec{p} = \mathbf{R}(\kappa) \mathbf{R}(\varphi) \mathbf{R}(\omega) (\vec{x} - \vec{y}) \quad (\text{Εξ. 5})$$

όπου οι πίνακες $\mathbf{R}(\kappa)$, $\mathbf{R}(\varphi)$, $\mathbf{R}(\omega)$ είναι οι πίνακες στροφής 3×3 .

Η Εξ. (2) της συνθήκης συγγραμμικότητας $\vec{p} = \lambda \vec{q}$ παίρνει την παρακάτω μορφή

$$\vec{p} = \mathbf{R}(\kappa) \mathbf{R}(\varphi) \mathbf{R}(\omega) (\vec{x} - \vec{y}) = \lambda \vec{q} \Rightarrow$$

$$\lambda \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (\text{Εξ. 6})$$

όπου U, V, W είναι οι συντεταγμένες του σημείου P του αντικειμένου στο σύστημα της εικόνας. Η παραπάνω σχέση λαμβάνει την εξής αναλυτική μορφή.

$$\lambda (x - x_0) = U = r_{11} (X - X_0) + r_{12} (Y - Y_0) + r_{13} (Z - Z_0) \quad (7.1)$$

$$\lambda (y - y_0) = V = r_{21} (X - X_0) + r_{22} (Y - Y_0) + r_{23} (Z - Z_0) \quad (7.2)$$

$$\lambda (-f) = W = r_{31} (X - X_0) + r_{32} (Y - Y_0) + r_{33} (Z - Z_0) \quad (7.3)$$

Στις σχέσεις αυτές υπάρχει μια παράμετρος (λ) που αναφέρεται στην κλίμακα της εικόνας στο σημείο Q. Η παράμετρος αυτή είναι σταθερή για δεδομένο σημείο, αλλά διαφέρει για κάθε σημείο του εδάφους (σημειακή κλίμακα). Η παράμετρος αυτή μπο-

ρεί να απαλειφεί από το σύστημα των εξισώσεων συγγραμμικότητας. Με διαίρεση των Εξ. 7.1 και 7.2 με την 7.3 προκύπτει

$$\frac{U}{W} = \frac{x - x_0}{-f} \Rightarrow x = x_0 - f \frac{U}{W} \Rightarrow$$

$$x = x_0 - f \frac{r11(X - X_0) + r12(Y - Y_0) + r13(Z - Z_0)}{r31(X - X_0) + r32(Y - Y_0) + r33(Z - Z_0)} \quad (\text{Εξ. 8.1})$$

$$\frac{V}{W} = \frac{y - y_0}{-f} \Rightarrow y = y_0 - f \frac{V}{W} \Rightarrow$$

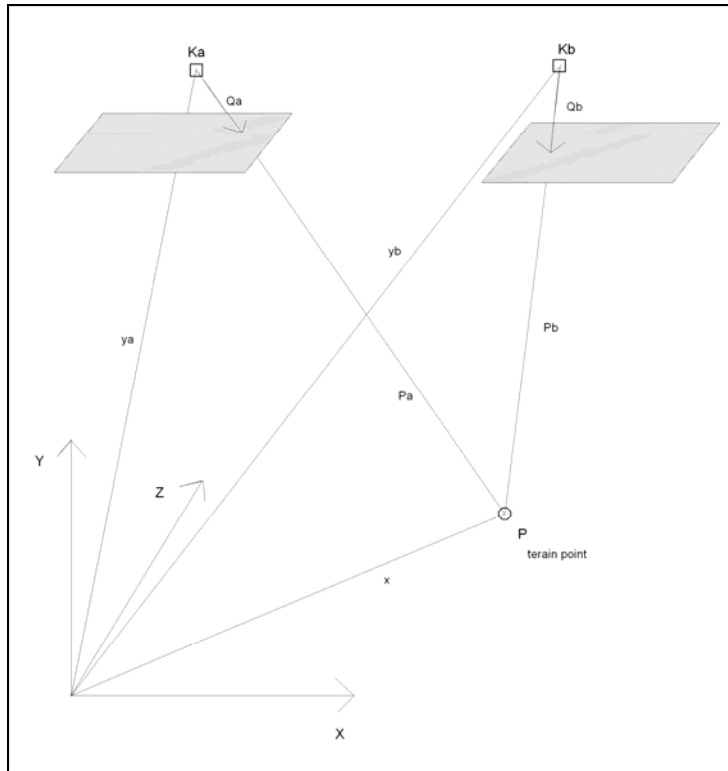
$$y = y_0 - f \frac{r21(X - X_0) + r22(Y - Y_0) + r23(Z - Z_0)}{r31(X - X_0) + r32(Y - Y_0) + r33(Z - Z_0)} \quad (\text{Εξ. 8.2})$$

Οι Εξ. 8.1 και 8.2 αποτελούν τις εξισώσεις συγγραμμικότητας σημείου του αντικειμένου, και αποτελούν τις εξισώσεις παρατήρησης στις διαδικασίες της εμπροσθοτομίας, της οπισθοτομίας, του φωτοτριγωνισμού και της βαθμονόμησης της μηχανής, αλλά και σε διαδικασίες σχετικού προσανατολισμού με την μέθοδο της δέσμης. Στην παρούσα εργασία θα φανεί και η χρησιμότητα των εξισώσεων συγγραμμικότητας κατά την πύκνωση του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, όπου απαιτείται η χρήση τους για να βρεθούν οι εικονοσυντεταγμένες σημείου του εδάφους με γνωστές συντεταγμένες (διαδικασία αντίστροφης φωτογραμμετρίας).

3.2 Η εξίσωση συνεπιπεδότητας

Εδώ γίνεται μια αναφορά στη συνθήκη συνεπιπεδότητας. Σύμφωνα με αυτή, για κάθε στερεοζεύγος υπάρχει ένα επίπεδο (επιπολικό επίπεδο) στο οποίο κατά τη στιγμή της λήψης ανήκουν τα δύο προβολικά κέντρα (Κα και Κβ) και το σημείο του αντικειμένου (εδάφους). Δηλαδή η βάση του στερεοζεύγους ΚαΚβ, και τα διανύσματα Ρα και Ρβ είναι συνεπίεδα. Πριν από την απόδειξη της συνθήκης συνεπιπεδότητας κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στη σημασία της γεωμετρίας αυτής για τις εφαρμογές της φωτογραμμετρίας, αφού, μεταξύ άλλων, σε αυτή τη γεωμετρία στηρίζεται η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού ενός ζεύγους. Δηλαδή η εύρεση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της δεξιάς εικόνας (αν πρόκειται για εξαρτημένο σχετικό προσανατολισμό) ως προς το σύστημα της αριστερής, με τα οποία στοιχεία μηδενίζεται η κατά y παράλλαξη των ομολόγων σημείων των δύο εικόνων.

Στη συνθήκη συνεπιπεδότητας, όμως, στηρίζεται και η επιπολική επανασύσταση του στερεοζεύγους, διαδικασία που υιοθετούν όλα τα ψηφιακά φωτογραμμετρικά συστήματα, καθώς μέσω αυτής γίνεται δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση και απόδοση από τους χρήστες. Παράλληλα όμως, όπως θα φανεί στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, η επιπολική γεωμετρία και η επιπολική επανασύσταση είναι ιδιαίτερος χρήσιμες και στους φωτογραμμετρικούς αυτοματισμούς.



Εικόνα 11. Γεωμετρία της εξίσωσης συνεπιπεδότητας.

Η απόδειξη της συνθήκης συνεπιπεδότητας στηρίζεται στις εξισώσεις συγγραμμικότητας. Ας θεωρηθεί τυχαίο σημείο του αντικειμένου, έστω P. Για το σημείο αυτό και για κάθε μια από τις εικόνες του στερεοζεύγους ισχύει η συνθήκη συγγραμμικότητας. Σύμφωνα με αυτή, για την αριστερή εικόνα ισχύει.

$$\vec{p}_a = \vec{x} - \vec{y}_a = \lambda_a \vec{q}_a$$

Όμοια, για τη δεξιά εικόνα ισχύει

$$\vec{p}_\beta = \vec{x} - \vec{y}_\beta = \lambda_\beta \vec{q}_\beta$$

Όπως προαναφέρθηκε, \vec{q}_a και \vec{q}_β είναι τα διανύσματα που συνδέουν τα προβολικά κέντρα της αριστερής και της δεξιάς εικόνας, αντίστοιχα, με τις απεικονίσεις του σημείου P σε κάθε εικόνα. Επίσης, τα διανύσματα \vec{p}_a και \vec{p}_β είναι τα διανύσματα που συνδέουν τα προβολικά κέντρα των δύο εικόνων με το σημείο P του αντικειμένου και τα διανύσματα \vec{y}_a και \vec{y}_β είναι τα διανύσματα θέσης των προβολικών κέντρων στο σύστημα του αντικειμένου. Οι συντελεστές κλίμακας λ_a , λ_β διαφέρουν μεταξύ τους. Οι παραπάνω συνθήκες συγγραμμικότητας γράφονται στο σύστημα της αριστερής και της δεξιάς εικόνας, αντίστοιχα:

$$\lambda_a \vec{q}_a = R_a(\kappa) R_a(\varphi) R_a(\omega) (\vec{x} - \vec{y}_a)$$

$$\lambda_\beta \vec{q}_\beta = R_\beta(\kappa) R_\beta(\varphi) R_\beta(\omega) (\vec{x} - \vec{y}_\beta)$$

Οι διανυσματικές αυτές σχέσεις γράφονται αναλυτικά ως εξής:

$$\lambda_a \begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ V_a \\ W_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^a & r_{12}^a & r_{13}^a \\ r_{21}^a & r_{22}^a & r_{23}^a \\ r_{31}^a & r_{32}^a & r_{33}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_a \\ Y - Y_a \\ Z - Z_a \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

και για τη δεξιά εικόνα όμοια ισχύει

$$\lambda_\beta \begin{bmatrix} x_\beta - x_0 \\ y_\beta - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\beta \\ V_\beta \\ W_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^\beta & r_{12}^\beta & r_{13}^\beta \\ r_{21}^\beta & r_{22}^\beta & r_{23}^\beta \\ r_{31}^\beta & r_{32}^\beta & r_{33}^\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_\beta \\ Y - Y_\beta \\ Z - Z_\beta \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

Στις Εξ. 9.1 και 9.2 υπαισέρχονται 4 παρατηρούμενα μεγέθη, οι εικονοσυντεταγμένες x_a, y_a και x_β, y_β του σημείου στις δύο εικόνες. Ο αριθμός των αγνώστων είναι 17 και είναι οι εξής: τα 12 στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των δύο εικόνων ($X_a, Y_a, Z_a, \omega_a, \varphi_a, \kappa_a, X_\beta, Y_\beta, Z_\beta, \omega_\beta, \varphi_\beta, \kappa_\beta$), οι 2 συντελεστές κλίμακας μοντέλου-αντικειμένου και οι 3 συντεταγμένες του σημείου. Προφανώς δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συντεταγμένων αντικειμένου και η εύρεση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων απλώς από τις δύο εξισώσεις συγγραμμικότητας ενός στερεοζεύγους.

Προκύπτει συνεπώς το ζήτημα του αλγεβρικού μετασχηματισμού των δύο παραπάνω σχέσεων ώστε να προκύψει μια αναλυτική σχέση που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εξίσωση συνθήκης. Στην επιθυμητή αυτή σχέση θα πρέπει να υπαισέρχονται ποσότητες που είναι δυνατό να μετρηθούν ή που ζητείται ο προσδιορισμός τους. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να αφαιρεθούν παράμετροι από τις Εξ. (9.1) και (9.2). Οι παράμετροι που αφορούν το τυχαίο σημείο του αντικειμένου (X, Y, Z) μπορούν να απαλειφθούν με αφαίρεση της Εξ. (9.2) από την (9.1).

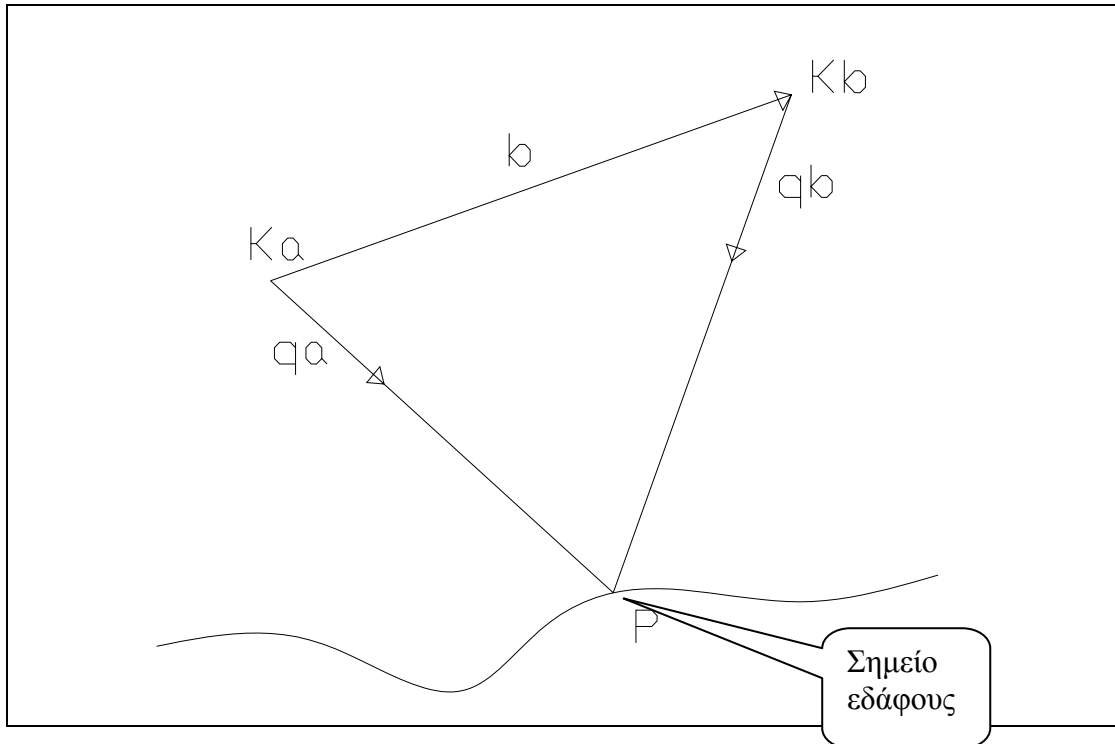
Έτσι, και με διατήρηση του προηγούμενου συμβολισμού, προκύπτει η διανυσματική μορφή

$$\lambda_a \vec{q}_a - \lambda_\beta \vec{q}_\beta = (\vec{x} - \vec{y}_a) - (\vec{x} - \vec{y}_\beta) = \vec{y}_\beta - \vec{y}_a \equiv \vec{b}$$

όπου \vec{b} είναι η βάση του στερεομοντέλου. Στην παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται το σύστημα αναφοράς του αντικειμένου. Συνεπώς η βάση του στερεομοντέλου, που είναι το διάνυσμα που συνδέει τα δύο προβολικά κέντρα των εικόνων, γράφεται στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου ως εξής:

$$\vec{b} = \lambda_a \vec{q}_a - \lambda_\beta \vec{q}_\beta \quad (\text{Εξ. 10})$$

Για την απόδειξη της συνθήκης συγγραμμικότητας είναι απαραίτητος ο εξής γεωμετρικός ισχυρισμός. Οι φορείς των διανυσμάτων \vec{p}_a και \vec{p}_β τέμνονται σε σημείο του χώρου, το σημείο P, με βάση τη συνθήκη συγγραμμικότητας. Ορίζουν συνεπώς ένα επίπεδο. Τα διανύσματα \vec{q}_a και \vec{q}_β ανήκουν στους φορείς των διανυσμάτων \vec{p}_a και \vec{p}_β , αντίστοιχα, ανήκουν συνεπώς και αυτά στο ίδιο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό καλείται επιπολικό επίπεδο.



Τα διανύσματα $\vec{q}_\alpha, \vec{q}_\beta$ είναι συνεπίεδα. Το εξωτερικό τους γινόμενο $\vec{d} = \vec{q}_\alpha \times \vec{q}_\beta$ είναι διάνυσμα κάθετο στο επίπεδό τους. Το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος της βάσης του στερεοζεύγους με το διάνυσμα του εξωτερικού γινομένου είναι ίσο με μηδέν:

$$\vec{b} \cdot (\vec{q}_\alpha \times \vec{q}_\beta) = 0 \text{ (Εξ. 11)}$$

Καθώς, όπως είναι γνωστό από την άλγεβρα, το εσωτερικό γινόμενο δύο κάθετων διανυσμάτων του χώρου είναι ίσο με μηδέν. Η Εξ. 11 αποτελεί τη διανυσματική μορφή της συνθήκης συνεπιπεδότητας.

Για να γραφεί η συνθήκη συνεπιπεδότητας σε αναλυτική μορφή είναι απαραίτητος ο ορισμός κοινού συστήματος αναφοράς. Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι το σύστημα αναφοράς του αντικειμένου ή ένα από τα δύο συστήματα αναφοράς των εικόνων. Συνεπώς η συνθήκη συνεπιπεδότητας μπορεί να γραφεί σε 3 αναλυτικές μορφές. Μια στο σύστημα του αντικειμένου, μια στο σύστημα της αριστερής και μια στο σύστημα της δεξιάς εικόνας. Στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου η μορφή της εξίσωσης είναι

$$\begin{aligned} & (X_\beta - X_\alpha)[(-r_{13}^\alpha x_\alpha - r_{23}^\alpha y_\alpha + f r_{33}^\alpha)(r_{12}^\beta x_\beta + r_{22}^\beta y_\beta - f r_{32}^\beta) + (r_{12}^\alpha x_\alpha + r_{22}^\alpha y_\alpha - f r_{32}^\alpha) \\ & (r_{13}^\beta x_\beta + r_{23}^\beta y_\beta - f r_{33}^\beta)] + (Y_\beta - Y_\alpha)[(r_{13}^\alpha x_\alpha + r_{23}^\alpha y_\alpha - f r_{33}^\alpha)(r_{11}^\beta x_\beta + r_{21}^\beta y_\beta - f r_{31}^\beta) + \\ & (-r_{11}^\alpha x_\alpha - r_{21}^\alpha y_\alpha - f r_{31}^\alpha)(r_{13}^\beta x_\beta + r_{23}^\beta y_\beta - f r_{33}^\beta)] + (Z_\beta - Z_\alpha)[(-r_{12}^\alpha x_\alpha - r_{22}^\alpha y_\alpha + f r_{32}^\alpha) \\ & (r_{11}^\beta x_\beta + r_{21}^\beta y_\beta - f r_{31}^\beta) + (r_{11}^\alpha x_\alpha + r_{21}^\alpha y_\alpha - f r_{31}^\alpha)(r_{12}^\beta x_\beta + r_{22}^\beta y_\beta - f r_{32}^\beta)] = 0 \end{aligned} \text{ (Εξ. 12)}$$

Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι στην παραπάνω αναλυτική μορφή της εξίσωσης συνεπιπεδότητας υπεισέρχονται μόνο τα στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών των δύο εικόνων και οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων του αντικειμένου. Δεν υ-

πεισέρχονται οι συντεταγμένες αντικειμένου του σημείου. Αυτό σημαίνει ότι για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού δεν απαιτούνται σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων.

Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι τα γραμμικά στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών $(X_\beta, X_\alpha, Y_\beta, Y_\alpha, Z_\beta, Z_\alpha)$ των δύο εικόνων εμφανίζονται ανά ζεύγη που είναι οι συνιστώσες της βάσης του στερεοζεύγους στο σύστημα του αντικειμένου.

Ισχύει: $X_\beta - X_\alpha = b_x$

$$Y_\beta - Y_\alpha = b_y$$

$$Z_\beta - Z_\alpha = b_z$$

και η Εξ. 12 μετασχηματίζεται στην

$$\begin{aligned} b_x [(-r_{13}^\alpha x_\alpha - r_{23}^\alpha y_\alpha + f r_{33}^\alpha)(r_{12}^\beta x_\beta + r_{22}^\beta y_\beta - f r_{32}^\beta) + (r_{12}^\alpha x_\alpha + r_{22}^\alpha y_\alpha - f r_{32}^\alpha) \\ (r_{13}^\beta x_\beta + r_{23}^\beta y_\beta - f r_{33}^\beta)] + b_y [(r_{13}^\alpha x_\alpha + r_{23}^\alpha y_\alpha - f r_{33}^\alpha)(r_{11}^\beta x_\beta + r_{21}^\beta y_\beta - f r_{31}^\beta) + \\ (-r_{11}^\alpha x_\alpha - r_{21}^\alpha y_\alpha - f r_{31}^\alpha)(r_{13}^\beta x_\beta + r_{23}^\beta y_\beta - f r_{33}^\beta)] + b_z [(-r_{12}^\alpha x_\alpha - r_{22}^\alpha y_\alpha + f r_{32}^\alpha) \\ (r_{11}^\beta x_\beta + r_{21}^\beta y_\beta - f r_{31}^\beta) + (r_{11}^\alpha x_\alpha + r_{21}^\alpha y_\alpha - f r_{31}^\alpha)(r_{12}^\beta x_\beta + r_{22}^\beta y_\beta - f r_{32}^\beta)] = 0 \end{aligned}$$

(Εξ. 12α)

Όπως προαναφέρθηκε η Εξ. (12) είναι η αναλυτική μορφή της εξίσωσης συνεπιπεδότητας στο σύστημα αναφοράς του αντικειμένου. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε εξαρτημένος σχετικός προσανατολισμός στο σύστημα της αριστερής εικόνας, που είναι και η συνήθης πρακτική για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού ενός στερεοζεύγους, όπου ως εξίσωση συνθήκης χρησιμοποιείται η αναλυτική μορφή στο σύστημα της αριστερής εικόνας. Η εξίσωση αυτή μετά από πράξεις καταλήγει στην.

$$\begin{aligned} c(x_\beta r_{12} + y_\beta r_{22} - c r_{32}) + y_\alpha (x_\beta r_{13} + y_\beta r_{23} - c r_{33}) - b_y [x_\alpha (x_\beta r_{13} + y_\beta r_{23} - c r_{33}) + \\ c(x_\beta r_{11} + y_\beta r_{21} - c r_{31})] + b_z [x_\alpha (x_\beta r_{12} + y_\beta r_{22} - c r_{32}) - y_\alpha (x_\beta r_{11} + y_\beta r_{21} - c r_{31})] = 0 \end{aligned}$$

(Εξ. 13)

Στην επόμενη ενότητα, η οποία αναφέρεται στην πραγματοποίηση του σχετικού προσανατολισμού, θα φανεί η χρησιμότητα της παραπάνω σχέσης.

3.3 Σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους

Όπως αναφέρθηκε, σκοπός του εξαρτημένου σχετικού προσανατολισμού είναι η εύρεση του προσανατολισμού της δεξιάς εικόνας στο σύστημα της αριστερής. Το μαθηματικό μοντέλο για την εύρεση των στοιχείων αυτών είναι η εξίσωση συνεπιπεδότητας στο σύστημα της αριστερής εικόνας (Εξ. 13). Ο παραμετρικός βαθμός αυτού του μοντέλου είναι ίσος με 5. Η εξίσωση αυτή αποτελεί την εξίσωση συνθήκης του προβλήματος. Η εξίσωση αυτή περιέχει δύο γραμμικά στοιχεία του προσανατολισμού της δεξιάς εικόνας στο σύστημα της αριστερής (b_y, b_z) αλλά όχι την τετμημένη b_x . Συνεπώς η εξίσωση δεν μπορεί φυσικά να δώσει την παράμετρο της κλίμακας του στερεομοντέλου (η οποία δεν αποτελεί παράμετρο του μαθηματικού μοντέλου).

Παρατηρούμενα μεγέθη για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού είναι οι εικονοσυντεταγμένες ομόλογων σημείων στις δύο εικόνες ($x_\alpha, y_\alpha, x_\beta, y_\beta$). Κάθε ο-

μολογία σημείων προσθέτει μια εξίσωση συνεπιπεδότητας στο τελικό προς επίλυση σύστημα εξισώσεων. Για να υπάρξει λύση θα πρέπει να σχηματιστεί ένα σύστημα εξισώσεων 5×5 . Πρέπει να μετρηθούν κατ' ελάχιστο 5 ομόλογα σημεία. Στην πραγματικότητα μετρούνται περισσότερα των 5 σημείων. Κατά συνέπεια απαιτείται εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι και κατά την περίοδο της αναλυτικής φωτογραμμετρίας τα σημεία επιλέγονταν από το χρήστη του αναλυτικού οργάνου στις λεγόμενες περιοχές von Gruber. Σήμερα τα σημεία μπορούν να επιλέγονται και από αλγορίθμους ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος σε μεγάλους αριθμούς. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Harris. Ο αριθμός των σημείων που επιλέγει ο χρήστης (ακόμα και στους ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς) είναι πεπερασμένος. Αντίθετα, στην αυτόματη ανίχνευση σημείων τα σημεία ενδιαφέροντος επιλέγονται μέσω ενός αλγορίθμου (βλ. Κεφάλαιο 1), που συνήθως δίνει πολύ μεγάλο αριθμό σημείων ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, στο πρώτο στερεομοντέλο των εφαρμογών της εργασίας αυτής ο αριθμός των σημείων με τα οποία πραγματοποιήθηκε ο σχετικός προσανατολισμός αρχικά ήταν 1096. Μετά την επαναληπτική διαδικασία αφαίρεσης παρατηρήσεων, παρέμειναν 1078 σημεία στο διάστημα εμπιστοσύνης 2.67σ. Είναι σαφές ότι ο αριθμός των ομολογιών είναι πολύ μεγάλος. Το ζήτημα που παραμένει είναι η κατανομή των σημείων αυτών στο στερεομοντέλο.

Στους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν τα σημεία ενδιαφέροντος καλύπτουν ολόκληρο το στερεομοντέλο και όχι μόνο τις περιοχές von Gruber. Σε όλα τα στερεοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν δεν προέκυψε πρόβλημα κατανομής των σημείων εφόσον χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Harris με τιμές κατωφλίσωσης του μέτρου γωναικότητας κάτω από 20.000. Υπενθυμίζεται ότι η τιμή κατωφλίσωσης του μέτρου γωναικότητας είναι το όριο κάτω από το οποίο μηδενίζεται αυτή η τιμή για την εικονοψηφίδα, οπότε πρόκειται για μη επιλεγόμενο σημείο. Για να δοθεί μια αίσθηση για την μεταβλητή αυτή, σημειώνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο “αυστηρότερη” είναι η επιλογή των σημείων ενδιαφέροντος.

3.4 Η επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας

Όπως αναφέρθηκε, η επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στο πρόγραμμα που συντάχθηκε (PHOTOmatch) ο σχετικός προσανατολισμός επιλύεται με τη γενική μέθοδο (μέθοδος μικτών εξισώσεων).

Η μέθοδος των μικτών εξισώσεων

Η μέθοδος των μικτών εξισώσεων χρησιμοποιείται γενικά στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν εξισώσεις που συνδέουν τα παρατηρούμενα μεγέθη με τις παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου (αγνώστους) αλλά ο διαχωρισμός τους δεν είναι αλγεβρικά δυνατός. Δηλαδή δεν είναι δυνατό να υπάρξουν σχέσεις της μορφής $y = f(x)$, όπου x είναι το διάνυσμα των αγνώστων και y είναι το διάνυσμα των μετρήσεων. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση των εξισώσεων συνεπιπεδότητας. Από την Εξ. (13)

$$c(x_{\beta} r_{12} + y_{\beta} r_{22} - cr_{32}) + y_{\alpha} (x_{\beta} r_{13} + y_{\beta} r_{23} - cr_{33}) - b_y [x_{\alpha} (x_{\beta} r_{13} + y_{\beta} r_{23} - cr_{33}) + c(x_{\beta} r_{11} + y_{\beta} r_{21} - cr_{31})] + b_z [x_{\alpha} (x_{\beta} r_{12} + y_{\beta} r_{22} - cr_{32}) - y_{\alpha} (x_{\beta} r_{11} + y_{\beta} r_{21} - cr_{31})] = 0$$

συνάγεται ότι δεν είναι δυνατό να διαχωριστούν τα γωνιακά στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού (ω , ϕ , κ) που υπεισέρχονται στα στοιχεία του πίνακα στροφής

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

από τις μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων (x_a, y_a, x_b, y_b), λόγος για τον οποίο εδώ χρησιμοποιήθηκε η γενική μέθοδος.

Η χρησιμοποιούμενη εξίσωση συνεπιπεδότητας περιλαμβάνει τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού (άγνωστοι), τις παρατηρούμενες εικονοσυντεταγμένες ομολόγων σημείων (μετρήσεις) και σταθερές (όπως η σταθερά c της μηχανής). Είναι μια σχέση της μορφής

$$F(b_y, b_z, \omega, \varphi, \kappa, x_a, y_a, x_b, y_b) = 0 \quad (\text{Εξ. 14})$$

Για την ανάπτυξη της μεθόδου των μικτών εξισώσεων είναι απαραίτητες προσεγγιστικές τιμές για τις παραμέτρους του μαθηματικού μοντέλου. Το πρόβλημα των προσεγγιστικών τιμών αντιμετωπίστηκε εδώ με τον εξής τρόπο, που είναι και ο συνήθης τρόπος για τις εφαρμογές της αεροφωτογραμμετρίας. Τα γωνιακά στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού (ω, φ, κ) μπορούν να λάβουν μηδενικές αρχικές τιμές. Το ίδιο συμβαίνει και με τα γραμμικά στοιχεία (b_y, b_z) που είναι οι λόγοι των κατά y και z συνιστωσών της βάσης ως προς την κατά x συνιστώσα της:

$$b_y = \frac{B_y}{B_x} \quad \text{και} \quad b_z = \frac{B_z}{B_x}$$

Κατά τον προγραμματισμό πτήσης τα παραπάνω στοιχεία θεωρούνται μηδενικά καθώς η κατά y συνιστώσα της βάσης δεσμεύεται από την τήρηση του άξονα πτήσης οριζοντιογραφικά, ενώ η συνιστώσα κατά z από την τήρηση του άξονα υψομετρικά (ο άξονας πτήσης του αεροπλάνου έχει σταθερό υψόμετρο).

Στις συνήθεις περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις. Στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής δεν αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του αυτόματου σχετικού προσανατολισμού σε περιπτώσεις όπου δεν ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις, αλλά απαιτείται η εισαγωγή των στοιχείων του για την περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Το γενικότερο πρόβλημα της θεώρησης των αρχικών τιμών του σχετικού προσανατολισμού στην γενική περίπτωση λήψεων και η αυτόματη εύρεση αρχικών τιμών έχει απασχολήσει άλλη διπλωματική εργασία (Μπουτσικάκης, 2003).

Εφόσον είναι γνωστές οι προσεγγιστικές τιμές του σχετικού προσανατολισμού η Εξ. (14) μπορεί να γραφεί σε μορφή αναπτύγματος Taylor. Στα επόμενα οι σχέσεις παρουσιάζονται, για ευκολία, σε μορφή πινάκων.

$$w = F = F(x^0, y^b) + \frac{\partial F}{\partial x^a} (x^a - x^0) + \frac{\partial F}{\partial y} (y^a - y^b) = 0 \quad (\text{Εξ. 15})$$

Στην παραπάνω σχέση ο όρος $F(x^0, y^b)$ είναι η τιμή της εξίσωσης συνεπιπεδότητας που δίνουν οι αρχικές τιμές των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού (x^a) και οι τιμές των μετρήσεων (y^b). Με

$$\frac{\partial F}{\partial x^a}$$

συμβολίζεται ο πίνακας $s \times m$ των μερικών παραγώγων της εξίσωσης συνεπιπεδότητας

ως προς τους αγνώστους (s εξισώσεις συνεπιπεδότητας και m άγνωστοι – παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου). Ενδεικτικά, ο πίνακας \mathbf{A} έχει για s ομόλογα σημεία την μορφή

$$\mathbf{A} = \frac{\partial F}{\partial x^a} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_m} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial F_s}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial x_m} \end{bmatrix}$$

Ο παράγοντας $x^a - x^0$ είναι ο πίνακας $m \times 1$ των διορθώσεων των αγνώστων και έχει την παρακάτω μορφή.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} b_y - b_y^0 \\ b_z - b_z^0 \\ \omega - \omega^0 \\ \phi - \phi^0 \\ \kappa - \kappa^0 \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας \mathbf{B} είναι ο πίνακας των μερικών παραγώγων της εξίσωσης συνεπιπεδότητας ως προς τις εικονοσυντεταγμένες των ομολόγων σημείων. Οι διαστάσεις του πίνακα είναι s γραμμές \times n στήλες και η γενική του μορφή είναι

$$\mathbf{B} = \frac{\partial F}{\partial y^a} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial F_s}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Τέλος, \mathbf{v} είναι ο πίνακας $n \times 1$ των διορθώσεων των εικονοσυντεταγμένων των ομολόγων σημείων (δηλαδή των μετρήσεων).

Με βάση αυτούς τους συμβολισμούς, προκύπτει το εξής σύστημα εξισώσεων:

$$\mathbf{w} + \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{v} = 0 \text{ (Εξ. 16)}$$

Οι Εξ. (16) αποτελούν σύστημα s εξισώσεων με $n+m$ αγνώστους. Ισχύει ότι $s < n+m$.

Κατά συνέπεια το σύστημα έχει άπειρες λύσεις. Οι άγνωστοι είναι το διάνυσμα \mathbf{x} των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου και το διάνυσμα \mathbf{y} των καλύτερων τιμών των μετρήσεων. Το ζήτημα είναι η εύρεση εκείνου του ζεύγους των \mathbf{x} και \mathbf{y} που ικανοποιεί το κριτήριο των ελαχίστων τετραγώνων $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \min$.

Η σημασία της θεώρησης πίνακα βάρους \mathbf{P} είναι η εξής. Αν κάποια ζεύγη ομολόγων σημείων έχουν μετρηθεί με ακριβέστερη μέθοδο, ή αν χρησιμοποιηθεί κάποιο κριτήριο για την αξιολόγηση της κάθε μέτρησης εικονοσυντεταγμένων, τότε έχει νόημα η χρησιμοποίηση του πίνακα των βαρών. Στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε οι εικονοσυντεταγμένες των ομολόγων σημείων θεωρούνται ίδιας ακρίβειας. Συνεπώς το κριτήριο βελτιστοποίησης των ελαχίστων τετραγώνων είναι $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = \min$.

Ωστόσο, για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του θέματος του πίνακα βάρους πρέπει να γίνει αναφορά στα κριτήρια που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν για την εκτίμηση της ακρίβειας των εικονοσυντεταγμένων. Στην περίπτωση της αυτόματης εξαγωγής ομολόγων σημείων η διαδικασία της συνταύτισης είναι απολύτως επαναλήψιμη. Συνεπώς, από την άποψη της μέτρησης, δεν υπάρχει κριτήριο για τη θεώρηση της ακρίβειας προσδιορισμού. Όμως το κριτήριο που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως βάρος είναι ο συντελεστής συσχέτισης της συνταύτισης είτε, αντίστοιχα, η αβεβαιότητα της μετάθεσης ή το σφάλμα της συνόρθωσης στην περίπτωση της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης.

Η λύση του συστήματος εξισώσεων της Εξ. 16, δηλαδή η εύρεση των βέλτιστων τιμών των 5 αγνώστων του σχετικού προσανατολισμού και των βέλτιστων τιμών των ομολόγων εικονοσυντεταγμένων, είναι (Δερμάνης, 1999)

$$\hat{\mathbf{x}} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{w} \quad (\text{Εξ. 17})$$

όπου $\mathbf{M} = \mathbf{B} \mathbf{P} \mathbf{B}^T$, ενώ το διάνυσμα των βέλτιστων μετρήσεων είναι αντίστοιχα

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{w} + \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}) \quad (\text{Εξ. 18})$$

Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της λύσης του σχετικού προσανατολισμού

Το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους είναι

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{s-5}}$$

όπου s είναι ο αριθμός των ομολογιών (των ζευγών σημείων) που χρησιμοποιήθηκαν. Η τυπική απόκλιση της μονάδας βάρους είναι στις μονάδες μέτρησης των εικονοσυντεταγμένων, δηλαδή ανάλογα με την περίπτωση σε mm ή pixel. Ο πίνακας μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων είναι $\mathbf{V} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{N}^{-1}$. Μετά την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού, τα υπολειπόμενα σφάλματα των μετρήσεων δίνονται από τη σχέση

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} - \delta \mathbf{l}$$

Για κάθε ομολογία σημείων έχουμε 4 υπολειπόμενα σφάλματα, κατά x και κατά y της αριστερής και της δεξιάς εικόνας. Από τον πίνακα \mathbf{v} , διαστάσεων $4s \times 1$, είναι δυνατό να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα των παρατηρήσεων, δηλαδή των ομολογιών σημείων. Το στοιχείο που αφορά τη λύση του σχετικού προσανατολισμού είναι για κάθε ομολογία το υπολειπόμενο σφάλμα κατά την y διεύθυνση (που είναι η

βασική έκφραση της ασυμβατότητας των ομολογών ακτίνων). Το μαθηματικό μοντέλο του σχετικού προσανατολισμού επιβάλλει το μηδενισμό της ποσότητας αυτής. Η τιμή της, κατά συνέπεια, αποτελεί ένδειξη για το κατά πόσο το σημείο αυτό προσαρμόζεται στη λύση που πραγματοποιήθηκε. Μεγάλη τιμή υπολειπόμενου σφάλματος δείχνει ότι το σημείο αυτό (δηλαδή η ομολογία αυτή) δεν προσαρμόζεται καλά στη λύση που έδωσαν τα υπόλοιπα σημεία. Ως μέτρο σύγκρισης για την αποδοχή του σημείου θεωρήθηκε η σύγκριση της τιμής του εναπομένου σφάλματός της με την τυπική απόκλιση της μονάδας βάρους. Εδώ θεωρήθηκε ως όριο αποδοχής η τιμή $2.67 \times \sigma_0$. Αυτό σημαίνει πως τα εναπομένοντα σφάλματα των σημείων θεωρήθηκαν δείγματα μιας μεταβλητής της οποίας γνωρίζουμε την κατανομή και τα στοιχεία της κατανομής της. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι τα εναπομένοντα σφάλματα ακολουθούν την κανονική κατανομή (κατανομή Gauss) με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σ_0 . Ως όριο αποδοχής θεωρήθηκε το επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Συνεπώς το οριζόμενο διάστημα εμπιστοσύνης είναι το $[-2.67 \times \sigma_0, 2.67 \times \sigma_0]$.

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης των μη αποδεκτών σημείων αφαιρείται ένα μόνο σημείο σε κάθε επανάληψη. Μετά την αφαίρεσή του προσδιορίζονται ξανά τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού. Η διαδικασία τερματίζεται όταν τα υπολειπόμενα σφάλματα όλων των σημείων βρίσκονται μέσα στο οριζόμενο διάστημα εμπιστοσύνης. Η τελευταία λύση ορίζει τις τελικά εκτιμώμενες τιμές για τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού.

Κεφάλαιο 4 - Ψηφιακή συνταύτιση εικόνων

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στις τεχνικές της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας που χρησιμοποιούνται στη φωτογραμμετρία, και ειδικότερα αναλύονται οι αλγόριθμοι επιφανειακής συνταύτισης α) του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης και β) της ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης.

Το τυπικό πρόβλημα της συνταύτισης ορίζεται ως εξής. Για δεδομένο σημείο P σε εικόνα αναζητείται το ομόλογό του P_1 σε μια δεύτερη εικόνα. Είναι προφανές ότι το σημείο σε μια ψηφιακή εικόνα αναφέρεται σε εικονοψηφίδα γνωστών συντεταγμένων εικόνας (i, j) . Αυτή η εικονοψηφίδα αντιστοιχεί σε ένα σημείο του αντικειμένου, έστω O . Το σημείο αυτό έχει προβληθεί και σε μια δεύτερη ή και περισσότερες εικόνες. Το ζήτημα είναι η εύρεση του σημείου στις άλλες εικόνες. Για λόγους απλότητας, και χωρίς να αίρεται η γενικότητα στην παρακάτω ανάλυση, θεωρείται ότι το πρόβλημα περιορίζεται σε δύο εικόνες.

4.1 Ορισμός του προβλήματος

Κατ' αρχάς θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Το πρόβλημα της συνταύτισης είναι ένα ελλιπώς ορισμένο πρόβλημα (ill posed problem). Ένα πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως ελλιπώς ορισμένο όταν έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Heipke, 1992):

- Είναι δυνατό να μην έχει λύση
- Είναι δυνατό να μην έχει μοναδική λύση
- Είναι δυνατό η λύση να μην είναι σταθερή σε μικρές μεταβολές των δεδομένων

Το πρόβλημα της συνταύτισης είναι ένα τέτοιο πρόβλημα καθώς είναι δυνατό να μην έχει λύση, πχ. λόγω αποκρύψεων. Η λύση είναι δυνατό να μην είναι μοναδική, πχ. λόγω επαναλαμβανόμενων προτύπων. Η λύση μπορεί να είναι ασταθής λόγω απουσίας υφής (texture) στην εικόνα ικανής να προσδώσει σταθερότητα στη λύση.

Μια εικονοψηφίδα περιέχει ως πληροφορία μόνο την ψηφιακή τιμή της (τόνος του γκρι). Η πληροφορία αυτή δεν είναι επαρκής, όχι μόνο γιατί γενικά πολλές εικονοψηφίδες θα έχουν τον ίδιο τόνο, αλλά και γιατί λόγω της διαφορετικής θέσης λήψης των δύο εικόνων το ίδιο σημείο του αντικειμένου δεν δίνει ίδια ένταση σήματος στις δύο εικόνες λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών όσο και διότι τα υλικά διαφέρουν σημαντικά από τα ιδεώδη υλικά Lambert και δεν παρουσιάζουν ίδια σκέδαση φωτός προς όλες τις διευθύνσεις. Συνεπώς δεν επαρκεί για τον ορισμό προτύπου που θα αναζητείται με κάποιον αλγόριθμο αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, ως πρότυπο συνταύτισης επιλέγεται ένα σύνολο εικονοψηφίδων που αποτελεί ένα παράθυρο (patch) προς συνταύτιση. Το ερώτημα είναι πλέον εάν υπάρχει ένα τέτοιο σύνολο εικονοψηφίδων στη δεύτερη εικόνα και ζητούμενο είναι ο εντοπισμός του.

Ως πρότυπα χρησιμοποιούνται, εκτός από τα παράθυρα, και τα λεγόμενα χαρακτηριστικά (σημεία, γραμμές, μικρές επιφάνειες). Αυτά πρέπει να είναι ευδιάκριτα, αμετάβλητα σε ραδιομετρικές και γεωμετρικές μεταβολές (invariant structures), σταθερά στην ύπαρξη θορύβου και σπάνια στις δύο εικόνες. Ο ορισμός τέτοιων αναλλοίωτων δομών και η ταυτοποίησή τους (συνταύτιση χαρακτηριστικών) αποτελεί ένα από τα σημαντικά πεδία επιστημονικού ενδιαφέροντος της φωτογραμμετρίας και της όρασης υπολογιστών. Για την ταυτοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών δομών χρησιμοποιείται ένα σύνολο ιδιοτήτων τους, το αποκαλούμενο διάνυσμα χαρακτηριστικών στο επιστημονικό πεδίο της αναγνώρισης προτύπων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι

το διάνυσμα αυτό για μια δομή που έχει εξαχθεί μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορία θέσης (στο σύστημα των συντεταγμένων εικόνας), προσανατολισμό (στο ίδιο σύστημα), μήκος και καμπυλότητα εφόσον το στοιχείο είναι γραμμικό ή μέγεθος και μέση φωτεινότητα εφόσον το στοιχείο είναι επιφανειακό. Για μια δεδομένη εικόνα συνεπώς εξάγεται ένα σύνολο δομών και αποθηκεύεται σε ένα αρχείο που περιλαμβάνει τις δομές και τις ιδιότητές τους. Οι ιδιότητες αποτελούν το διάνυσμα χαρακτηριστικών κάθε δομής.

Στην εργασία αυτή, το μόνο χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται είναι το σημείο, και αυτό βοηθητικά για την υποστήριξη των επόμενων βημάτων, στα οποία ως μόνο πρότυπο χρησιμοποιείται το παράθυρο που σχηματίζεται περί μια εικονοψηφίδα. Γι' αυτό το λόγο αναλύονται παρακάτω οι αλγόριθμοι αναζήτησης ομόλογων σημείων με βάση τα στατιστικά στοιχεία του παραθύρου (μέση τιμή, τυπική απόκλιση). Το παράθυρο – σύνολο εικονοψηφίδων περί το σημείο ενδιαφέροντος της αρχικής εικόνας – ονομάζεται παράθυρο αναφοράς (template window), και το παράθυρο στην δεύτερη εικόνα παράθυρο αναζήτησης (matching window). Το ζήτημα είναι η εύρεση, μεταξύ όλων των σχηματιζόμενων παραθύρων στη δεύτερη εικόνα (εικόνα αναζήτησης), εκείνου που ομοιάζει περισσότερο με το αρχικό παράθυρο.

Όπως και σε όλα τα προβλήματα αναγνώρισης προτύπων ή συνταύτισης, η λύση επιτυγχάνεται με τον ορισμό μιας συνάρτησης, της οποίας η μέγιστη τιμή θα αναπαριστά ένα πρότυπο που ομοιάζει περισσότερο με το αρχικό πρότυπο. Η συνάρτηση αυτή διαφέρει ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο συνταύτισης. Τέτοιες μέθοδοι συνταύτισης είναι η μέθοδος των απολύτων διαφορών, η μέθοδος του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης και η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας.

4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος

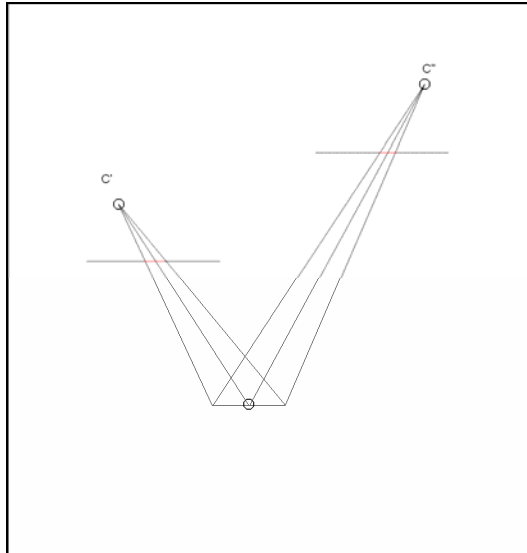
Πριν από την ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία για την ανίχνευση ομόλογων σημείων πρέπει να γίνει μια αναφορά σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιγράφουν ορισμένες από τις αιτίες των προβλημάτων της ψηφιακής συνταύτισης.

A) Υπάρχει περίπτωση διαφοράς κλίμακας μεταξύ των προτύπων (patches) τα οποία αντιστοιχούν στην ίδια περιοχή του εδάφους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπάρξει ένα παράθυρο στην αριστερή εικόνα που να αντιστοιχίζεται με ένα παράθυρο ίδιων διαστάσεων στη δεξιά. Αυτή η γεωμετρική παραμόρφωση εμφανίζεται στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών όταν υπάρχει μεταβολή του ύψους πτήσης του αεροπλάνου (Εικ. 12).

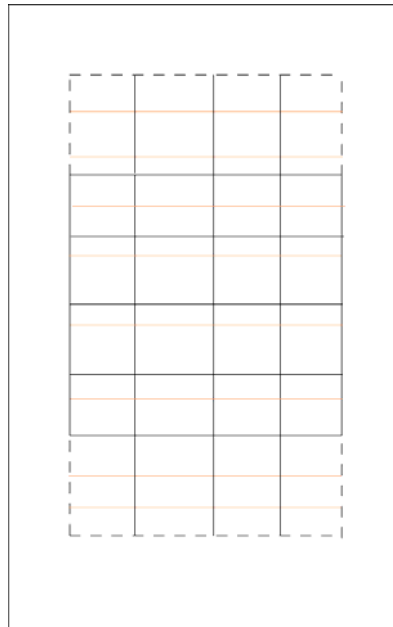
B) Διαφορετικές γωνίες στροφής μεταξύ των δύο εικόνων. Ως γνωστόν, σε ένα ζεύγος οι σχετικές στροφές πρακτικά ποτέ δεν είναι μηδενικές, δηλαδή η δεξιά εικόνα παρουσιάζει στροφές ως προς το σύστημα της αριστερής που προσδιορίζονται από τη λύση του σχετικού προσανατολισμού. Οι 3 γωνίες στροφής ω , ϕ και κ δημιουργούν 3 διαφορετικές γεωμετρικές παραμορφώσεις στις απεικονίσεις της ίδιας περιοχής του εδάφους.

Η στροφή ω δημιουργεί παραμορφώσεις κατά τον άξονα y της εικόνας, όπως φαίνεται στην Εικ. 13.

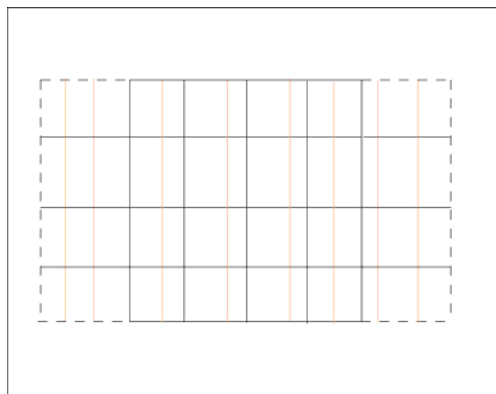
Η στροφή ϕ δημιουργεί παραμορφώσεις κατά τον άξονα x της εικόνας, παρόμοιες με τις προηγούμενες (Εικ. 14).



Εικόνα 12. Διαφορά κλίμακας μεταξύ των εικόνων.

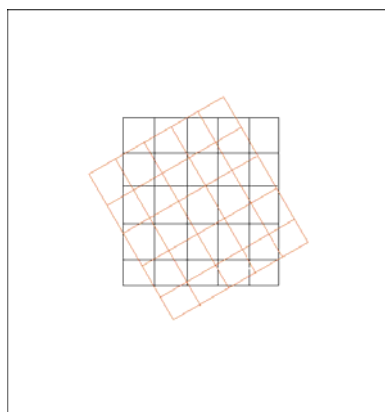


Εικόνα 13. Επίδραση σχετικής γωνίας ω στη διαμόρφωση του προτύπου στις εικόνες.



Εικόνα 14. Επίδραση σχετικής γωνίας ϕ στη διαμόρφωση του προτύπου στις εικόνες.

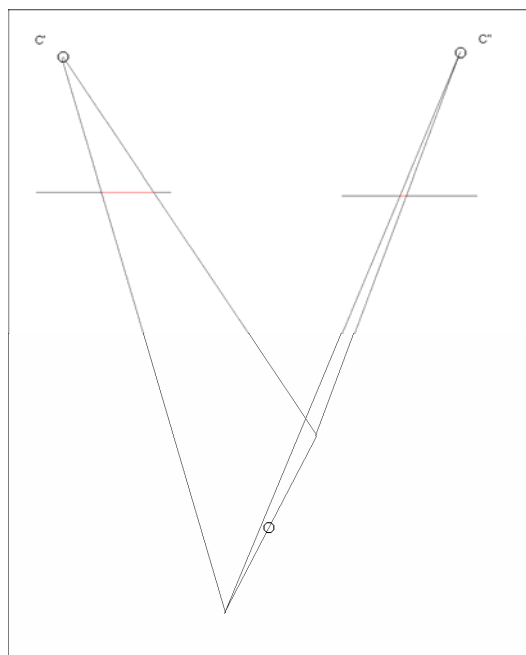
Τέλος, η σχετική γωνία κ στρέφει το πρότυπο περί από τον άξονα z , όπως φαίνεται στην Εικ. 15.



Εικόνα 15. Επίδραση σχετικής γωνίας κ στη διαμόρφωση του προτύπου στις εικόνες.

Σύμφωνα λοιπόν με τα προαναφερθέντα, οι διαφορές που υπάρχουν στην απεικόνιση ενός προτύπου στις δύο εικόνες οφείλονται σε διαφορές κλίμακας και 3 στροφές. Αυτό σημαίνει ότι αν γίνει προσπάθεια αναλυτικής μαθηματικής περιγραφής του προτύπου της δεύτερης εικόνας για δεδομένο πρότυπο της πρώτης εικόνας, τότε μια πρώτη προσεγγιστική περιγραφή θα μπορούσε να είναι η αφινική παραμόρφωση, καθώς αυτή μπορεί να περιγράψει μεταβολή κλίμακας στις διευθύνσεις x , y και στροφές περί τους δύο άξονες (και μετάθεση του προτύπου).

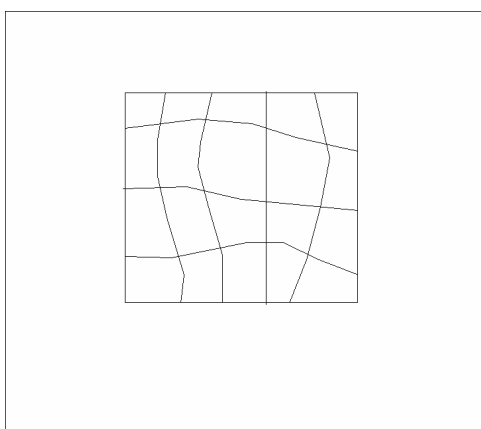
Στις παραπάνω γεωμετρικές παραμορφώσεις, οι οποίες οφείλονται σε στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών των εικόνων υπό την προϋπόθεση επίπεδου εδάφους, πρέπει να προστεθεί και η παραμόρφωση που οφείλεται στις κλίσεις του εδάφους, ακόμα και όταν αυτό είναι επίπεδο. Όπως φαίνεται στην Εικ. 16, μπορεί να εμφανίζονται σημαντικές διαφορές κλίμακας στην απεικόνιση ενός προτύπου λόγω της κλίσης του στον χώρο.



Εικόνα 16. Διαφορά κλίμακας προτύπων λόγω κλίσης του εδάφους.

Και αυτή όμως η διαφορά κλίμακας μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν αφινικό μετασχηματισμό, εφόσον το έδαφος θεωρηθεί επίπεδο. Βέβαια ο ανώτερος γραμμικός μετασχηματισμός που θα ήταν πιο κοντά στην πραγματικότητα θα ήταν ο προβολικός. Γενικά όμως τα πρότυπα είναι τόσο μικρά, ώστε να μπορεί κανείς να προσεγγίσει την απεικόνισή τους με πλάγια προβολή (από το άπειρο) αντί της ορθής προβολής. Γενικά, λοιπόν, θεωρείται ότι σε αυτές τις περιπτώσεις επαρκεί η αφινική περιγραφή.

Στην περίπτωση όμως που το πρότυπο δεν είναι επίπεδο, τότε δεν μπορεί να υπάρξει αφινικός (ή άλλος γραμμικός) μετασχηματισμός που να μετασχηματίζει το πρότυπο της μιας εικόνας σε πρότυπο της άλλης. Αυτό συμβαίνει διότι οι μετασχηματισμοί τους οποίους υφίσταται ένα πρότυπο τυχαίας μορφολογίας κατά την απεικόνισή του σε δύο εικόνες είναι δύο γενικές κεντρικές προβολές 3D→2D, η σχέση των οποίων δεν περιγράφεται γραμμικά αφού διαμεσολαμβάνεται από το άγνωστο ανάγλυφο του αντικειμένου. Το παραμορφωμένο 3D πρότυπο σε μια εικόνα παρουσιάζει την μορφή της Εικ. 17.



Εικόνα 17. Παραμορφωμένο πρότυπο μη επίπεδου αντικειμένου.

Η κατανόηση των γεωμετρικών παραμορφώσεων που υφίσταται ένα πρότυπο είναι θεμελιώδης για την επιλογή των μαθηματικών εργαλείων συνταύτισης.

4.3 Μέθοδοι επιφανειακής συνταύτισης

4.3.1 Μέθοδος του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στα στατιστικά στοιχεία του παραθύρου – προτύπου αναφοράς της πρώτης εικόνας. Η εφαρμογή της απαιτεί τον ορισμό των διαστάσεων του παραθύρου και τον ορισμό μιας ευρύτερης περιοχής στη δεύτερη εικόνα, όπου θα αναζητηθεί το ομόλογο πρότυπο, το κεντρικό σημείο του οποίου θα αποτελέσει τελικά το ομόλογο σημείο.

Ο συντελεστής συσχέτισης έχει την εξής αναλυτική μορφή:

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}$$



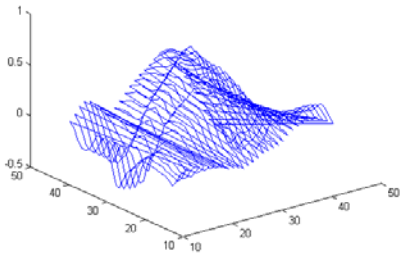
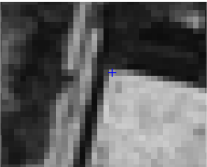
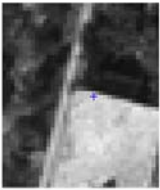
όπου σ_{12} είναι η συμμεταβλητότητα των δύο παραθύρων και σ_1, σ_2 οι τυπικές αποκλίσεις τους. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης έχει ορισμένες χρήσιμες ιδιότητες. Έτσι, παραμένει αμετάβλητος σε ενιαίες μεταβολές της φωτεινότητας.

τητας ενός παραθύρου. Δηλαδή αν στις ψηφιακές τιμές του ενός παραθύρου προστεθεί μια τιμή (πχ. 10 μονάδες) και η εικόνα μετατοπιστεί προς το λευκό, ο συντελεστής συσχέτισης θα παραμείνει αμετάβλητος. Τούτο οφείλεται στο ότι όλες οι παράμετροι που συμμετέχουν στον ορισμό του συντελεστή είναι ανηγμένες στον μέσο όρο. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική καθώς ένα πρότυπο (patch) στις δύο εικόνες λαμβάνεται από δύο διαφορετικές θέσεις με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ο φωτισμός του. Αντίστοιχα, η συμμετοχή των τυπικών αποκλίσεων των εικόνων καθιστά τον συντελεστή αμετάβλητο και σε γραμμικές μεταβολές της ραδιομετρίας (μεταβολή της αντίθεσης) ενός παραθύρου, φαινόμενο επίσης όχι ασυνήθιστο μεταξύ ομόλογων παραθύρων.

Ο αλγόριθμος της εύρεσης του ομόλογου σημείου έχει ως εξής. Ορίζεται πρότυπο παράθυρο στην αριστερή εικόνα διαστάσεων $n \times n$. Ορίζεται επίσης ένα μεγαλύτερο παράθυρο, έστω $m \times m$ ($m > n$) στη δεξιά εικόνα, μέσα στο οποίο αναμένεται ότι βρίσκεται το ομόλογο σημείο. Το μικρό παράθυρο διατρέχει το μεγάλο και καταγράφει σε κάθε θέση του (εικονοψηφίδα) τον συντελεστή συσχέτισης. Το pixel που εμφανίζει τον μέγιστο συντελεστή συσχέτισης είναι το ομόλογο σημείο.

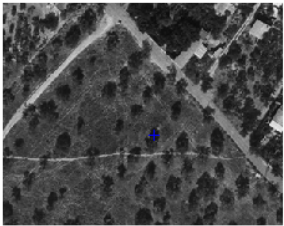

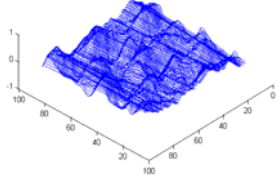
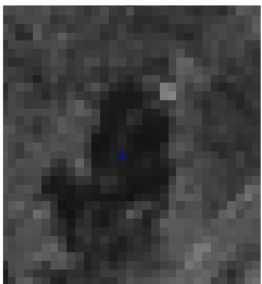
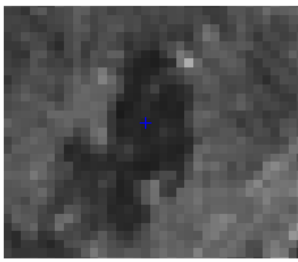
Συνήθως βέβαια ορίζεται ένα όριο (κατώφλι) για την αποδοχή μιας ομολογίας σημείων. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποια γενικά αποδεκτή τιμή του ορίου αυτού – και ούτε άλλωστε θα μπορούσε να υπάρχει, αφού αυτό εξαρτάται κάθε φορά από τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής. Συνήθως αναφέρονται τιμές μεταξύ 0.60 και 0.75. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία αυτή για την παραγωγή πυκνού ψηφιακού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν υψηλότερες τιμές ορίου αποδοχής, μεταξύ 0.80 και 0.85. Αυτό συνέβη αφού με την χρήση μικρότερων τιμών κατωφλίου εξαγόταν σημαντικός αριθμός λανθασμένων σημείων, γεγονός που δημιουργούσε προβλήματα στη χρησιμοποίησή τους για τη μετέπειτα πύκνωση του ψηφιακού μοντέλου. Σημειώνεται επίσης μια ακόμα παρατήρηση. Όσο ισχυρότερη είναι η γεωμετρική δέσμευση που περιορίζει την περιοχή αναζήτησης τόσο πιο μικρό όριο μπορεί να θεωρηθεί.

Στην συνέχεια δίνονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα για τη συμπεριφορά του συντελεστή συσχέτισης στην ψηφιακή συνταύτιση. Το πρώτο αφορά τον εντοπισμό της γωνίας ενός κτιρίου και το δεύτερο δείχνει τη συμπεριφορά του σε επαναλαμβανόμενο πρότυπο.

Εικόνα προτύπου	Εικόνα αναζήτησης	Τρισδιάστατο διάγραμμα συντελεστή συσχέτισης
		
		

Η συνταύτιση που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα πραγματοποιήθηκε με συντελεστή συσχέτισης 0.8. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των εικόνων, η συνταύτιση είναι ανεπιτυχής. Από τις δύο εικόνες είναι σαφές ότι το πρότυπο που θεωρήθηκε στην αριστερή εικόνα δεν υπάρχει στη δεξιά εικόνα λόγω της εκτροπής της απεικονιζόμενης κατασκευής. Αυτός είναι και ο λόγος που “γενικά” οι γωνίες κτιρίων δεν έχουν επιτυχή συνταύτιση.

Στο δεύτερο παράδειγμα αμέσως πιο κάτω η συνταύτιση είναι επιτυχής, όπως όμως φαίνεται από το τρισδιάστατο διάγραμμα του συντελεστή συσχέτισης στην περιοχή αναζήτησης υπάρχουν επαναλαμβανόμενα πρότυπα (ελιές), επομένως η συνταύτιση θα μπορούσε να είχε καταλήξει σε κάποιο “τοπικό μέγιστο”.

Εικόνα προτύπου	Εικόνα αναζήτησης	Τρισδιάστατο διάγραμμα συντελεστή συσχέτισης
		
		

4.3.2 Μέθοδος των τετραγώνων των απολύτων διαφορών

Η μέθοδος καλείται και μέθοδος της απόστασης των δύο εικόνων (‘image distance’). Είναι μια απλούστερη μέθοδος που αναπαριστά τη διαφορά μεταξύ δύο προτύπων g_T και g_m διαστάσεων $R \times C$.

$$D(g_T, g_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C (g_T(i, j) - g_m(i, j))^2}$$

Προφανώς η διαφορά αυτή αναφέρεται στο σύστημα της ψηφιακής εικόνας. Για να έχει αμετάβλητη τιμή ως προς τη διάσταση του παραθύρου η τιμή διαιρείται με τον συνολικό αριθμό των εικονοψηφίδων του παραθύρου $R \times C$ και δίνει την κανονικοποιημένη μορφή του.

$$D_N(g_T, g_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C (g_T(i, j) - g_m(i, j))^2}{RC}}$$

4.3.3 Ελαχιστοτετραγωνική ψηφιακή συνταύτιση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατά την ανάλυση των γεωμετρικών παραμορφώσεων του προτύπου από την πρώτη εικόνα στη δεύτερη, εφόσον το πρότυπο είναι επίπεδο μπορεί να υπάρξει αφινικός μετασχηματισμός που να μετασχηματίζει το πρότυπο της μιας εικόνας στο πρότυπο της δεύτερης.

Έστω x, y οι εικονοσυντεταγμένες της δεύτερης εικόνας και i, j της πρώτης. Τότε για κάθε εικονοψηφίδα του προτύπου ο μετασχηματισμός είναι:

$$\begin{aligned} x &= t_0 + t_1 i + t_2 j \\ y &= t_3 + t_4 i + t_5 j \end{aligned}$$

Στην πράξη και για διευκόλυνση των υπολογισμών, θεωρείται ότι ο παραπάνω μετασχηματισμός είναι ο μετασχηματισμός του παραθύρου στην εικόνα αναζήτησης. Η χρησιμοποιούμενη εξίσωση παρατήρησης είναι:

$$r(i, j) = t(i, j) - m(x, y)$$

όπου $r(i, j)$ είναι η διαφορά των ψηφιακών τιμών των δύο προτύπων. Ο όρος $m(x, y)$ μπορεί να γραμμικοποιηθεί με βάση τις εξισώσεις του αφινικού μετασχηματισμού:

$$m(x, y) \approx m^0(x, y) + \frac{\partial m(x, y)}{\partial T_x} \left[\frac{\partial T_x}{\partial t_0} \Delta t_0 + \frac{\partial T_x}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial T_x}{\partial t_2} \Delta t_2 \right] + \frac{\partial m(x, y)}{\partial T_y} \left[\frac{\partial T_y}{\partial t_3} \Delta t_3 + \frac{\partial T_y}{\partial t_4} \Delta t_4 + \frac{\partial T_y}{\partial t_5} \Delta t_5 \right]$$

Στη σχέση αυτή υπεισέρχονται οι παράγωγοι της ψηφιακής τιμής ως προς τις παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού, οι οποίες δίδονται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m(x, y)}{\partial T_x} &= g_x & \frac{\partial m(x, y)}{\partial T_y} &= g_y \\ \frac{\partial T_x}{\partial t_0} &= 1 & \frac{\partial T_y}{\partial t_3} &= 1 \\ \frac{\partial T_x}{\partial t_1} &= x & \frac{\partial T_y}{\partial t_4} &= x \\ \frac{\partial T_x}{\partial t_2} &= y & \frac{\partial T_y}{\partial t_5} &= y \end{aligned}$$

όπου g_x, g_y είναι οι παράγωγοι της εικόνας κατά x και κατά y , οι οποίες υπολογίζονται κατά τα γνωστά ως οι διαφορές τιμών τόνου αριστερά-δεξιά και κάτω-πάνω της εκάστοτε εικονοψηφίδας, αντίστοιχα. Ο αριθμός των εξισώσεων παρατήρησης ισούται με τον αριθμό των εικονοψηφίδων του παραθύρου που ορίζει το πρότυπο (patch).

Ο πίνακας σχεδιασμού για μια εικονοψηφίδα είναι

$$\mathbf{A} = [g_x \quad g_x x \quad g_x y \quad g_y \quad g_y x \quad g_y y]$$

Το διάνυσμα των σταθερών όρων είναι η αναμενόμενη τιμή γκριζου μείον την τιμή που προκύπτει από την εφαρμογή του αφινικού μετασχηματισμού.

$$\mathbf{C} = t(i,1) - m(i,1)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων οι διορθώσεις των στοιχείων του αφινικού μετασχηματισμού είναι

$$\hat{\mathbf{t}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{C}$$

Στην εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε πίνακας βάρους ($\mathbf{P} = \mathbf{I}$).

Ο τυπικός ορισμός των αρχικών τιμών βασίζεται στην υπόθεση ότι τα δύο παράθυρα ταυτίζονται, δηλαδή:

$$t_0 = 0 \quad t_1 = 1 \quad t_2 = 0$$

$$t_3 = 0 \quad t_4 = 0 \quad t_5 = 1$$

Με βάση τις παραπάνω τιμές, αναζητούνται εκείνες οι τιμές του αφινικού μετασχηματισμού που μετασχηματίζουν το αρχικό παράθυρο στην εικόνα αναζήτησης στο προς αναζήτηση πρότυπο.

Μετά από την πρώτη επανάληψη, το παράθυρο μετασχηματίζεται και οι υπολογισμένες νέες συντεταγμένες των εικονοψηφίδων (x, y) δεν είναι πλέον ακέραιες. Για τον υπολογισμό των τόνων απαιτείται η επανασύσταση της εικόνας, δηλαδή η εφαρμογή μιας παρεμβολής στην αρχική εικόνα για την απόδοση τόνου του γκριζου. Εδώ επιλέχθηκε η διγραμμική παρεμβολή. Σημειώνεται ότι, μετά από κάθε επανάληψη, η παρεμβολή γίνεται απευθείας στη ραδιομετρία της αρχικής εικόνας με την ενημερωμένες τιμές των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Στη συνέχεια επαναπροσδιορίζονται οι τιμές του πίνακα σχεδιασμού \mathbf{A} και ακολουθεί η επίλυση για τον υπολογισμό των νέων διορθώσεων των στοιχείων του αφινικού μετασχηματισμού.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο για την σύγκλιση της λύσης. Στην εφαρμογή θεωρήθηκε κριτήριο σύγκλισης η μέγιστη μεταβολή μετάθεσης να είναι μικρότερη από ένα όριο που θεωρήθηκε ίσο με το 0.1 του pixel. Στην βασική δημοσίευση της μεθόδου (Grün, 1996) αναφέρεται ως κριτήριο σύγκλισης η μεταβολή των συντελεστών του αφινικού μετασχηματισμού:

$$|dt_0| < c_1 \quad , \quad |dt_3| < c_4$$

$$|dt_1| < c_2 \quad , \quad |dt_4| < c_5$$

$$|dt_2| < c_3 \quad , \quad |dt_5| < c_6$$

Μετά από τη σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας είναι πλέον γνωστές οι θέσεις των ομόλογων προτύπων (patches) στις δύο εικόνες. Παραμένει όμως ζητούμενο ο ακριβής ορισμός των ομόλογων σημείων από τα δύο ομόλογα πρότυπα. Έτσι, ως ομό-

λογα σημεία επιλέγεται το κέντρο βάρους (με βάση τις κλίσεις) του παραθύρου αναφοράς και το ομόλογο σημείο του, όπως αυτό προκύπτει από τις τελικές τιμές των παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού.

4.4 Εύρεση ομολογιών για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού

Στο λογισμικό που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, η ψηφιακή συνταύτιση πραγματοποιείται με βάση σημεία ενδιαφέροντος, και ειδικότερα σημεία Harris (βλ. Κεφ. 1), για την εύρεση ομολογιών για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού αρχικά, και για την πύκνωση του ψηφιακού μοντέλου στην συνέχεια.

Το στάδιο αυτό της εύρεσης ομολογιών είναι το πιο δύσκολο υπολογιστικά, καθώς η αναζήτηση οφείλει να γίνει σε ένα μεγάλο τμήμα της εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, στο στερεομοντέλο της περιοχής του Βόλου (εικόνες 245874 και 245875) χρησιμοποιήθηκε παράθυρο 201×201. Στο στερεομοντέλο της Κέας (εικόνες 684, 685) απαιτήθηκε πολύ μεγαλύτερο παράθυρο (401×401) λόγω του έντονου αναγλύφου. Ως όριο αποδοχής των ομολογιών βάσει του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε και στις δύο περιπτώσεις η τιμή 0.85. Οι ομολογίες αυτές αποτέλεσαν αρχικές τιμές για την ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση για την ολοκλήρωση του σχετικού προσανατολισμού.

Η “τυφλή” αναζήτηση χωρίς τη χρησιμοποίηση κάποιου μοντέλου του εδάφους καθιστά την εύρεση των ομολογιών επισφαλής. Το σημαντικό πλεονέκτημα όμως στη συλλογή σημείων για την αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού είναι ότι στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μαθηματικό μοντέλο του σχετικού προσανατολισμού για να εντοπιστούν τα χονδροειδή σφάλματα, όπως περιγράφεται στην αντίστοιχη ενότητα.

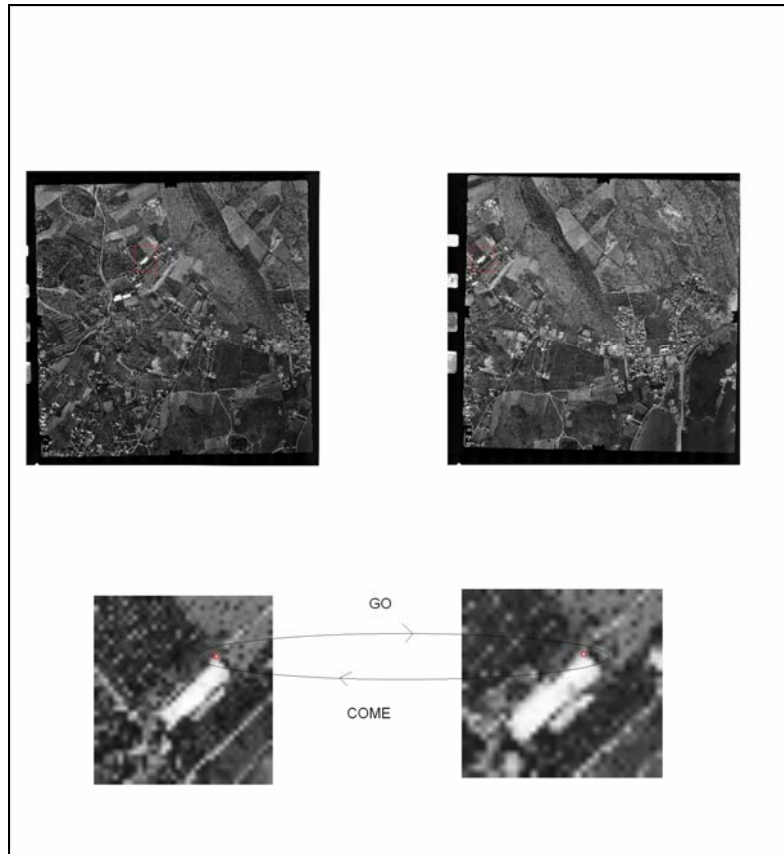
Ακόμα, στην εφαρμογή για τον έλεγχο της διαδικασίας πραγματοποιείται και ο ακόλουθος έλεγχος που διαπιστώθηκε ότι βελτιώνει κατά πολύ την αξιοπιστία των ομολογιών. Μετά την εύρεση της ομολογίας από την αριστερή εικόνα στη δεξιά, επαναλαμβάνεται η διαδικασία με την αντίστροφη φορά, δηλαδή από τη δεξιά εικόνα αναζητείται το ομόλογο σημείο στην αριστερή όπως φαίνεται στην Εικ. 18.

Με τη διαδικασία αυτή αποφεύγονται συνταυτίσεις που οφείλονται σε επαναλαμβανόμενα πρότυπα, αφού ακόμα και με πολύ αυστηρό όριο αποδοχής της συνταύτισης (πχ. 0.85) λόγω του μεγάλου μεγέθους του παραθύρου αναζήτησης δεν είναι βέβαιη η επιτυχής εύρεση του σημείου.

Το όριο αποδοχής της συνταύτισης εκφράζεται από έναν αριθμό εικονοψηφίδων dp , ο οποίος εκφράζει την διαφορά που έχουν οι θέσεις των σημείων στις συνταυτίσεις αριστερή εικόνα → δεξιά εικόνα και δεξιά εικόνα → αριστερή εικόνα:

$$dp = \text{αρχικές συντεταγμένες σημείου} - \text{συντεταγμένες σημείου επιστροφής}$$

Η τιμή του κατωφλίου αποδοχής dp ορίστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία ίση με 2 pixel.



Εικόνα 18. Επανάληψη της συνταύτισης με την αντίστροφη φορά.

Κεφάλαιο 5 – Αξιοποίηση της επιπολικής γεωμετρίας

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η θεωρία της επιπολικής γεωμετρίας των δύο εικόνων ενός στερεοζεύγους και η διαδικασία της δημιουργίας επιπολικών εικόνων από τις δύο αρχικές ψηφιακές εικόνες. Η σημασία της επιπολικής επανασύστασης είναι μεγάλη στην ψηφιακή φωτογραμμετρία και, μεταξύ άλλων, αποτελεί λειτουργία όλων των ψηφιακών φωτογραμμετρικών σταθμών προκειμένου να επιτευχθεί στερεοσκοπική παρατήρηση από τους χρήστες.

Στην παρούσα εργασία η χρησιμότητά της έγκειται στην αξιοποίησή της στη διαδικασία της συλλογής ομολόγων σημείων για παραγωγή πυκνού ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Ως γνωστόν, για την εύρεση ομολόγων σημείων ακολουθείται η διαδικασία της αναζήτησης της ομόλογης εικονοψηφίδας σε ένα παράθυρο αναζήτησης στη δεξιά εικόνα. Η θέση του παραθύρου αναζήτησης καθορίζεται συνήθως από τη μέση παράλλαξη του στερεομοντέλου ή, εφόσον αυτό υπάρχει, με βάση ένα δεδομένο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου.

Το παράθυρο αναζήτησης περιλαμβάνει έναν αριθμό γραμμών και έναν αριθμό στηλών. Στην περίπτωση αξιοποίησης των επιπολικών εικόνων, το παράθυρο αναζήτησης περιλαμβάνει, θεωρητικά τουλάχιστον, μόνο μια γραμμή και έναν αριθμό στηλών. Στην πράξη η αναζήτηση γίνεται βέβαια όχι μόνο σε μια γραμμή αλλά σε 3 ή περισσότερες, καθώς υπάρχει μια αβεβαιότητα στη θέση του ομόλογου σημείου κατά y που καθορίζεται από τις τιμές των αβεβαιοτήτων των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού και το μέγεθος της εικονοψηφίδας.

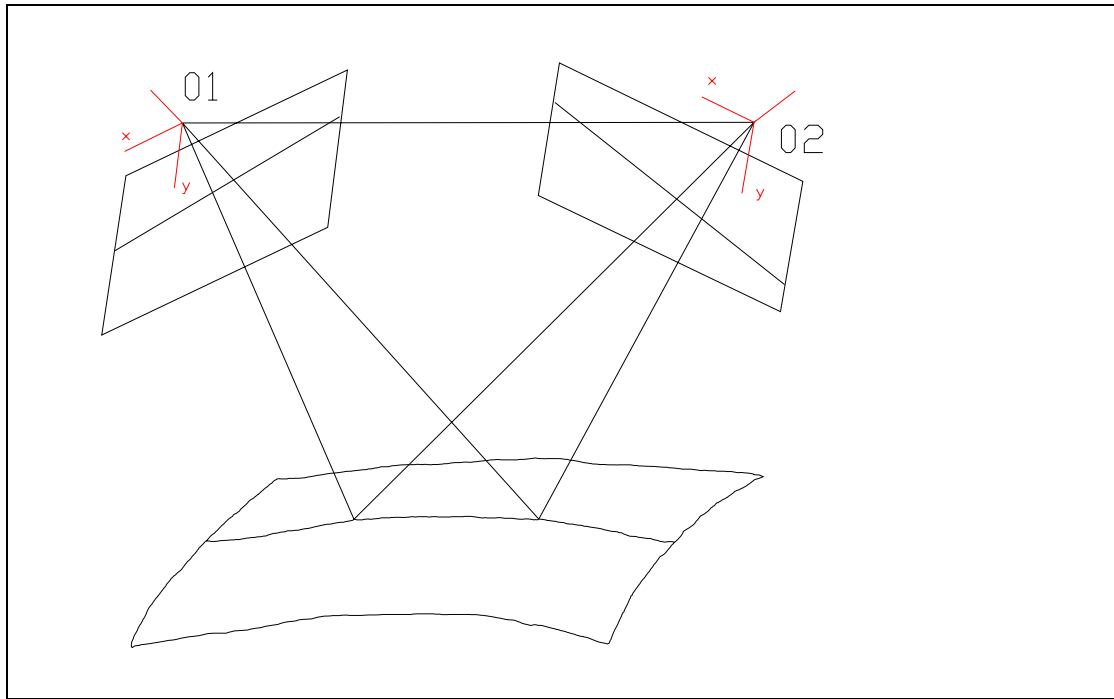
Σε κάθε περίπτωση όμως, με τη χρήση των επιπολικών εικόνων μειώνεται η περιοχή αναζήτησης και ο χρόνος εύρεσης του ομόλογου σημείου.

5.1 Επιπολική γεωμετρία στερεοζεύγους

Για την ανάλυση της επιπολικής γεωμετρίας είναι απαραίτητοι οι παρακάτω ορισμοί.

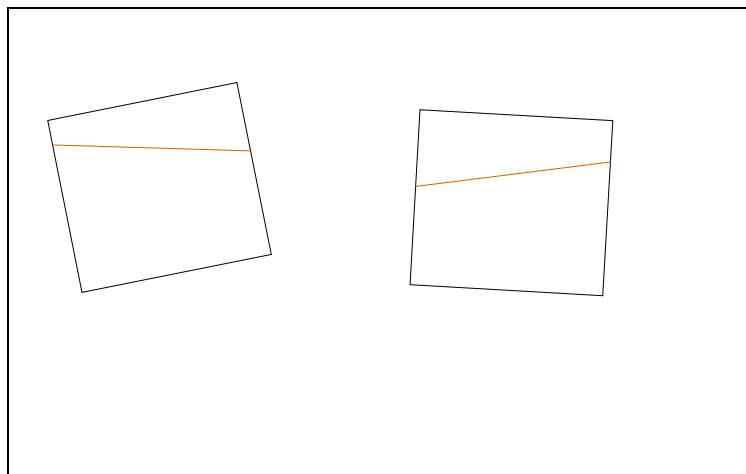
- Βάση στερεοζεύγους: η ευθεία του χώρου που συνδέει τα δύο προβολικά κέντρα.
- Επιπολικό επίπεδο: κάθε επίπεδο που περιέχει τη βάση του στερεοζεύγους.
- Επιπολική γραμμή: η τομή του επιπολικού επιπέδου με τα επίπεδα των εικόνων.
- Πόλοι: τα σημεία τομής των επιπολικών γραμμών ή, πράγμα ισοδύναμο, τα σημεία τομής της βάσης του ζεύγους με τα επίπεδα των εικόνων. Έτσι, σε κάθε στερεοζεύγος υπάρχουν δύο πόλοι, ένας σε κάθε εικόνα. Στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών οι πόλοι βρίσκονται πολύ έξω από τα όρια των εικόνων. Αυτό συμβαίνει σε όλα τα στερεοζεύγη που δεν έχουν πολύ μεγάλη σύγκλιση, δηλαδή πολύ μεγάλη σχετική γωνία φ , ή/και βάση με πολύ μεγάλη συνιστώσα B_z .

Κατά τη λήψη τα συστήματα αναφοράς των δύο εικόνων είναι σε τυχαία θέση ως προς τη βάση. Στην επόμενη Εικ. 19 φαίνεται η γενική περίπτωση της θέσης των δύο εικόνων. Όπως φαίνεται λοιπόν στην εικόνα, στη γενική περίπτωση λήψης οι άξονες του συστήματος κάθε εικόνας δεν είναι κάθετοι στη βάση του στερεοζεύγους. Αυτό σημαίνει ότι και οι ομόλογες επιπολικές γραμμές δεν είναι παράλληλες στο σύστημα αναφοράς της εικόνας, ενώ ακόμα οι επιπολικές γραμμές επίσης δεν είναι παράλληλες και μεταξύ τους. Αυτά είναι δυνατόν να συμβούν σε ειδικές περιπτώσεις γεωμετρίας του στερεοζεύγους.



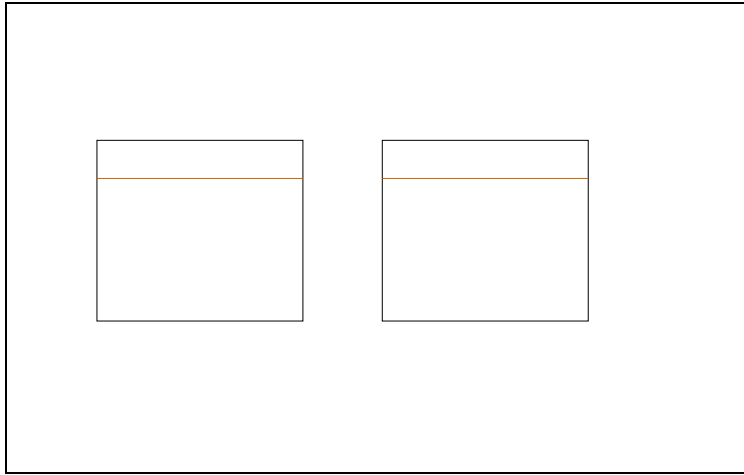
Εικόνα 19. Γενική περίπτωση γεωμετρίας στερεοζεύγους.

Ανάλογα με το σχετικό προσανατολισμό του στερεοζεύγους, οι επιπολικές γραμμές στις αρχικές εικόνες είναι πχ. όπως στην επόμενη Εικ. 20.



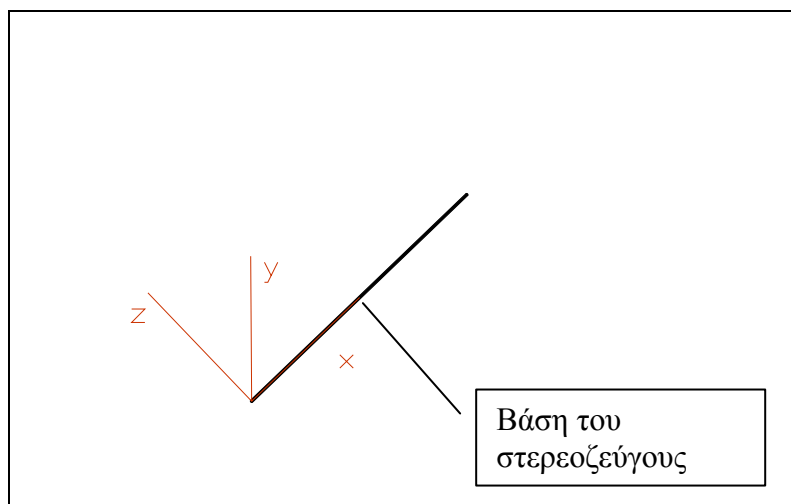
Εικόνα 20. Ομόλογες επιπολικές γραμμές στις αρχικές εικόνες.

Το ζητούμενο κατά τη διαδικασία της επιπολικής επανασύστασης είναι η κατασκευή εικόνων στις οποίες οι ομόλογες επιπολικές γραμμές θα είναι παράλληλες μεταξύ τους και θα συμπίπτουν με τις γραμμές της εικόνας (“κανονικοποίηση στερεοζεύγους”). Η θέση των επιπολικών γραμμών στις επιπολικές εικόνες θα είναι όπως φαίνεται στην Εικ. 21.



Εικόνα 21. Ομόλογες επιπολικές γραμμές στις επιπολικές εικόνες.

Για να επιτευχθεί η παραπάνω γεωμετρία απαιτείται ένας γεωμετρικός μετασχηματισμός των σημείων των δύο εικόνων, έτσι ώστε οι άξονες x των συστημάτων αναφοράς των δύο εικόνων να ταυτίζονται και να είναι παράλληλοι στη βάση του στερεοζεύγους ενώ οι άξονες y να είναι παράλληλοι μεταξύ τους, υλοποιώντας έτσι την κανονική περίπτωση του στερεοζεύγους στο σύστημα της βάσης.



Εικόνα 22. Σχέση συστήματος αναφοράς επιπολικής εικόνας και βάσης στερεοζεύγους

5.2 Μετασχηματισμός ζεύγους εικόνων σε επιπολικές

Για το επιπολικό μετασχηματισμό των εικόνων απαιτείται η γνώση των εξωτερικών προσανατολισμών τους ή η γνώση του σχετικού τους προσανατολισμού, που είναι ουσιαστικά ο “εξωτερικός προσανατολισμός” της δεξιάς εικόνας στο σύστημα της αριστερής.

Ο σχετικός προσανατολισμός στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε είναι γνωστός από τις προηγούμενες υπορουτίνες αυτόματου σχετικού προσανατολισμού του προγράμματος που αναφέρθηκαν. Στην περίπτωση αυτή οι εξωτερικοί προσανατολισμοί

των εικόνων είναι οι εξής:

Αριστερή εικόνα:

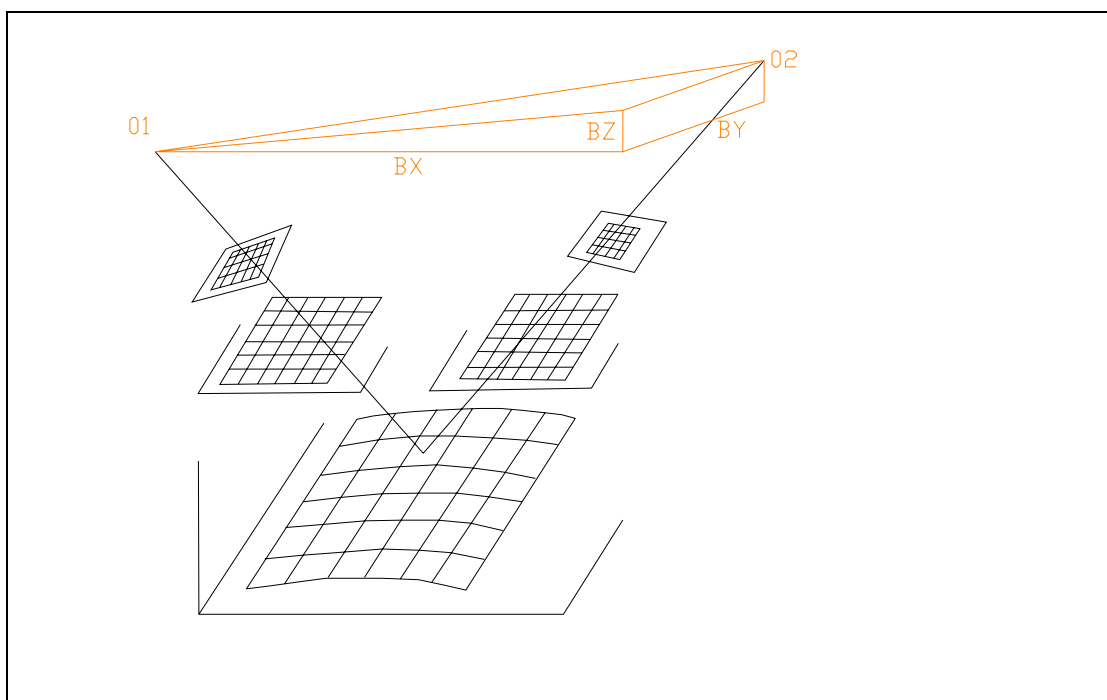
$$X_0 = 0 \quad Y_0 = 0 \quad Z_0 = 0 \quad \omega = 0 \quad \varphi = 0 \quad \kappa = 0$$

Δεξιά εικόνα:

$$X_0 = 1 \quad Y_0 = by \quad Z_0 = bz \quad \omega \quad \varphi \quad \kappa$$

όπου τα ω , φ , κ συμβολίζουν τις στροφές του σχετικού προσανατολισμού. Στην περίπτωση που οι προσανατολισμοί των εικόνων είναι γνωστοί σε κάποιο άλλο σύστημα συντεταγμένων πλην εκείνου της αριστερής εικόνας (πχ. το γεωδαιτικό σύστημα), η διαδικασία της επιπολικής επανασύστασης δε μεταβάλλεται.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 23) φαίνεται η γεωμετρία του επιπολικού ζεύγους.



Εικόνα 23. Γεωμετρία επιπολικού ζεύγους.

Η διαδικασία της επιπολικής επανασύστασης γίνεται σε δύο βήματα. Πρώτα οι συντεταγμένες των εικόνων μετασχηματίζονται έτσι ώστε να μην έχουν στροφές ως προς το σύστημα αναφοράς του εξωτερικού τους προσανατολισμού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του γνωστού από τον εξωτερικό προσανατολισμό πίνακα στροφής \mathbf{R} της κάθε εικόνας. Στην περίπτωση που είναι δεδομένος ο σχετικός προσανατολισμός τότε η πρώτη εικόνα είναι εξ αρχής αυστηρά κατακόρυφη με $\kappa = 0$ (ο πίνακας στροφών της είναι ο μοναδιαίος).

Οι κατακόρυφες όμως εικόνες δεν είναι ακόμα επιπολικές (κανονική περίπτωση στο σύστημα της βάσης) καθώς η βάση, γενικά, δεν είναι παράλληλη στην άξονα X του γεωδαιτικού συστήματος. Για να γίνουν επιπολικές, πρέπει οι δύο εικόνες να μετασχηματιστούν και μέσω του πίνακα στροφής που ορίζεται από την διεύθυνση της βάσης στο γεωδαιτικό σύστημα (ή στο σύστημα της αριστερής εικόνας στην περίπτωση του σχετικού προσανατολισμού). Αυτός ο πίνακας (\mathbf{Rb}) περιγράφει τη στροφή της

βάσης ως προς το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται. Ο αντίστροφός του περιγράφει τη στροφή που πρέπει να κάνει το χρησιμοποιούμενο σύστημα (σύστημα χώρου αν είναι γνωστοί οι εξωτερικοί προσανατολισμοί των εικόνων ή σύστημα της αριστερής εικόνας αν είναι γνωστός ο σχετικός προσανατολισμός των δύο εικόνων) ώστε οι άξονες των εικόνων να γίνουν κάθετες στη βάση. Αποτελεί συνεπώς ζητούμενο η εύρεση των στοιχείων του πίνακα στροφής της βάσης του στερεοζεύγους.

Από το σχήμα της Εικ. 23 μπορούν να εξαχθούν οι παρακάτω σχέσεις:

$$Bx = X_{02} - X_{01}$$

$$By = Y_{02} - Y_{01}$$

$$Bz = Z_{02} - Z_{01}$$

Από τα τρίγωνα του σχήματος μπορούν εν συνεχεία να εξαχθούν οι ακόλουθες τριγωνομετρικές σχέσεις:

$$\tan\varphi = \frac{Bz}{Bx} \quad \tan\kappa = \frac{By}{\sqrt{Bx^2 + Bz^2}}$$

και συνεπώς οι γωνίες φ_b και κ_b ορίζονται ως

$$\varphi_b = \arctan\left(\frac{Bz}{Bx}\right) \quad \text{και} \quad \kappa_b = \arctan\left(\frac{By}{\sqrt{Bx^2 + Bz^2}}\right).$$

Η γωνία που μένει να προσδιοριστεί είναι η γωνία ω_b της στροφής του συστήματος γύρω από τη βάση. Οποιαδήποτε και αν είναι η τιμή της γωνίας αυτής οι εικόνες εξακολουθούν να είναι επιπολικές. Είναι όμως σύνηθες να επιλέγεται η τιμή:

$$\omega_b = \frac{\omega_{\text{αριστερής_εικόνας}} + \omega_{\text{δεξιάς_εικόνας}}}{2}.$$

ώστε οι επιπολικές εικόνες να μην καταλάβουν μεγάλο όγκο και να μην αλλοιωθεί σημαντικά η προοπτική τους.

Μετά από τον προσδιορισμό των στροφών της βάσης, η συνολική της στροφή είναι το γινόμενο των τριών επί μέρους στροφών:

$$R_K = \begin{bmatrix} \cos \kappa_b & \sin \kappa_b & 0 \\ -\sin \kappa_b & \cos \kappa_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi_b & 0 & -\sin \varphi_b \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_b & 0 & \cos \varphi_b \end{bmatrix}$$

$$R_\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_b & \sin \omega_b \\ 0 & -\sin \omega_b & \cos \omega_b \end{bmatrix}$$

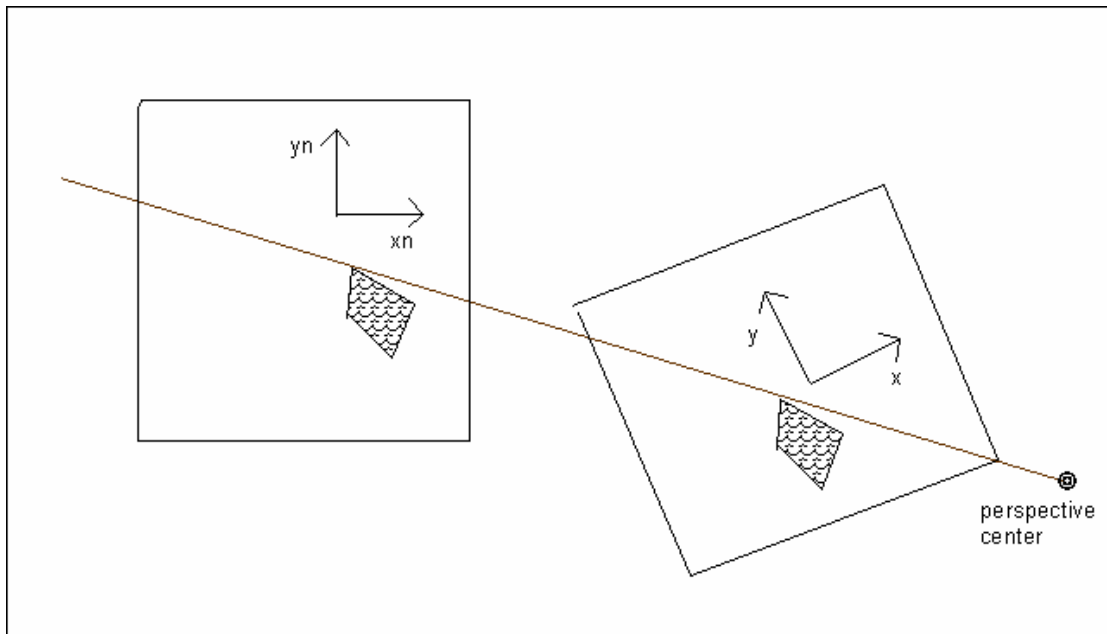
Τελικά, η συνολική στροφή της βάσης είναι

$$\mathbf{R}_b = \mathbf{R}_\Omega \mathbf{R}_\Phi \mathbf{R}_K$$

Ο πίνακας στροφής της βάσης είναι κοινός και για τις δύο εικόνες του στερεοζεύγους, ενώ ο πίνακας στροφής κάθε εικόνας για το μετασχηματισμό της σε κατακόρυφη είναι προφανώς διαφορετικός. Ορίζεται συνεπώς για κάθε εικόνα ο πίνακας “κανονικοποίησης” της \mathbf{R}_n ως το γινόμενο του πίνακα στροφής της βάσης με τον ανάστροφο του πίνακα στροφής της εικόνας:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_b \mathbf{R}^T$$

Γνωρίζοντας συνεπώς τον πίνακα κανονικοποίησης της εικόνας είναι δυνατός ο μετασχηματισμός των εικονοσυντεταγμένων, δηλαδή η εύρεση των εικονοσυντεταγμένων του ίδιου σημείου του χώρου στην επιπολικά μετασχηματισμένη εικόνα. Στο παρακάτω σχήμα της Εικ. 24 φαίνεται η γεωμετρία της μετάβασης των εικονοσυντεταγμένων από την αρχική εικόνα στην επιπολική για μια εικόνα του στερεοζεύγους.



Εικόνα 24. Εφαρμογή συνθήκης συγγραμμικότητας για την εύρεση των εικονοσυντεταγμένων του σημείου στην επιπολική εικόνα.

Υπάρχουν δύο ισοδύναμοι τρόποι για τη μετάβαση στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων των κανονικοποιημένων (επιπολικών) εικόνων. Ο πρώτος είναι μέσω της συνθήκης συγγραμμικότητας, ενώ ο δεύτερος είναι ένας προβολικός μετασχηματισμός. Εδώ χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη συγγραμμικότητας, οπότε και περιγράφεται διεξοδικά.

Έστω σημείο της αρχικής εικόνας με εικονοσυντεταγμένες x_a, y_a . Έστω επίσης ότι είναι γνωστή η σταθερά της μηχανής στην αρχική εικόνα c_a . Η αναλυτική έκφραση της συνθήκης είναι η παρακάτω.

$$x_n = -c_n \frac{r_{11}x_a + r_{12}y_a - r_{13}c_a}{r_{31}x_a + r_{32}y_a - r_{33}c_a}$$

$$y_n = -c_n \frac{r_{21}x_\alpha + r_{22}y_\alpha - r_{23}c_\alpha}{r_{31}x_\alpha + r_{32}y_\alpha - r_{33}c_\alpha}$$

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να εφαρμοστούν εφόσον επιλεγεί μια σταθερά φακού c_n για τις κανονικοποιημένες εικόνες (μπορεί να επιλεγεί και $c_n = c_a$, αλλά προτιμάται $c_n > c_a$ ώστε να μην υπάρχει απώλεια πληροφορίας). Βέβαια όσο μεγαλύτερη επιλέγεται η σταθερά του φακού των κανονικοποιημένων εικόνων τόσο μεγαλύτερων διαστάσεων θα είναι αυτές.

Η εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων οδηγεί στην εύρεση συντεταγμένων στην κανονικοποιημένη εικόνα για κάθε σημείο της αρχικής εικόνας. Το πρόβλημα όμως είναι η επανασύσταση μιας νέας εικόνας. Για την ανάπτυξη αλγορίθμου κατασκευής της επιπολικής εικόνας όταν είναι γνωστά τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της και ο πίνακας στροφής της βάσης πρέπει να γίνει αναφορά στους μετασχηματισμούς συντεταγμένων που απαιτούνται

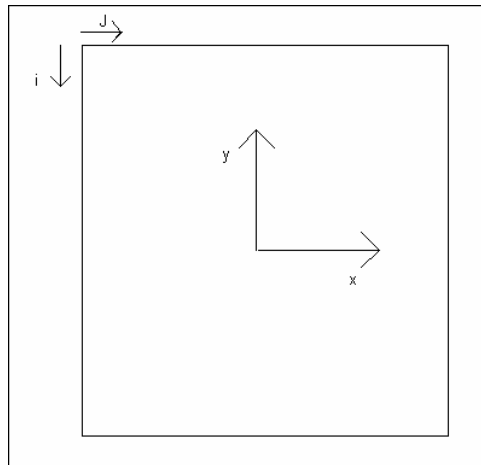
Έστω λοιπόν ζεύγος με γνωστά στοιχεία εξωτερικών προσανατολισμών των δύο εικόνων. Οι εικόνες μπορεί να είναι ψηφιακές ή να προέκυψαν από ψηφιοποίηση αναλογικών εικόνων. Για την παραγωγή επιπολικών εικόνων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα

Βήμα 1

Αντιμετωπίζεται αρχικά το πρόβλημα της μετάβασης από το σύστημα αναφοράς της εικόνας στο σύστημα αναφοράς των εικονοσυντεταγμένων. Στην περίπτωση των ψηφιακών εικόνων οι σχέσεις που ορίζουν την σχέση των συστημάτων είναι οι

$$x = j - j_0 \quad y = -i + i_0$$

όπου i_0, j_0 είναι οι εικονοσυντεταγμένες της αρχής του συστήματος των συντεταγμένων εικόνας.



Εικόνα 25. Μετασχηματισμός συστημάτων σε ψηφιακές εικόνες.

Στην περίπτωση των αναλογικών εικόνων η μετάβαση από το σύστημα των συντεταγμένων εικόνας στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο περί ψηφιακής εικόνας, είτε με τον κλασικό τρόπο του αφινικού μετασχηματισμού είτε με θεώρηση της εικόνας ως απευθείας ψηφιακής. Άρα τελικά διατίθενται οι εικονοσυντεταγμένες των εικονοψηφιδών της αρχικής εικόνας.

Βήμα 2

Εφαρμόζεται η συνθήκη συγγραμμικότητας για τη μετάβαση στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων της επιπολικής εικόνας. Οι εικονοσυντεταγμένες κάθε εικονοψηφίδας της αρχικής εικόνας ανάγονται στο πρωτεύον σημείο και διορθώνονται από αποκλίσεις δι' λόγω ακτινικής διαστρόφης με βάση το γνωστό πολυώνυμο της (στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται πολυώνυμο μέχρι 3^{ου} βαθμού για την ακτινική διαστρόφη):

$$\delta r = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5, \text{ όπου } r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

και

$$x = x - ((x - x_0) (k_1 r^2 + k_2 r^4)) \quad y = y - ((y - y_0) (k_1 r^2 + k_2 r^4))$$

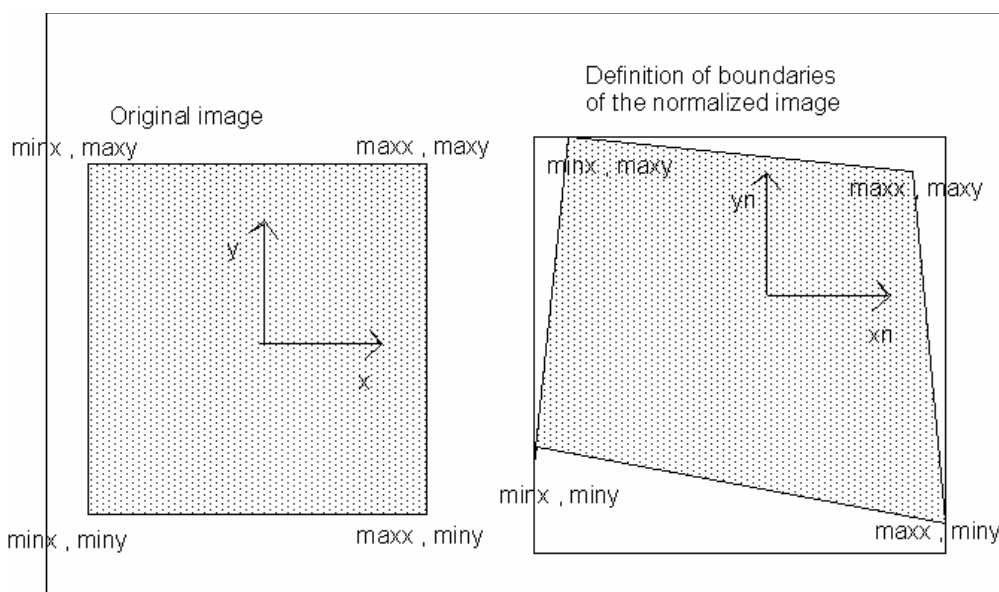
Ακολουθεί η αναγωγή στο πρωτεύον σημείο

$$x = x - x_0 \quad y = y - y_0$$

Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι εξισώσεις συγγραμμικότητας και υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες (x_n, y_n) του σημείου στην επιπολική εικόνα. Απαιτείται η επιλογή μιας τιμής για τη σταθερά του φακού των επιπολικών εικόνων (σε εικόνες μικρών κλίσεων δεν υπάρχει λόγος αυτή να είναι διαφορετική από τη σταθερά του φακού της αρχικής εικόνας):

$$x_n = -c_n \frac{r_{11}x_\alpha + r_{12}y_\alpha - r_{13}c_\alpha}{r_{31}x_\alpha + r_{32}y_\alpha - r_{33}c_\alpha} \quad y_n = -c_n \frac{r_{21}x_\alpha + r_{22}y_\alpha - r_{23}c_\alpha}{r_{31}x_\alpha + r_{32}y_\alpha - r_{33}c_\alpha}$$

Η διαδικασία αυτή αρχικά γίνεται για τα 4 ακραία σημεία της αρχικής εικόνας προκειμένου να οριστούν τα όρια της επιπολικής εικόνας, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Εικ. 26).



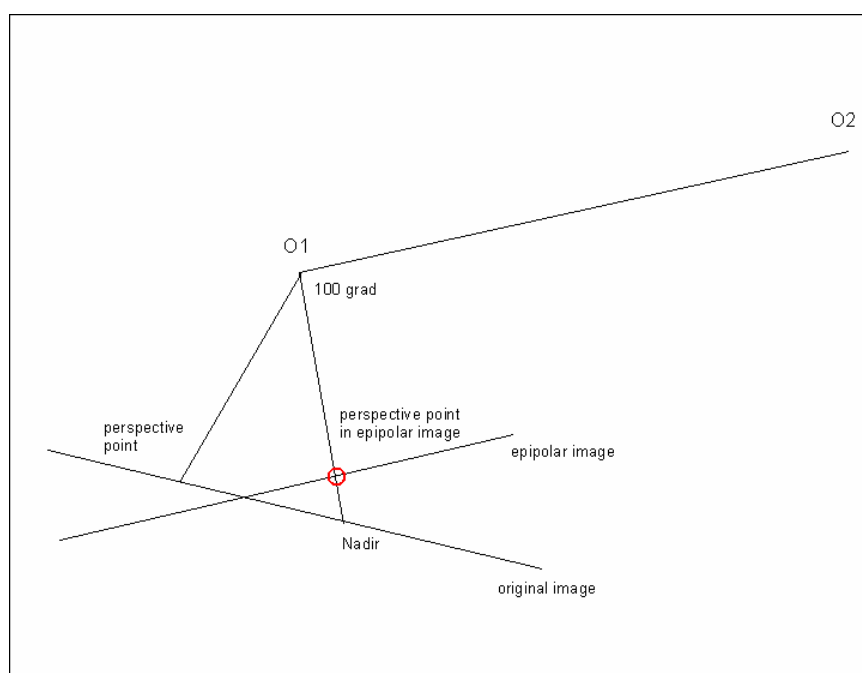
Εικόνα 26. Ορισμός ορίων στην επιπολική εικόνα.

Τα 4 ακραία σημεία της αρχικής εικόνας αντιστοιχούν στα 4 ακραία σημεία της επιπολικής εικόνας. Με βάση τα ακραία αυτά σημεία της επιπολικής εικόνας ορίζονται τα όριά της και οι διαστάσεις της στις μονάδες των εικονοσυντεταγμένων ως εξής: διάσταση κατά $x = \max x - \min x$, διάσταση κατά $y = \max y - \min y$.

Οι παραπάνω διαστάσεις είναι στις μονάδες των εικονοσυντεταγμένων, δηλαδή συνήθως σε mm. Για τον ορισμό των διαστάσεων μιας ψηφιακής εικόνας απαιτείται η θεώρηση μιας διάστασης της εικονοψηφίδας. Στην εργασία αυτή διατηρήθηκε η διάσταση της εικονοψηφίδας όμοια με εκείνη της αρχικής εικόνας. Άρα οι διαστάσεις της εικόνας είναι

αριθμός εικονοψηφίδων κατά $x = (\max x - \min x) \times \text{διάσταση εικονοψηφίδας}$
 αριθμός εικονοψηφίδων κατά $y = (\max y - \min y) \times \text{διάσταση εικονοψηφίδας}$

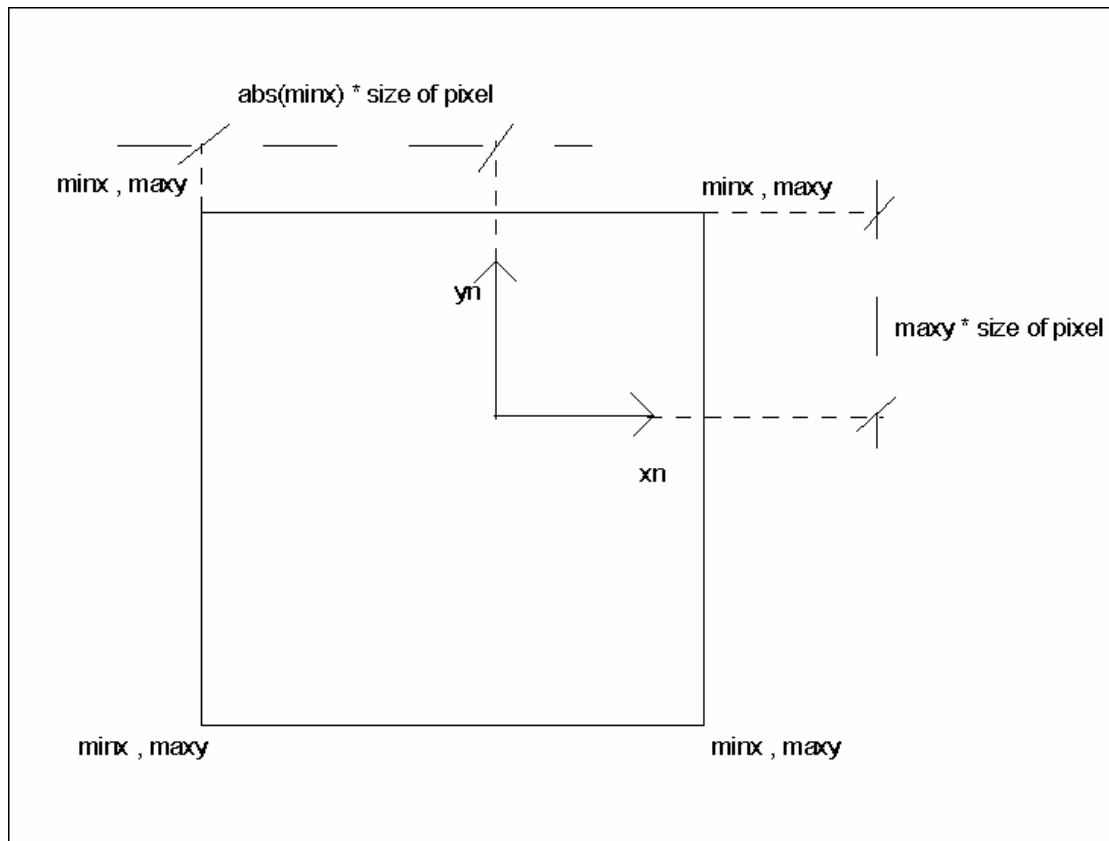
Το τελευταίο ζήτημα που μένει για τον γεωμετρικό ορισμό της επιπολικής εικόνας είναι η εύρεση της εικονοψηφίδας που αντιστοιχεί στο πρωτεύον σημείο της. Αυτή η εικονοψηφίδα αποτελεί την αρχή του συστήματος εικονοσυντεταγμένων της επιπολικής εικόνας (i_0, j_0). Το σημείο αυτό γεωμετρικά είναι η προβολή του ναδίρ της αρχικής εικόνας στο σύστημα της βάσης. Κάθε εικόνα με δεδομένο εξωτερικό προσανατολισμό σε ένα σύστημα αναφοράς έχει ένα σημείο ναδίρ στο σύστημα της βάσης. Η προβολή του ναδίρ που αντιστοιχεί στο σύστημα της βάσης είναι το πρωτεύον σημείο της επιπολικής εικόνας, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Εικ. 27).



Εικόνα 27. Ορισμός πρωτεύοντος σημείου στην επιπολική εικόνα.

Αυτό το σημείο έχει εικονοσυντεταγμένες $(0, 0)$ στο σύστημα της επιπολικής εικόνας. Απαιτείται η εύρεση των συντεταγμένων εικόνας (pixel) του σημείου αυτού. Όπως φαίνεται από το σχήμα που ακολουθεί (Εικ. 28), εάν οριστεί η διάσταση του pixel στην επιπολική εικόνα τότε το πρωτεύον σημείο $(0,0)$ έχει συντεταγμένες pixel:

απόλυτη τιμή του $\min x \times \text{μέγεθος εικονοψηφίδας}$
 $\max y \times \text{μέγεθος εικονοψηφίδας}$.



Εικόνα 28. Ορισμός πρωτεύοντος σημείου στην επιπολική εικόνα.

Εδώ τελειώνει η διαδικασία γεωμετρικού ορισμού της εικόνας. Το μόνο που μένει είναι η εύρεση της ραδιομετρίας της (επανασύσταση της εικόνας).

Βήμα 3

Για κάθε εικονοψηφίδα της επιπολικής εικόνας γίνεται ο μετασχηματισμός από το σύστημα των pixel στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων με βάση τις σχέσεις

$$x = (j - j_0) \times \text{μέγεθος εικονοψηφίδα}$$

$$y = (-i + i_0) \times \text{μέγεθος εικονοψηφίδα}$$

Βήμα 4

Για κάθε σημείο της επιπολικής εικόνας εφαρμόζονται οι αντίστροφες σχέσεις συγγραμμικότητας:

$$x_a = -c_a \frac{r_{11}x_n + r_{21}y_n - r_{31}c_n}{r_{13}x_n + r_{23}y_n - r_{33}c_n} \quad y_a = -c_a \frac{r_{12}x_n + r_{22}y_n - r_{32}c_n}{r_{13}x_n + r_{23}y_n - r_{33}c_n}$$

Συνεπώς για ένα τυχαίο σημείο της επιπολικής υπολογίζονται οι εικονοσυντεταγμένες στην αρχική εικόνα. Αυτές οι εικονοσυντεταγμένες θα πρέπει να “αλλοιωθούν” με τις επιδράσεις της ακτινικής διαστρόφης και να αναχθούν στο σημείο τομής των εικονοσημάτων (από το πρωτεύον σημείο που βρίσκονται).

$$x = x + ((x - x_0) (k_1 r^2 + k_2 r^4)) \quad y = y + ((y - y_0) (k_1 r^2 + k_2 r^4))$$

και για την αναγωγή στο σημείο τομής των εικονοσημάτων

$$x = x + x_0 \quad y = y + y_0$$

Ακολουθεί ο μετασχηματισμός από το σύστημα αναφοράς των εικονοσυντεταγμένων στο σύστημα αναφοράς της εικόνας. Εδώ διακρίνονται ξανά οι δύο δυνατότητες χειρισμού ψηφιοποιημένων αναλογικών εικόνων. Σε περίπτωση που η εικόνα αντιμετωπίζεται ως ψηφιακή είναι γνωστή η εικονοψηφίδα (i_0, j_0), οπότε ο μετασχηματισμός είναι ο παρακάτω:

$$i = i_0 - (y / \text{μέγεθος εικονοψηφίδας})$$

$$j = (x / \text{μέγεθος εικονοψηφίδας}) + j_0$$

Στην περίπτωση που ακολουθείται η κλασική αντιμετώπιση του αφινικού μετασχηματισμού εφαρμόζεται ο αντίστροφος αφινικός μετασχηματισμός.

Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες εικόνας (i, j) από τις παραπάνω σχέσεις, είναι δυνατή η εύρεση της ψηφιακής τιμής που αντιστοιχεί σε αυτές. Απαιτείται η επιλογή μιας μεθόδου παρεμβολής. Συνήθως επιλέγονται η διγραμμική (4 pixel) ή η δικυβική (16 pixel). Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται η διγραμμική παρεμβολή. Αυτή η τιμή γκρίζου αντιστοιχεί στην εικονοψηφίδα της επιπολικής εικόνας. Οπότε με αυτόν τον τρόπο συμπληρώνεται η ραδιομετρία της επιπολικής εικόνας.

5.3 Έλεγχος των επιπολικών εικόνων.

Ο έλεγχος της διαδικασίας δημιουργίας επιπολικών εικόνων μπορεί να γίνει σε δύο στάδια. Ένα με σκοπό να ελεγχθεί ο υπολογισμός των στοιχείων της γεωμετρίας του στερεοζεύγους (πίνακας στροφής \mathbf{R}) και ένα για τον τελικό έλεγχο των επιπολικών εικόνων (γεωμετρικό και ραδιομετρικό). Ο πρώτος γίνεται με έλεγχο των κατά y εικονοσυντεταγμένων ομόλογων σημείων στις επιπολικές εικόνες. Πρέπει:

$$y_{n_αριστερής_εικόνας} = y_{n_δεξιάς_εικόνας}$$

Εφόσον ισχύει η παραπάνω σχέση μπορεί να υποστηριχθεί με βεβαιότητα ότι οι γεωμετρικοί μετασχηματισμοί για τη μετάβαση από το σύστημα της εικόνας στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων στις αρχικές εικόνες, ο υπολογισμός των πινάκων στροφής \mathbf{R}_b , $\mathbf{R}_{n_αριστερής_εικόνας}$, $\mathbf{R}_{n_δεξιάς_εικόνας}$ και η εφαρμογή των εξισώσεων συγγραμμικότητας πραγματοποιήθηκαν σωστά.

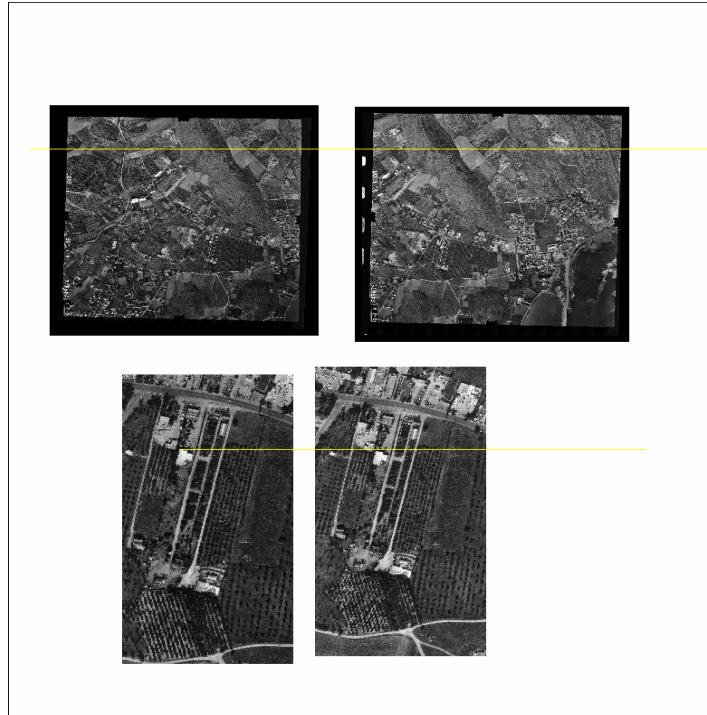
Το δεύτερο στάδιο ελέγχου των επιπολικών εικόνων γίνεται μετά το τέλος της όλης διαδικασίας και εφόσον έχουν παραχθεί οι επιπολικές εικόνες. Τότε τα ομόλογα σημεία οφείλουν να βρίσκονται στην ίδια ευθεία, όπως φαίνεται στην Εικ. 29.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο χρησιμοποίησης των επιπολικών εικόνων για την παραγωγή πυκνού ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

5.4 Εξωτερικός προσανατολισμός επιπολικών εικόνων

Η κατασκευή των επιπολικών εικόνων μπορεί να γίνει ανεξάρτητα από το σύστημα αναφοράς στο οποίο αναφέρονται οι εξωτερικοί προσανατολισμοί των εικόνων (σύστημα αριστερής εικόνας ή γεωδαιτικό). Ο εξωτερικός προσανατολισμός αναφέρεται στο σύστημα της βάσης. Είναι προφανές ότι

$$y_{αριστερής_εικόνας} = y_{δεξιάς_εικόνας}$$



Εικόνα 29. Έλεγχος επιπολικών εικόνων.

Η κατά x συνιστώσα του της βάσης επιλέγεται να είναι ίση με το μήκος της βάσης του στερεοζεύγους που είναι ίσο με

$$B = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} .$$

οπότε αποκαθίσταται η κλίμακα της απόδοσης. Στην περίπτωση που ο προσανατολισμός των εικόνων αναφέρεται στο σύστημα της αριστερής εικόνας (σύστημα μοντέλου), οι προσανατολισμοί των μετασχηματισμένων εικόνων είναι:

$$\begin{aligned} X_0^{\text{αριστερής}} &= 0 & X_0^{\text{δεξιάς}} &= \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \\ Y_0^{\text{αριστερής}} &= 0 & Y_0^{\text{δεξιάς}} &= 0 \\ Z_0^{\text{αριστερής}} &= 0 & Z_0^{\text{δεξιάς}} &= 0 \end{aligned}$$

Στην περίπτωση που ο εξωτερικός προσανατολισμός αναφέρεται στο γεωδαιτικό σύστημα, θα πρέπει η απόδοση να μετασχηματιστεί μέσω του πίνακα \mathbf{R}_b στροφής της βάσης. Στην αντίθετη περίπτωση σημειώνεται ότι και το νέφος σημείων που θα παραχθεί στη συνέχεια θα αναφέρεται στο σύστημα της βάσης.

Κεφάλαιο 6 - Αξιοποίηση αδρού DEM στην αναζήτηση ομόλογων σημείων

Στην κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος χρησιμοποίησης ενός δεδομένου ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (το οποίο εδώ έχει δημιουργηθεί αυτόματα κατά την διαδικασία σχετικού προσανατολισμού) στην πυκνή αναζήτηση σημείων του αντικειμένου. Κατ' αρχάς πρέπει να γίνει διάκριση ανάμεσα σε δύο περιπτώσεις γνώσης στοιχείων του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας. Η πρώτη περίπτωση αφορά τη γνώση μιας εξίσωσης της μορφής $z = f(x, y)$ που περιγράφει αδρά την προς ανακατασκευή επιφάνεια. Η δεύτερη και προφανώς συνηθέστερη περίπτωση προκύπτει όταν δεν είναι δυνατόν ο προσδιορισμός μιας εξίσωσης επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει στην τυπική παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους λόγω της πολυπλοκότητας του αναγλύφου. Περιγράφεται συνεπώς μόνο από ένα σύνολο σημείων, το οποίο συνήθως αποκαλείται νέφος σημείων (point cloud).

Το ζητούμενο είναι ο τρόπος χρησιμοποίησης του ψηφιακού μοντέλου της επιφάνειας στην συνταύτιση ομόλογων χαρακτηριστικών, τα οποία στην εργασία αυτή είναι σημεία της αριστερής εικόνας. Το DTM όμως είναι δυνατό να διευκολύνει τη διαδικασία της συνταύτισης και άλλων χαρακτηριστικών, όπως ακμών ή ομοιογενών περιοχών.

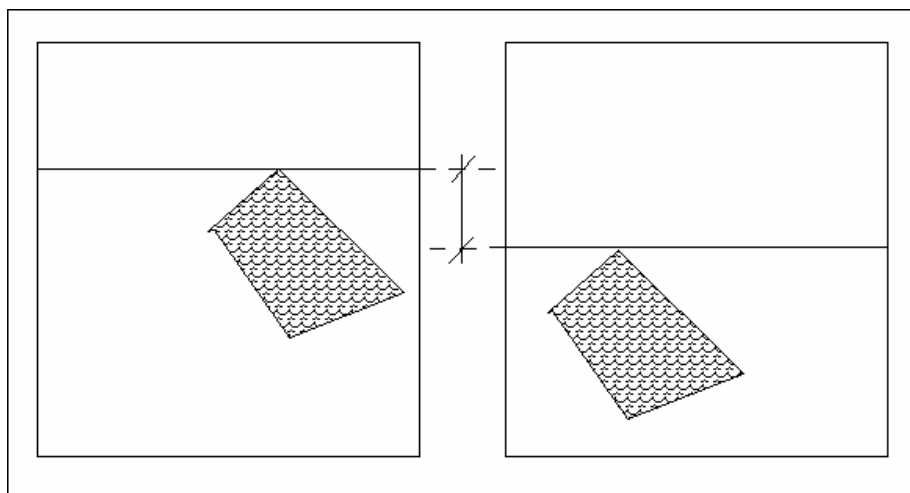
Για να πραγματοποιηθεί η συνταύτιση σημείων με χρήση του DTM αυτό πρέπει να είναι στο ίδιο σύστημα αναφοράς με τα στοιχεία προσανατολισμού των δύο εικόνων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο συστήματα αναφοράς. Το σύστημα της αριστερής εικόνας, όπου αναφέρεται το πρώτο αδρό ψηφιακό μοντέλο που έχει προέλθει από την φάση του σχετικού προσανατολισμού, και το σύστημα της βάσης στο οποίο γίνεται η πύκνωση του DTM με τη χρήση της επιπολικής γεωμετρίας. Στη φωτογραμμετρία το σύστημα αναφοράς του παραγόμενου μοντέλου του αντικειμένου ορίζεται από τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού. Στην περίπτωση όπου ως σύστημα αναφοράς του προσανατολισμού των δύο εικόνων χρησιμοποιείται το σύστημα της αριστερής εικόνας (περίπτωση σχετικού προσανατολισμού) στο ίδιο σύστημα θα αναφέρεται και το παραγόμενο DTM.

6.1 Η χρήση επιπολικών εικόνων

Στην περίπτωση χρήσης των επιπολικών εικόνων, ως σύστημα αναφοράς ορίζεται το σύστημα της βάσης. Σ' αυτό το σύστημα η αριστερή εικόνα έχει στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού $(0,0,0,0,0,0)$ και η δεξιά $(B,0,0,0,0,0)$, όπου ως B συμβολίζεται το μήκος της βάσης του στερεοζεύγους. Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης των επιπολικών εικόνων για την συνταύτιση ομόλογων σημείων και την πύκνωση του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Εδώ δίδονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό. Σημειώνεται ότι οι επιπολικές εικόνες είναι εικόνες “καθαρής κεντρικής προβολής”. Αυτό σημαίνει ότι οι εικονοσυντεταγμένες που μετρούνται στις εικόνες αυτές είναι απαλλαγμένες από τις παραμορφώσεις που οφείλονται στην ακτινική διαστρόφη και είναι ανηγμένες στο πρωτεύον σημείο.

Όπως προαναφέρθηκε, οι επιπολικές εικόνες είναι δύο εικόνες αποθηκευμένες σε κάποιο format (στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε μορφή .tif). Οι ομόλογες γραμμές βρίσκονται σε μια σταθερή μετατόπιση (shift), οπότε για τη μετάβαση από τη μια επιπολική γραμμή της αριστερής εικόνας στην ομόλογή της στη δεξιά εικόνα απαιτείται μόνο μια μετάθεση. Αυτή η διαφορά στην πρώτη συντεταγμένη εικόνας (i) οφείλεται στο ότι οι δύο κανονικοποιημένες εικόνες δεν έχουν ίδιες διαστάσεις (αρι-

θμός εικονομηφίδων στις δύο διευθύνσεις). Οι κατά y παραλλάξεις των εικονομηφίδων είναι βέβαια μηδενικές. Η μετάθεση (*shift*) των ομόλογων επιπολικών γραμμών υπολογίζεται από τη διαφορά των γραμμών στις οποίες βρίσκονται τα δύο πρωτεύοντα σημεία στις δύο επιπολικές εικόνες (Εικ. 30).



Εικόνα 30. Ομόλογες επιπολικές γραμμές.

Τα δύο πρωτεύοντα σημεία οφείλουν να βρίσκονται σε ομόλογες επιπολικές γραμμές (σημειώνεται βέβαια ότι τα σημεία αυτά δεν είναι ομόλογα σημεία):

$$shift = i_{\text{πρωτεύοντος_σημείου_δεξιάς_εικόνας}} - i_{\text{πρωτεύοντος_σημείου_αριστερής_εικόνας}}$$

Συνεπώς για ένα επιλεγμένο σημείο στην αριστερή επιπολική εικόνα ορίζεται η

$$i_{\text{ομόλογου_σημείου}} = shift + i_{\text{πρωτεύοντος_σημείου_αριστερής_εικόνας}}$$

Το πρόβλημα της συνταύτισης απλοποιείται καθώς το ομόλογο σημείο, εφόσον υπάρχει στη δεύτερη εικόνα και δεν ανήκει σε κάποια αποκρυβόμενη περιοχή, βρίσκεται πάνω στην επιπολική γραμμή. Η θέση του κατά μήκος της επιπολικής γραμμής καθορίζεται από το υψόμετρο του σημείου. Το ζήτημα συνεπώς ανάγεται στον προσδιορισμό ενός διαστήματος επί της επιπολικής γραμμής μέσα στο οποίο βρίσκεται το προς αναζήτηση σημείο. Παρακάτω αναφέρονται δύο προσεγγίσεις για τη λύση αυτού του προβλήματος.

Η μία χρησιμοποιεί τη μέγιστη διαφορά κατά x παράλλαξη για τον προσδιορισμό του διαστήματος αναζήτησης. Η δεύτερη, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιεί τη μέθοδο του *monoplotting* για την εύρεση του υψομέτρου του σημείου και την αντίστροφη φωτογραμμετρία για τον προσδιορισμό του διαστήματος αναζήτησης.

6.2 Διάστημα αναζήτησης βάσει της μέγιστης διαφοράς κατά x παράλλαξη

Έστω ζεύγος επιπολικών εικόνων. Η μέση παράλλαξη του μπορεί να προσδιοριστεί από τη βάση του (στην κλίμακα της εικόνας). Από τη γνωστή αυτή παράλλαξη p_x εί-

ναι δυνατός ο αρχικός εντοπισμός της περιοχής της επιπολικής γραμμής όπου αναμένεται να βρίσκεται το ομόλογο σημείο.

$$x' = x - p_x$$

Το σημείο (x', y) είναι το κέντρο του μεγάλου παραθύρου στη μέθοδο του συντελεστή συσχέτισης. Υπενθυμίζεται ότι το παράθυρο αυτό έχει διαστάσεις 1 γραμμή \times n στηλές, όπου n ο αριθμός των στηλών στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η αναζήτηση. Ο προσδιορισμός του αριθμού n των στηλών είναι το ζητούμενο στις δύο μεθοδολογίες που αναπτύσσονται. Είναι σαφές ότι το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τις αναμενόμενες υψομετρικές διαφορές στην περιοχή του εδάφους που αντιστοιχεί στο επιλεγμένο σημείο της αριστερής εικόνας. Η εκτίμηση της αναμενόμενης υψομετρικής διαφοράς αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα στην εκτίμηση του n . Για να αποφύγουμε την περίπτωση το ομόλογο σημείο να βρίσκεται έξω από τον αριθμό των στηλών αναζήτησης n επιλέγεται η μέγιστη αναμενόμενη υψομετρική διαφορά. Έστω ότι αυτή είναι ίση με Δh . Τότε η μέγιστη διαφορά κατά x παράλλαξης υπολογίζεται ως

$$\Delta p = \frac{b}{H} \Delta h$$

όπου H είναι το μέσο ύψος πτήσης (η μέση απόσταση προβολικού κέντρου – αντικειμένου) και b είναι το μέγεθος της βάσης στην μέση κλίμακα της εικόνας. Το ομόλογο σημείο συνεπώς βρίσκεται στο διάστημα

$$x - b - \Delta p < x' < x - b + \Delta p$$

$$x - \frac{b(H + \Delta h)}{H} < x' < x + \frac{b(H + \Delta h)}{H}$$

Το διάστημα αυτό πρέπει να μετατραπεί σε μονάδες εικονοψηφίδων. Για το λόγο αυτό απαιτείται η γνώση του μεγέθους του pixel. Άρα

$$\left(x - \frac{b(H + \Delta h)}{H}\right) \times \text{μέγεθος_pixel} < x' < \left(x + \frac{b(H + \Delta h)}{H}\right) \times \text{μέγεθος_pixel}$$

Το ζήτημα που παραμένει είναι η εύρεση της μέγιστης αναμενόμενης υψομετρικής διαφοράς Δh . Στην ευνοϊκότερη περίπτωση η διαφορά αυτή προσδιορίζεται από ένα υπάρχον αδρό ψηφιακό μοντέλο αντικειμένου – εδάφους. Συνήθως αυτό είναι το ψηφιακό μοντέλο του προηγούμενου επιπέδου της πυραμίδας. Συνεπώς θα πρέπει για ένα επιλεγμένο σημείο στην αριστερή εικόνα να βρεθεί αυτή η υψομετρική διαφορά με παρεμβολή στο DTM. Αυτό μπορεί να γίνει με μια από τις μεθόδους monoploting.

6.3 Η μέθοδος Monoploting

Η μέθοδος αυτή είναι μια μονοεικονική φωτογραμμετρική τεχνική που επιτρέπει την απόδοση αντικειμένων όταν είναι γνωστή η γεωμετρία του αντικειμένου και ο εξωτερικός προσανατολισμός της εικόνας. Η γεωμετρία του αντικειμένου μπορεί να περιγράφεται είτε από μια μαθηματική συνάρτηση είτε να προϋπάρχει ένα ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι η εξής. Για ένα δεδομένο σημείο στην εικόνα (μετρημένες εικονοσυντεταγμένες) αναζητούνται οι συντεταγμένες του στο αντικείμενο με βάση το ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου. Ζητούμενο συνεπώς είναι η εύρεση των συντεταγμένων ενός σημείου γνωστών εικονοσυντεταγμένων. Αυτή τη λειτουργία επιτελούν οι αλγόριθμοι αναζήτησης. Υπάρχουν τρεις τέτοιοι αλγόριθμοι αναζήτησης: ο αλγόριθμος μεταβλητού υψομέτρου, ο αλγόριθμος των λωρίδων και ο αλγόριθμος της προβολικής αναζήτησης (Γραμματικόπουλος, 1999). Στην εφαρμογή της εργασίας αυτής, που υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα PHOTOMATCH, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος του μεταβλητού υψομέτρου, που περιγράφεται παρακάτω.

Αλγόριθμος μεταβλητού υψομέτρου

Το ζήτημα είναι η εύρεση για δεδομένο σημείο της εικόνας x, y (δηλαδή για μια επιλεγμένη εικονοψηφίδα) των συντεταγμένων αντικειμένου του σημείου. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής. Για ένα αρχικά εκτιμώμενο υψόμετρο Z του σημείου (το οποίο δεν απαιτείται να είναι ακριβές) υπολογίζονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες X, Y του σημείου από τη συνθήκη συγγραμμικότητας:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{(x - x_0)R_{11} + (y - y_0)R_{21} - cR_{31}}{(x - x_0)R_{13} + (y - y_0)R_{23} - cR_{33}}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{(x - x_0)R_{11} + (y - y_0)R_{21} - cR_{31}}{(x - x_0)R_{13} + (y - y_0)R_{23} - cR_{33}}$$

(είναι σαφές ότι οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να εφαρμοστούν εφόσον είναι γνωστός ο εξωτερικός προσανατολισμός της εικόνας και ο εσωτερικός προσανατολισμός της μηχανής). Με τις συντεταγμένες αυτές γίνεται παρεμβολή στο ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας, δηλαδή παρεμβάλλεται το υψόμετρο Z στη θέση X, Y , και εφαρμόζονται ξανά οι προηγούμενες σχέσεις. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν η διόρθωση της τιμής Z είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο όριο. Με το τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας προκύπτουν οι συντεταγμένες του σημείου. Η σύγκλιση της παραπάνω διαδικασίας δίδει ως αποτέλεσμα την τομή στο χώρο της ευθείας που ορίζεται από τις εξισώσεις συγγραμμικότητας (προβολική ακτίνα) με την επιφάνεια που περιγράφεται από το DTM.

6.4 Προσδιορισμός διαστήματος αναζήτησης με αντίστροφη φωτογραμμετρία

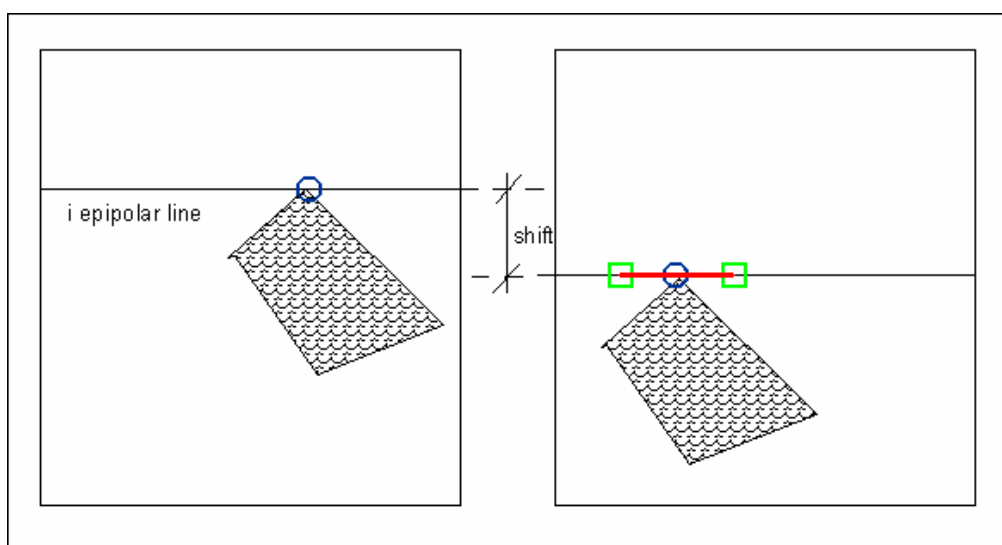
Με τον όρο αντίστροφη φωτογραμμετρία περιγράφεται γενικά η διαδικασία κατά την οποία γνωστά σημεία του χώρου μεταφέρονται σε μια εικόνα δεδομένου προσανατολισμού. Υπολογίζονται με άλλα λόγια οι εικόνες των σημείων του αντικειμένου στην εικόνα. Για να γίνει αυτό πρέπει ο εξωτερικός προσανατολισμός της εικόνας να είναι στο ίδιο σύστημα αναφοράς με εκείνο του αντικειμένου. Οι εικονοσυντεταγμένες υπολογίζονται με την συνθήκη συγγραμμικότητας. Σημειώνεται ότι στις παραπάνω σχέσεις δεν υπάρχουν οι παράμετροι x_0 και y_0 καθώς, όπως αναφέρθηκε, οι επιπολικές εικόνες είναι εικόνες “καθαρής κεντρικής προβολής”.

Στο πρόγραμμα που συντάχθηκε σε περιβάλλον Matlab υιοθετήθηκε αναλυτικά η ακόλουθη μεθοδολογία για τη χρησιμοποίηση του DTM για την ανίχνευση ομόλογων σημείων.

Μετά από την επιλογή της εικονοψηφίδας στην αριστερή εικόνα εφαρμόζεται η διαδικασία monoplotting του μεταβλητού υψομέτρου με σκοπό την εύρεση του σημείου τομής του αντικειμένου με την ακτίνα της συνθήκης συγγραμμικότητας. Με το πέρας αυτής της διαδικασίας προκύπτουν οι συντεταγμένες X, Y, Z της επιλεγείσας εικονοψηφίδας.

Το σημείο του αντικειμένου που αντιστοιχεί στις συντεταγμένες αυτές μπορεί πλέον να προβληθεί στη δεξιά εικόνα σύμφωνα με τις σχέσεις της αντίστροφης φωτογραμμετρίας.

Το σημείο αυτό είναι προφανώς δεσμευμένο από τα στοιχεία του προσανατολισμού της δεξιάς επιπολικής εικόνας να κείται πάνω στην ομόλογη επιπολική γραμμή. Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Εικ. 31), ένα επιλεγμένο σημείο στην επιπολική γραμμή i της αριστερής εικόνας μετά τη διαδικασία του monoplotting και την εύρεση των συντεταγμένων εδάφους δίδει ένα σημείο στη δεξιά εικόνα (μπλέ σημείο) το οποίο είναι στην ομόλογη επιπολική γραμμή.



Εικόνα 31. Ορισμός περιοχής αναζήτησης στην ομόλογη επιπολική γραμμή της δεύτερης εικόνας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαδικασία του monoplotting δίδει ακριβή αποτελέσματα εφόσον το δεδομένο ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας είναι ακριβές και πλήρες. Εφόσον δεν συμβαίνει αυτό, το σημείο που “ανεβαίνει” στη δεξιά εικόνα δεν είναι το ομόλογο αυτού της αριστερής. Το ζήτημα συνεπώς είναι η εύρεση της περιοχής αναζήτησης πάνω στην επιπολική γραμμή.

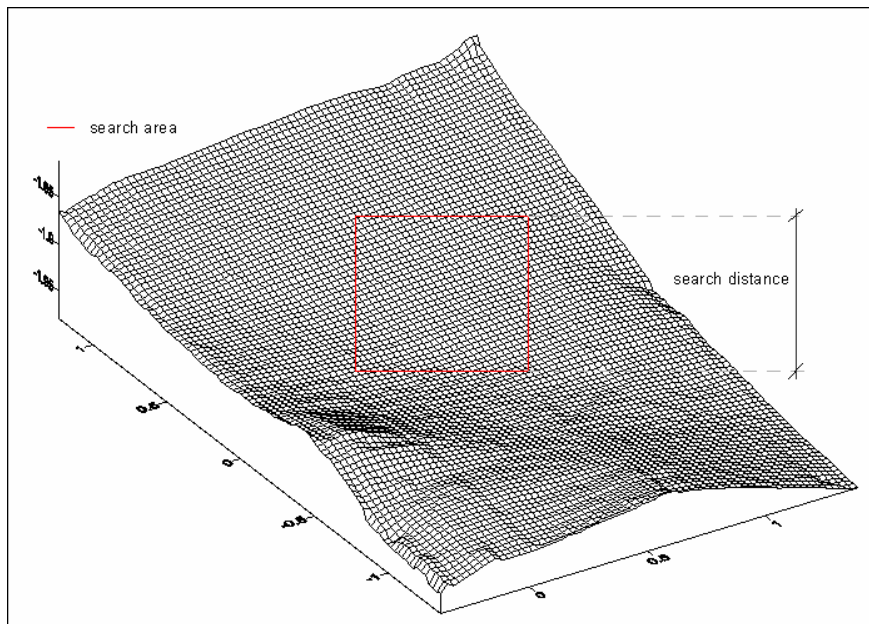
Έστω A το σημείο του εδάφους που υπολογίζεται από το monoplotting. Μεταβάλλοντας το υψόμετρο του υπολογισμένου από το monoplotting σημείου κατά τιμή ΔZ και εφαρμόζοντας monoplotting για την εύρεση των νέων οριζοντιογραφικών συντεταγμένων X, Y υπολογίζονται οι συντεταγμένες ενός άλλου σημείου του αντικειμένου, έστω B . Το σημείο αυτό είναι σε διαφορετική οριζοντιογραφική θέση από το A , αντιστοιχεί όμως στις ίδιες εικονοσυντεταγμένες της αριστερής εικόνας. Το σημείο B βέβαια δεσμεύεται να είναι πάνω στην ομόλογη της i επιπολικής γραμμής στη δεξιά εικόνα, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Για τον ορισμό της περιοχής αναζήτησης (κόκκινη περιοχή στο σχήμα) απαιτείται η εύρεση δύο τέτοιων σημείων. Είναι λογικό να επιλέγονται τα σημεία που δίνουν τη μέγιστη υψομετρική διαφορά ΔZ , ώστε με μεγάλο βαθμό βεβαιότητας να

αναμένεται ότι το ομόλογο σημείο ανήκει στην περιοχή αυτή.

Εύρεση της διαφοράς υψομέτρου ΔZ

Για τον ορισμό της διαφοράς αυτής χρησιμοποιείται το δεδομένο αδρό ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας. Με βάση τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του σημείου A θεωρείται τετράγωνο με κάποια διάσταση (το ζήτημα της επιλογής της διάστασης θα αναλυθεί παρακάτω). Στην Εικ. 32 φαίνεται η επιλεγείσα περιοχή. Σε αυτή την περιοχή αναζητούνται τα σημεία με το ελάχιστο και το μέγιστο υψόμετρο.



Εικόνα 32. Ορισμός περιοχής αναζήτησης υψομέτρων.

Αυτά τα σημεία θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της διακύμανσης του υψομέτρου ΔZ . Αναλυτικά προκύπτει από την εξής σχέση

$$\Delta Z = \text{μέγιστο υψόμετρο} - \text{ελάχιστο υψόμετρο}$$

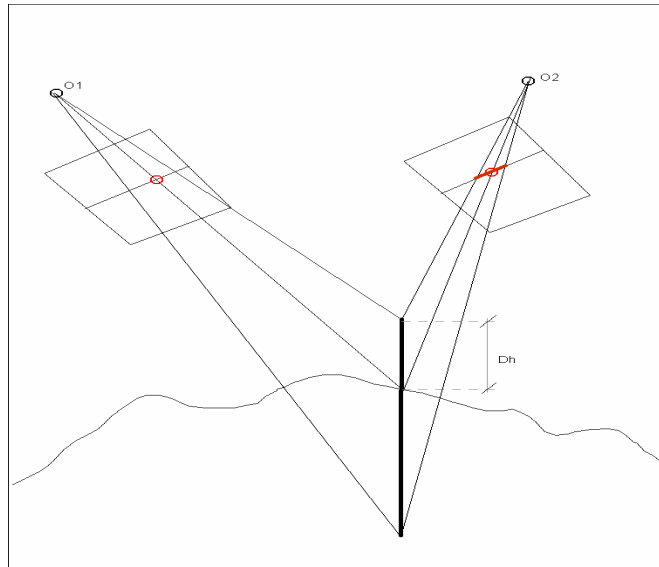
Στη συνέχεια τα δύο αυτά σημεία προβάλλονται στη δεξιά εικόνα και προκύπτει το διάστημα αναζήτησης του ομόλογου σημείου.

Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι αν με τη μεταβολή του υψομέτρου κατά ΔZ παραμείνουν αναλλοίωτες οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες X, Y (δεν εφαρμοστεί εκ νέου η συνθήκη συγγραμμικότητας που δεσμεύει το επιλεγμένο σημείο της αριστερής εικόνας) τότε προκύπτει ζεύγος ομόλογων σημείων στις δύο επιπολικές εικόνες διαφορετικό από το ζητούμενο, όπως φαίνεται στην Εικ. 33.

Το ζήτημα που μένει για τον ορισμό των τριών σημείων στην ομόλογη επιπολική γραμμή είναι ο μετασχηματισμός των εικονοσυντεταγμένων σε συντεταγμένες pixel, με γνωστή την εικονοψηφίδα της αρχής του συστήματος της δεύτερης εικόνας (i_0, j_0) και το μέγεθος του pixel. Αυτός ο μετασχηματισμός υλοποιείται ως εξής:

$$i = i_0 - \left(\frac{y}{\text{μέγεθος_εικονοψηφίδας}} \right)$$

$$j = \left(\frac{x}{\text{μέγεθος_εικονοψηφίδας}} \right) + j_0$$



Εικόνα 33. Λανθασμένη εκτίμηση περιοχής αναζήτησης.

Αυτό γίνεται και για τα τρία σημεία του εδάφους που ορίζουν την περιοχή αναζήτησης του ομόλογου σημείου.

Σημειώνεται, αν και δεν πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες δοκιμές στην εργασία αυτή, ότι στη βιβλιογραφία αναφέρονται μια σειρά από τεχνικές μοντελοποίησης του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας για τη χρησιμοποίησή του στη διαδικασία της συνταύτισης. Αυτές χρησιμοποιούν διάφορα γεωμετρικά μοντέλα της επιφάνειας του αντικειμένου, όπως οριζόντιο ή κεκλιμένο επίπεδο, κατά τμήματα ομαλές επιφάνειες, επιφάνειες με ασυνέχειες κλίσης ή και ακόμα συνθετότερες μαθηματικά επιφάνειες όπως αυτές που παράγονται με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός αυτών των γεωμετρικών μοντέλων είναι ο υπολογισμός μιας τιμής υψομέτρου για κάθε εδαφοψηφίδα (groundel) της εικόνας, προκειμένου με την επιλογή μιας εικονοψηφίδας στην αριστερή εικόνα να υπάρχει άμεση πληροφορία για το υψόμετρο του σημείου, οπότε να είναι δυνατή η εύρεση των συντεταγμένων αντικειμένου από τις εξισώσεις συγγραμμικότητας.

Επιλογή της διάστασης του τετραγώνου αναζήτησης

Η επιλογή της διάστασης του τετραγώνου αναζήτησης είναι μια από τις κρίσιμότερες παραμέτρους της εξεταζόμενης μεθοδολογίας. Αρχικά πρέπει να εξηγηθεί γιατί επιλέγεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή υψομέτρου στην οριζόμενη περιοχή. Αυτές οι τιμές δίνουν το μεγαλύτερο εύρος αναζήτησης στην ομόλογη επιπολική γραμμή, έτσι ώστε το ομόλογο σημείο να βρίσκεται με μεγάλο επίπεδο εμπιστοσύνης στο διάστημα αυτό.

Είναι εύκολο να κατανοηθεί ότι το διάστημα αναζήτησης υψομέτρων στο ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας εξαρτάται από την πυκνότητα του μοντέλου και την αξιοπιστία του. Όπως εξηγείται και στα συμπεράσματα της εργασίας, η αξιοπιστία του ψηφιακού μοντέλου που χρησιμοποιείται ως 'πλοηγός' στην αναζήτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Είναι σαφές όμως ότι δεν μπορεί να υπάρξει κάποια αξιολόγηση του μοντέλου πέραν την οπτικής. Ένας ακόμα παράγοντας που καθορίζει τη διάσταση είναι η κατανομή των σημείων του ψηφιακού μοντέλου, με την έννοια πως δεν πρέπει να υπάρχει περίπτωση να μην διατίθενται αρκετά σημεία οπότε δεν μπορεί να οριστεί η υψομετρική διαφορά ΔZ .

Στους παραπάνω παράγοντες πρέπει να προστεθεί και η διάκριση ανάμεσα στο σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου και το γεωδαιτικό σύστημα. Το πρόγραμμα ζητεί από τον χρήστη μια απόλυτη τιμή της διάστασης του τετραγώνου αναζήτησης. Ο ορισμός της είναι διαισθητικά εύκολος (πχ. 20 m σε πραγματικές διαστάσεις στην περίπτωση των κλιμάκων της εργασίας) όταν το σύστημα αναφοράς του μοντέλου είναι το γεωδαιτικό πράγμα, που σημαίνει ότι η κλίμακα είναι η πραγματική. Στην περίπτωση που το σύστημα αναφοράς είναι το σύστημα του μοντέλου, τότε ο ορισμός της διάστασης μπορεί να γίνει με τη θεώρηση των μέγιστων και ελάχιστων οριζοντιογραφικών συντεταγμένων του ψηφιακού μοντέλου και την επιλογή ενός ποσοστού της συνολικής διάστασης του μοντέλου.

6.5 Προσδιορισμός διαστήματος γραμμών στην αναζήτηση ομολογίας

Η παραπάνω ανάλυση της θεώρησης του εύρους της περιοχής αναζήτησης κατά μήκος μόνο μιας επιπολικής γραμμής αποτελεί στην ουσία μια θεωρητική εξιδανίκευση. Αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου τα σφάλματα των στροφών (ω , ϕ , κ) του σχετικού προσανατολισμού είναι μηδενικά. Στις πραγματικές εφαρμογές ο ορισμός του διαστήματος αναζήτησης κατά y γίνεται με τον εξής τρόπο (Πέτσα, 2000).

Η θεώρηση αυτή στηρίζεται στους πίνακες μικρών στροφών, όπου γίνεται η παραδοχή πως $\cos \omega \approx 1$, $\sin \omega \approx \omega$

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta\omega \\ 0 & -\Delta\omega & 1 \end{bmatrix} \quad R_{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \Delta\phi & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_{\kappa} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa & 0 \\ -\Delta\kappa & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω γωνιακά μεγέθη είναι εκφρασμένα σε φυσικές μοναδες γωνιών (rad). Οι διαφορικές γωνίες $d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$, που εδώ ουσιαστικά είναι τα σφάλματα των γωνιακών μεγεθών του σχετικού προσανατολισμού, δημιουργούν σφάλματα στη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων που δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- κατά x

$$dx = -ydk \quad dx = -c\left(1 + \frac{x^2}{c^2}\right)d\phi \quad dx = \frac{xy}{c}d\omega$$

Η συνολική επίδραση των σφαλμάτων των στροφών είναι

$$dx = \sqrt{dx(k)^2 + dx(\phi)^2 + dx(\omega)^2}$$

- κατά y

$$dy = xdk \quad dy = -\frac{xy}{c}d\phi \quad dy = c\left(1 + \frac{y^2}{c^2}\right)d\omega$$

και η συνολική επίδραση είναι

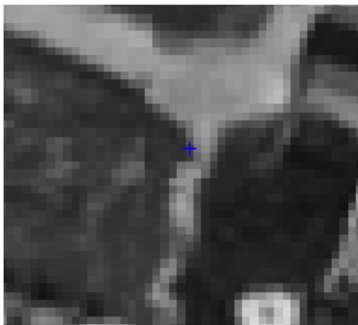

$$dy = \sqrt{dy(k)^2 + dy(\phi)^2 + dy(\omega)^2}$$

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της αβεβαιότητας των παραμέτρων που προέκυψαν από τον αυτόματο σχετικό προσανατολισμό, όπως έγινε εδώ, μια ρεαλιστική κατά y διάσταση του παραθύρου αναζήτησης εκατέρωθεν της επιπολικής ευθείας για καλύτερες πιθανότητες καλής συνταύτισης.

Κεφάλαιο 7 - Παραγωγή “πυκνού” ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Η παραγωγή πυκνού ψηφιακού μοντέλου εδάφους βασίζεται στην εκμετάλλευση δύο δυνατοτήτων. Πρώτον, της δυνατότητας που προσφέρουν οι επιπολικές εικόνες στην αναζήτηση ομόλογων σημείων. Δεύτερον, της δυνατότητας που δίνει η ύπαρξη ενός αδρότερου ψηφιακού μοντέλου στον ορισμό της περιοχής αναζήτησης του ομόλογου σημείου.

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο περί επιπολικών εικόνων, η αναζήτηση του ομόλογου σημείου γίνεται σε μικρό αριθμό γραμμών (συνήθως 3 γραμμές). Το εύρος στηλών καθορίζεται από τον τρόπο εκτίμησης της μέγιστης και ελάχιστης τιμής υψομέτρου του σημείου. Ο τρόπος αυτός εκτίμησης περιγράφηκε στο Κεφάλαιο περί της χρησιμότητας του ψηφιακού μοντέλου στην αναζήτηση ομόλογων σημείων. Η Εικ. 34 δίνει μια εικόνα με την εκτίμηση της περιοχής αναζήτησης.

Αριστερή επιπολική εικόνα	Δεξιά επιπολική εικόνα
	
	

Εικόνα 34. Αναπαράσταση ορισμού της περιοχής αναζήτησης του ομόλογου σημείου.

7.1 Αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Το πρώτο ψηφιακό μοντέλο εδάφους που θα “οδηγεί” τη διαδικασία της εύρεσης των ομόλογων σημείων μπορεί να προκύψει με δύο τρόπους.

1^{ος} τρόπος: Μετασχηματίζοντας τα σημεία του ψηφιακού μοντέλου που προέκυψαν από τις ομολογίες του σχετικού προσανατολισμού από το σύστημα της αριστερής εικόνας στο σύστημα της βάσης. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ορίσουν περιοχές αναζήτησης όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

2^{ος} τρόπος: Εφαρμόζοντας τη διαδικασία της ψηφιακής συνταύτισης πάνω στην επιπολική γραμμή χωρίς τη βοήθεια δεδομένου ψηφιακού μοντέλου σε χαρακτηριστικά σημεία Harris. Αυτό γίνεται στις περιπτώσεις που τα σημεία του σχετικού προσανατολισμού δεν έχουν κατάλληλη κατανομή στο στερεοζεύγος. Ο τρόπος αυτός μειονεκτεί σε σύγκριση με τον προηγούμενο καθώς είναι δυνατό να περιέχει λανθασμένες συνταύτισεις, πράγμα που οδηγεί σε λανθασμένο ψηφιακό μοντέλο. Με τη σειρά του αυτό το λανθασμένο μοντέλο “οδηγεί” κατά τη χρησιμοποίησή του στη συνταύτιση σε μεγαλύτερη περιοχή αναζήτησης (αφού η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή υψομέτρου καθορίζονται από αυτό) δυσκολεύοντας τη διαδικασία της συνταύτισης.

Σημειώνεται ότι ένα σωστό ψηφιακό μοντέλο μειώνει σημαντικά όχι μόνο το διάστημα αναζήτησης (σε αριθμό στηλών επί της επιπολικής γραμμής) αλλά και την περίπτωση συνταύτισης σε λάθος σημείο καθώς μειώνοντας το διάστημα αναζήτησης μειώνεται και η πιθανότητα εύρεσης ενός επαναλαμβανόμενου προτύπου. Ο εντοπισμός ενός μικρού εύρους αναζήτησης είναι ιδιαίτερα σημαντικός αφού η αναζήτηση ομολογιών σε σημεία με χαμηλή αυτοσυσχέτιση (λιγότερο διακριτά) απαιτεί τη συνταύτιση λιγότερο “σπάνιων” προτύπων στις εικόνες. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά σημεία που εξάγονται με τον τελεστή Harris με όριο αυτοσυσχέτισης 20000 είναι πολύ πιο διακριτά και δημιουργούν γύρω τους πιο “σπάνια” πρότυπα απ’ ό,τι τα σημεία που εξάγονται με όριο 1000.

7.2 Διαδικασία που ακολουθείται στην παρούσα εφαρμογή

Αφού υπάρχει ένα πρώτο αδρό ψηφιακό μοντέλο, εξάγονται χαρακτηριστικά σημεία (Harris) με χαμηλότερο όριο αυτοσυσχέτισης και ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6. Μετά την εξαγωγή των ομόλογων σημείων γίνεται εμπροσθοτομία για την εξαγωγή των συντεταγμένων χώρου. Αυτό το μοντέλο χαρακτηρίζεται ως δεύτερο επίπεδο ψηφιακού μοντέλου. Στη συνέχεια το νέο αυτό ψηφιακό μοντέλο χρησιμοποιείται ως μοντέλο-οδηγός για την πύκνωση του μοντέλου. Γίνεται εκ νέου εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων με χαμηλότερο όριο αυτοσυσχέτισης και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Αυτό γίνεται για έναν αριθμό επαναλήψεων. Για παράδειγμα, στο στερεομοντέλο της Κέας η πύκνωση έγινε σταδιακά σε 7 επίπεδα.

Επίπεδο ψηφιακού μοντέλου	Αριθμός σημείων
Επίπεδο 1	1007
Επίπεδο 2	1489
Επίπεδο 3	2249
Επίπεδο 4	4414
Επίπεδο 5	4414

Επίπεδο 6	7412
Επίπεδο 7	14325

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, το επίπεδο 4 με το επίπεδο 5 έχουν ίδιο αριθμό σημείων. Αυτό συμβαίνει διότι έγινε προσπάθεια να γίνει πύκνωση με τον ίδιο αριθμό χαρακτηριστικών σημείων αλλά με πυκνότερο ψηφιακό μοντέλο–οδηγό. Από το παραπάνω αποτέλεσμα αλλά και από άλλες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι με τη χρησιμοποίηση ίδιου αριθμού χαρακτηριστικών σημείων δεν γίνεται σημαντική πύκνωση του μοντέλου. Αναφέρεται όμως ότι το παραπάνω αποτέλεσμα δε σημαίνει ότι πάντοτε η πύκνωση είναι μηδενική.

Επιλογή ορίου αυτοσυσχέτισης για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων Harris

Ο αριθμός των χαρακτηριστικών σημείων που θα εξαχθούν με τον τελεστή Harris για δεδομένη ελάχιστη τιμή αυτοσυσχέτισης δεν είναι βέβαια προσδιορίσιμος εκ των προτέρων, καθώς εξαρτάται από την υφή της εικόνας. Επιπλέον δεν μπορεί να γίνει πρόβλεψη για την κατανομή των χαρακτηριστικών σημείων, καθώς μια περιοχή με έντονη υφή θα συγκεντρώσει περισσότερα σημεία απ' ό,τι μια αντίστοιχων διαστάσεων με μικρή υφή.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι δεν είναι δυνατό να βγουν σαφή συμπεράσματα για τυπικές τιμές του ορίου αυτοσυσχέτισης. Ενδεικτικά και μόνο αναφέρεται ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τιμές μεταξύ 20000 και 1000 για την πύκνωση του ψηφιακού μοντέλου.

7.3 Έλεγχος και διόρθωση των ψηφιακών μοντέλων ανά επίπεδο

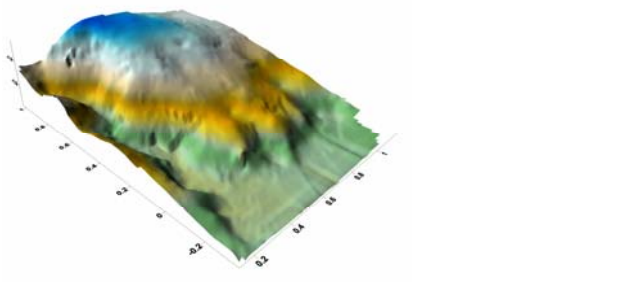
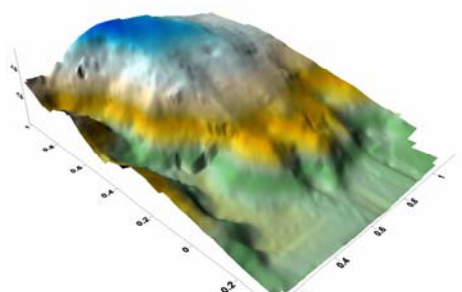
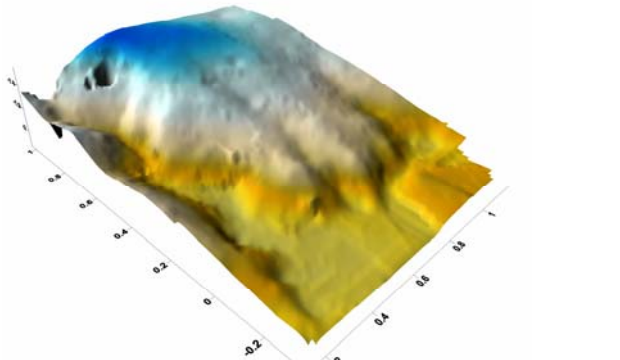
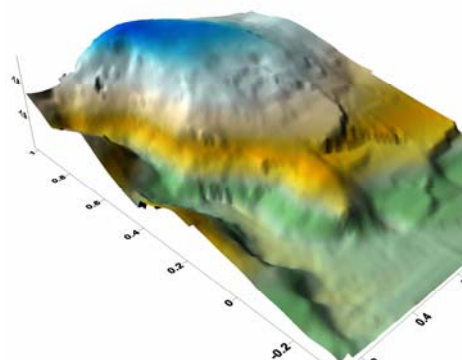
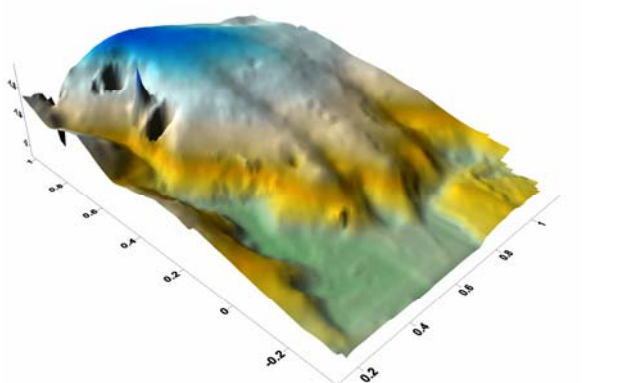
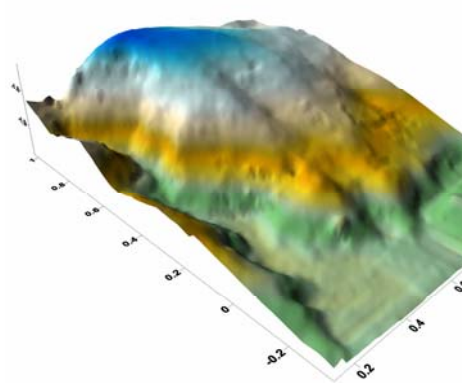
Όπως αναφέρθηκε, ένας από τους κρισιμότερους παράγοντες για την επιτυχή πύκνωση του μοντέλου είναι η ορθότητα του μοντέλου–οδηγού. Είναι προφανές όμως ότι λόγω της έλλειψης κάποιου μαθηματικού μοντέλου το οποίο πρέπει να ικανοποιούν τα σημεία του ψηφιακού μοντέλου δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός τους σε αποδεκτές τιμές και χονδροειδή σφάλματα. Για το λόγο αυτό απαιτείται η διατύπωση ενός αλγορίθμου που θα αφαιρεί από το ψηφιακό μοντέλο εκείνα τα σημεία που παρουσιάζουν σημαντική και απότομη μεταβολή του υψομέτρου (spikes). Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στην εφαρμογή είναι ο εξής.

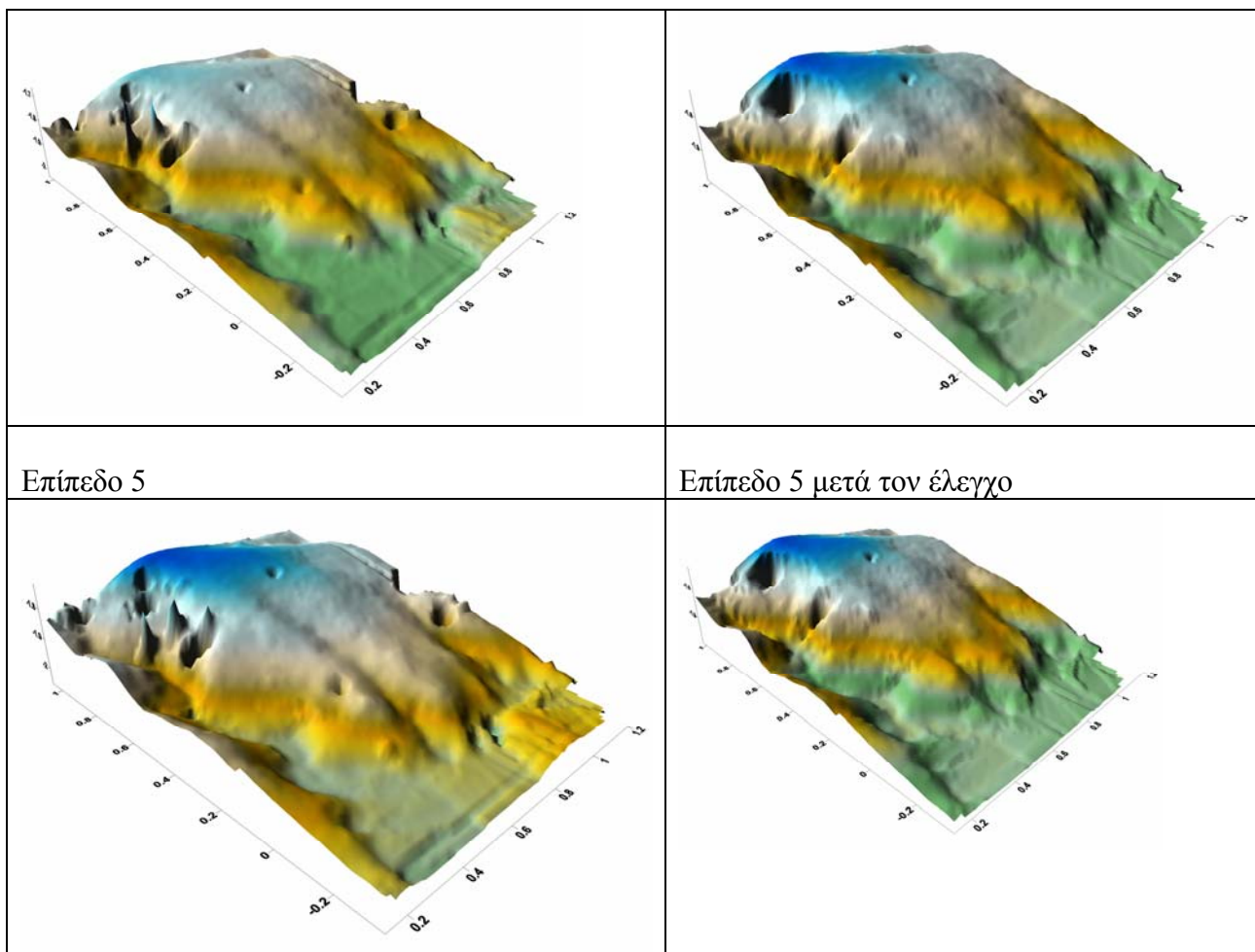
Ελέγχεται κάθε σημείο του μοντέλου με τα γειτονικά του με τον εξής τρόπο. Περί το ελεγχόμενο σημείο και σε μια ακτίνα οριζόμενη από το χρήστη υπολογίζονται τα στατιστικά στοιχεία του μοντέλου μέση τιμή (μ) και τυπική απόκλιση (σ). Στη συνέχεια υπολογίζεται το υπολειπόμενο σφάλμα του σημείου από τη μέση τιμή. Αν είναι μεγαλύτερο από 3σ τότε το σημείο θεωρείται χονδροειδές σφάλμα και αφαιρείται από το μοντέλο.

Αναλυτικά, ο αλγόριθμος είναι ο εξής:

- 1) Για κάθε σημείο του ελεγχόμενου ψηφιακού μοντέλου ανοίγει κύκλος μιας δεδομένης ακτίνας γύρω του. Ορίζονται τα σημεία που βρίσκονται μέσα σε αυτόν.
- 2) Υπολογίζεται η μέση τιμή (μ) και η τυπική απόκλιση (σ) των υψομέτρων των σημείων αυτών.
- 3) Υπολογίζεται η ποσότητα $d = \text{υψόμετρο_σημείου} - \mu$
- 4) Αν $|d| < 3\sigma$ τότε το σημείο παραμένει στο ψηφιακό μοντέλο. Αν όχι, αφαιρείται.
- 5) Μετά από τον έλεγχο όλων των σημείων αποθηκεύεται το νέο ψηφιακό μοντέλο.

6) Επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία έως ότου όλα τα σημεία είναι αποδεκτά.
 Παρακάτω φαίνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου στο στερεομοντέλο της Κέας.

<p>Επίπεδο 1</p> 	<p>Επίπεδο 1 μετά τον έλεγχο</p> 
<p>Επίπεδο 2</p> 	<p>Επίπεδο 2 μετά τον έλεγχο</p> 
<p>Επίπεδο 3</p> 	<p>Επίπεδο 3 μετά τον έλεγχο</p> 
<p>Επίπεδο 4</p>	<p>Επίπεδο 4 μετά τον έλεγχο</p>



Το αποτέλεσμα είναι βέβαια διαφορετικό με διαφορετική επιλογή της ακτίνας.

7.4 Χρησιμοποίηση των εικόνων μεγάλης ανάλυσης

Η περιγραφή της κατασκευής του ψηφιακού μοντέλου μόνο με χαρακτηριστικά σημεία αφορά τις εικόνες χαμηλής ανάλυσης (400 dpi στο στερεοζεύγος του Βόλου και 550 dpi στο στερεοζεύγος της Κέας). Η μείωση της χωρικής ανάλυσης των εικόνων ήταν μια αναγκαιότητα λόγω της αδυναμίας του προγραμματιστικού πακέτου που χρησιμοποιήθηκε (Matlab) να διαχειρίζεται μεγάλες εικόνες. Το τελικό ψηφιακό μοντέλο από την παραπάνω διαδικασία, εκτός του ότι από μόνο του αποτελεί ένα τελικό προϊόν, χρησιμοποιείται και σαν μοντέλο-οδηγός στη συνταύτιση μικρότερων τμημάτων των αρχικών εικόνων. Για τη λεπτομερή απόδοση των τμημάτων αυτών χρησιμοποιούνται δύο μεθοδολογίες.

Πρώτα, εξάγονται χαρακτηριστικά σημεία (σημεία Harris) στην αριστερή εικόνα, τα οποία ταυτίζονται με την ίδια διαδικασία. Σημειώνεται ότι για την ίδια περιοχή στις εικόνες μεγάλης ανάλυσης προκύπτει διαφορετικός αριθμός σημείων Harris. Με τα σημεία αυτά δημιουργείται ένα πρώτο λεπτομερές ψηφιακό μοντέλο μόνο της περιοχής του τμήματος. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται ως οδηγός για το τελικό μοντέλο του τμήματος. Το ζήτημα που ανακύπτει είναι με ποιο τρόπο θα εξαχθεί το πυκνότερο δυνατό ψηφιακό μοντέλο. Μια λογική απάντηση είναι η προσπάθεια συν-

ταύτισης ανά εικονοψηφίδα της αριστερής εικόνας. Προκύπτει όμως το πρόβλημα ότι δεν μπορούν όλα τα pixel να ορίσουν γύρω τους ένα “σταθερό” πρότυπο. Για παράδειγμα, οι εικονοψηφίδες που βρίσκονται εντός μιας ομοιογενούς περιοχής (πχ. πλακοσκεπή) δεν μπορούν να σχηματίσουν πρότυπο διότι δεν έχουν επαρκή υφή. Επιπλέον, αν επιχειρηθεί η αναζήτηση ομόλογου σημείου είναι μεγάλη η πιθανότητα το σημείο που θα βρεθεί ως ομόλογο στη δεξιά εικόνα να μην είναι σωστό καίτοι ο συντελεστής συσχέτισης λαμβάνει μεγάλη τιμή. Συνεπώς πρέπει να οριστεί ένας τρόπος επιλογής των εικονοψηφίδων της αριστερής εικόνας που δημιουργούν πρότυπο.

7.5 Εντροπία εικόνας

Η εντροπία είναι γενικά ένα μέτρο της “τυχειότητας” κάποιων παρατηρήσεων. Στην περίπτωση των εικόνων είναι μια κλίμακα μέτρησης της τυχειότητας των ψηφιακών τιμών των εικονοψηφίδων. Μαθηματικά ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Εντροπία} = - \sum_{i=1}^{256} p \log_2(p), \text{ εφόσον το ψηφιακό σύστημα είναι 8 bit}$$

p είναι η πιθανότητα εμφάνισης της τιμής i στη εικόνα

$$p = \frac{\text{αριθμός_pixel_με_ψηφιακή_τιμή_i}}{\text{συνολικός_αριθμός_pixel_στην_εικόνα}}$$

Η εντροπία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, 8]$. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εντροπίας τόσο πιο ισχυρό πρότυπο σχηματίζεται. Το ζήτημα που παραμένει είναι ο ορισμός ενός ορίου πάνω από το οποίο θεωρείται ότι είναι αρκετή η υφή προκειμένου να γίνει συνταύτιση. Στην εφαρμογή χρησιμοποιείται όριο ίσο με 4. Το όριο αυτό συνήθως είναι στο διάστημα 3 έως 4.5 (Σκαρλάτος, 2005).

Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ είναι η εξής. Για κάθε pixel της αριστερής εικόνας και σε ένα παράθυρο 9×9 υπολογίζεται η τιμή της εντροπίας. Αν η τιμή είναι πάνω από 4, τότε το πρότυπο 9×9 επιλέγεται προς συνταύτιση.

Κεφάλαιο 8 – Εφαρμογές

8.1 Γενικά

Για τον έλεγχο της μεθοδολογίας αλλά και του προγράμματος που συντάχθηκε, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δύο στερεομοντέλα. Το πρώτο απεικονίζει μια ημισφαιρική περιοχή χωρίς έντονο ανάγλυφο, ενώ το δεύτερο μια ιδιαίτερα βραχώδη περιοχή με μεγάλες κλίσεις (και άρα εκτροπές λόγω αναγλύφου). Για κάθε στερεομοντέλο έγιναν οι εξής δοκιμές:

- Αυτόματος σχετικός προσανατολισμός
- Κατασκευή επιπολικών εικόνων
- Αυτόματη κατασκευή ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Για τον πλήρη έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα αναφοράς που παράχθηκαν σε φωτογραμμετρικούς σταθμούς μέσω αυτοματοποιημένων μεθόδων. Τα λογισμικά αυτά είναι το MATCH-T για το πρώτο στερεομοντέλο και το LPS για το δεύτερο. Τα μοντέλα που παρήχθησαν από αυτά θεωρήθηκαν “απολύτως” σωστά και χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων σχετικών με την ποιότητα των αποτελεσμάτων της εργασίας.

8.2 Μεθοδολογία ελέγχου της αξιοπιστίας του ψηφιακού μοντέλου

Το μέτρο αξιολόγησης της ακρίβειας του μοντέλου που παράχθηκε από το πρόγραμμα είναι η μέση τετραγωνική απόκλιση (RMS) του ψηφιακού μοντέλου που παρήχθη εδώ από το μοντέλο αναφοράς:

$$RMS = \sqrt{\frac{(Z_i - Z_{ref})^2}{n}}$$

όπου Z_i είναι το υψόμετρο του προς έλεγχο ψηφιακού μοντέλου και Z_{ref} είναι το υψόμετρο του μοντέλου αναφοράς.

Αυτό το στατιστικό μέτρο είναι ένα μέτρο ένδειξης για την ομοιότητα των δύο μοντέλων. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του τόσο πιο όμοια είναι τα δύο μοντέλα. Το

μέσο τετραγωνικό σφάλμα περιλαμβάνει τόσο τα τυχαία όσο και πιθανά συστηματικά σφάλματα.

Για να εφαρμοστεί η σχέση αυτή θα πρέπει τα δύο μοντέλα να περιλαμβάνουν σημεία που αναφέρονται στις ίδιες οριζοντιογραφικές συντεταγμένες. Γι' αυτόν το λόγο, πριν από την εφαρμογή κατασκευάζεται ένα αρχείο τετραγωνικού κάναβου για κάθε ψηφιακό μοντέλο. Έτσι τα μοντέλα μπορούν να αφαιρεθούν και να υπολογιστεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα τους. Είναι προφανές ότι τόσο τα ψηφιακά μοντέλα από τους φωτογραμμετρικούς σταθμούς όσο και τα μοντέλα της παρούσας εργασίας δεν είναι σε τετραγωνικό κάναβο. Συνεπώς, για την απόκτηση ενός τέτοιου μοντέλου απαιτείται η εφαρμογή μιας μεθόδου παρεμβολής. Τέτοια μέθοδος είναι για παράδειγμα η μέθοδος Kriging. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν όλα τα σημεία του ψηφιακού μοντέλου σε μια ακτίνα περί το σημείο. Αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση ύπαρξης ενός χονδρεοειδούς σφάλματος επηρεάζεται όχι μόνο μια κορυφή του κανάβου αλλά μια ολόκληρη περιοχή γύρω από αυτό αυξάνοντας την τιμή του RMS .

Εκτός από το παραπάνω στατιστικό μέτρο, δίδονται και στοιχεία για την κατανομή των υψομετρικών διαφορών. Συγκεκριμένα, δίδεται το ποσοστό των σημείων που είναι κάτω από τα μέτρα σ , 3σ , 4σ , 5σ , 6σ (όπου σ είναι ένα εκτιμώμενο ανεκτό σφάλμα) και το ποσοστό των σημείων που παρουσιάζουν διαφορές $> 10\sigma$. Το ανεκτό σφάλμα σ εκτιμήθηκε εδώ ως εξής.

Για την πυκνή συλλογή σημείων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης και όχι η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση. Ο λόγος είναι ότι ο όγκος των σημείων ήταν τόσο μεγάλος που ήταν αδύνατον να ανταποκριθεί το περιβάλλον προγραμματισμού σε χρόνους επεξεργασίας στοιχειωδώς λογικούς. Η ακρίβεια της μεθόδου θεωρείται ίση με 1 εικονοψηφίδα. Άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι το αναμενόμενο σφάλμα σ_p παράλλαξης της αυτόματης μεθόδου της παρούσας εργασίας είναι ίσο με 1 εικονοψηφίδα:

$$\sigma_p = 1 \text{ pixel.}$$

Το σφάλμα προσδιορισμού των υψομέτρων ενός μοντέλου είναι:

$$\sigma_z = k \frac{H}{B} \sigma_p$$

όπου	k	ο μέσος συντελεστής κλίμακας του στερεομοντέλου
	H	το μέσο ύψος πτήσης
	B	η βάση του στερεομοντέλου
	σ_p	το σφάλμα της παράλλαξης

Η μέση κλίμακα του μοντέλου είναι γνωστή, ενώ το μέσο ύψος πτήσης υπολογίζεται ως $H = kc$. Η βάση του στερεοζεύγους υπολογίζεται από την κλίμακα και την επικάλυψη, και το σφάλμα της παράλλαξης από τη διάσταση της εικονοψηφίδας. Για την αυτόματη παραγωγή ψηφιακού μοντέλου με τα εμπορικά λογισμικά (όπου δεν έγινε καμία διόρθωση) εκτιμήθηκε σφάλμα παράλλαξης $\sigma_p = 0.5 \text{ pixel}$.

Το σφάλμα της διαφοράς των δύο ψηφιακών μοντέλων είναι ίσο με

$$\sigma_{\Delta Z} = \sqrt{\sigma_{z_i}^2 + \sigma_{z_{ref}}^2}$$

Αποδεκτή θεωρείται κατ' αρχήν η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων που ανήκει στο διάστημα εμπιστοσύνης $3\sigma_{\Delta Z}$ της τιμής αυτής (με την υπόθεση ότι τα σφάλματα ακολουθούν την κανονική κατανομή).

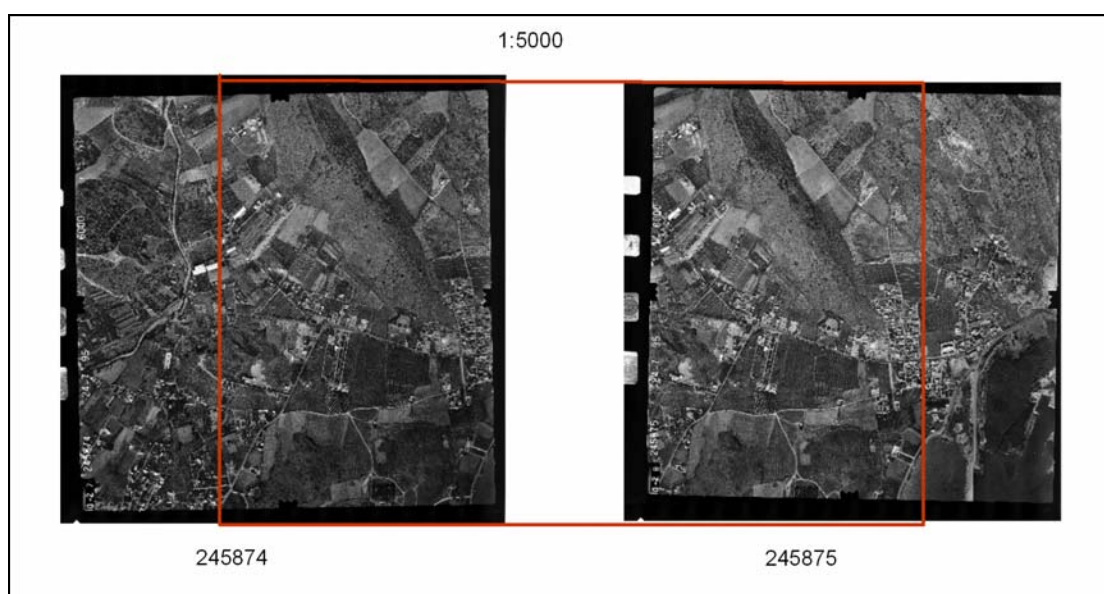
Πρέπει να σημειωθεί ότι, με σκοπό να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος, το πρώτο αδρό ψηφιακό μοντέλο εξάγεται στο πρόγραμμα από εικόνες μειωμένης α-

νάλυσης. Αυτό σημαίνει ότι διαφοροποιείται και η τιμή του $\sigma_{\Delta Z}$ στην περίπτωση των εικόνων της κανονικής ανάλυσης.

8.3 1^ο Μοντέλο

Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε ημιαστική περιοχή του Βόλου. Τα στοιχεία των αεροφωτογραφιών είναι

Κλίμακα	1:6800
επικάλυψη	60%
σταθερά c μηχανής	153.353 mm



Εικόνα 35. Στερεοζεύγος πρώτης δοκιμής.

- *Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων και συνταύτισή τους*

Η εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων έγινε με χρήση του τελεστή Harris. Η αρχική εκτίμηση για τη μέση παράλλαξη έγινε από την κατά μήκος επικάλυψη του στερεομοντέλου. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν κάποια σημεία για καλύτερο υπολογισμό της αφού η παράλλαξη που υπολογίζεται από την κατά μήκος επικάλυψη θεωρεί επίπεδο έδαφος.

Για τη συνταύτιση των σημείων με τη μέθοδο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε παράθυρο διαστάσεων 21×21 και η αναζήτηση έγινε σε περιοχή 201×201 περί το σημείο που δίνει η μέση παράλλαξη. Ως όριο αποδοχής του συντελεστή συσχέτισης τέθηκε η τιμή 0.85.

Μετά την εύρεση του ομόλογου σημείου η διαδικασία επαναλαμβάνεται και γίνεται η αναζήτηση με τον ίδιο τρόπο από τη δεξιά εικόνα στη αριστερή. Ως όριο αποδοχής για να γίνει αποδεκτή η συνταύτιση τέθηκε το όριο των 2 εικονοψηφίδων. Με το τέλος της διαδικασίας αυτής προέκυψαν 1096 ομολογίες σημείων.

- *Σχετικός προσανατολισμός*

Με τις ομολογίες αυτές υπολογίζονται τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού με τη μέθοδο των μικτών εξισώσεων. Στη συνέχεια γίνεται διαδοχική αφαίρεση των παρατηρήσεων (ομολογιών σημείων) έως ότου όλα τα εναπομένοντα σφάλματα των ομολογιών να βρίσκονται στο διάστημα $2.67 \times \sigma_0$. Τελικά απομένουν 1078 ομολογίες σημείων. Τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού είναι:

Στοιχεία σχετικού προσανατολισμού	
b_y	0.03752
b_z	-0.00845
ω°	0.96802
φ°	0.66844
κ°	1.81060
\square_\square [pixel]	0.25

Στα παραπάνω σημεία εφαρμόζεται η ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση με σκοπό να βρεθούν καλύτερες τιμές των στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού. Μετά την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων αφαιρούνται επαναληπτικά οι ομολογίες που βρίσκονται κάτω από το $2.67 \times \sigma_0$. Τελικά μένουν 1062 ομολογίες σημείων που δίνουν τις ακόλουθες τιμές παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού, μαζί με τα αντίστοιχα τυπικά σφάλματα.

Στοιχεία σχετικού προσανατολισμού με LSM	
b_y	0.0382 ± 0.0001
b_z	-0.0084 ± 0.0000
\square°	0.9721 ± 0.0018
\square°	0.6725 ± 0.0022
\square°	1.8082 ± 0.0007
\square_\square [pixel]	0.17

- *Δημιουργία επιπολικών εικόνων*

Με τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού δημιουργούνται επιπολικές εικόνες με διάσταση εικονοψηφίδας ίση με εκείνη των αρχικών εικόνων.

Τα σφάλματα των γωνιακών στοιχείων του σχετικού προσανατολισμού δίνουν την αβεβαιότητα σε αριθμό γραμμών εκατέρωθεν της επιπολικής ευθείας στις οποίες αναμένεται το ομόλογο σημείο. Για την εύρεση του αριθμού των γραμμών αναζήτησης έγινε η δοκιμή για την ακραία περίπτωση ($x = 75 \text{ mm}$, $y = 75 \text{ mm}$), οπότε ο αριθμός των εικονοψηφίδων όπου βρίσκεται το ομόλογο σημείο είναι 0.2. Αυτό σημαίνει ουσιαστικά ότι η αναζήτηση μπορεί να γίνει κατά μήκος μιας μόνο επιπολικής γραμμής. Στην εφαρμογή η αναζήτηση γίνεται κατά μήκος τριών επιπολικών γραμμών.

- *Εξαγωγή αδρού ψηφιακού μοντέλου*

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους παράχθηκε από τις εικόνες ανάλυσης 400 dpi. Η διάσταση της εικονοψηφίδας είναι 64 μm . Έτσι, το αναμενόμενο σφάλμα στις τιμές των υψομέτρων είναι

$$\sigma_z = 6800 \times \frac{1029}{582} \times 0.064 = 769.45 \text{ mm} = 76.9 \text{ cm} = 0.769 \text{ m}$$

Το αναμενόμενο σφάλμα στις τιμές των υψομέτρων από τις εικόνες μεγάλης ανάλυσης, στις οποίες βασίστηκε η αυτόματη παραγωγή μοντέλου με εμπορικό λογισμικό, είναι

$$\sigma_z = 6800 \times \frac{1029}{582} \times 0.015 = 180.34 \text{ mm} = 18.034 \text{ cm} = 0.18 \text{ m}$$

Το αναμενόμενο σφάλμα της διαφοράς δίδεται έτσι από το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων ως

$$\sigma_{\Delta z} = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_{z_{ref}}^2} = \sqrt{0.18^2 + 0.769^2} = 0.79 \text{ m}, \text{ άρα } 3\sigma_{\Delta z} = 2.4 \text{ m}$$

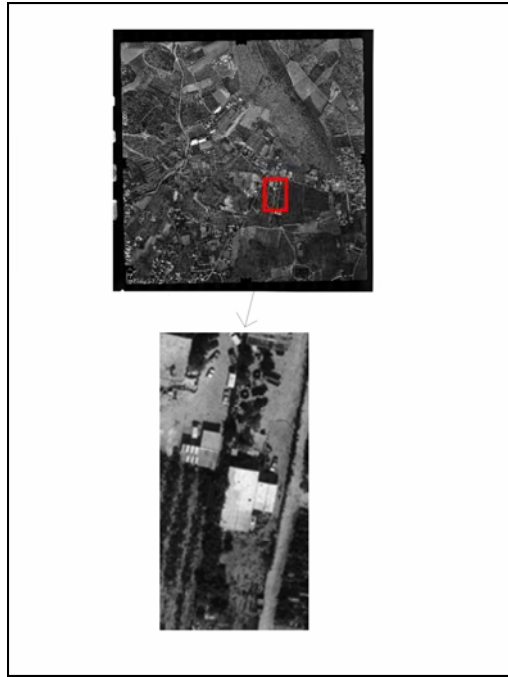
Τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

RMS	1.90 m
<i>αποδεκτό σφάλμα 3σ</i>	2.40 m
<i>ποσοστό σημείων στο αποδεκτό διάστημα 3σ</i>	79.9 %
Διαφορές	Ποσοστό %
<σ	10.7
<3σ	79.9
<4σ	95.5
<5σ	98.9
<6σ	99.7
>10σ	0.0

Από τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία εξάγονται τα εξής συμπεράσματα. Η μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ του μοντέλου που προέκυψε στην εργασία και του μοντέλου “αναφοράς” από το λογισμικό MATCH-T είναι σχετικά μεγάλη. Ωστόσο αυτό οφείλεται σε ορισμένες μεγάλες διαφορές. Το ποσοστό των διαφορών μέσα στα όρια $\pm\sigma_{\Delta z}$ είναι περιορισμένο, όμως το μεγαλύτερο μέρος των διαφορών (70%) βρίσκεται εντός του εύρους $\sigma_{\Delta z} - 3\sigma_{\Delta z}$. Γενικά λοιπόν εκείνο που έχει την μεγαλύτερη σημασία είναι ότι το 80% των διαφορών βρίσκεται μέσα στα όρια $\pm 3\sigma_{\Delta z}$ της εκτιμηθείσας ανοχής για τις υψομετρικές διαφορές των δύο μοντέλων, και από αυτή την άποψη τα αποτελέσματα θεωρούνται ικανοποιητικά. Σημειώνεται ακόμη ότι το αυτόματο μοντέλο από το MATCH-T δεν έχει “καθαριστεί” καθόλου από χονδροειδή σφάλματα.

- *Εξαγωγή πυκνού ψηφιακού μοντέλου*

Για λόγους υπολογιστικής ισχύος, όπως αναφέρθηκε, είναι αδύνατο να εξαχθεί πυκνό ψηφιακό μοντέλο από τις εικόνες υψηλής ανάλυσης για ολόκληρο το επικαλυπτόμενο τμήμα του ζεύγους. Γι’ αυτό το λόγο επιλέχθηκε μια αντιπροσωπευτική περιοχή.



Εικόνα 36. Περιοχή δοκιμής.

Για την αναζήτηση ομόλογων σημείων στις επιπολικές εικόνες μεγαλύτερης ανάλυσης εξετάζεται ξανά ο αριθμός των επιπολικών γραμμών στις οποίες θα γίνει η αναζήτηση καθώς αλλάζουν πλέον οι διαστάσεις της εικονοψηφίδας. Το αποτέλεσμα είναι 0.7 pixel. Συνεπώς η αναζήτηση μπορεί να γίνει και εδώ κατά μήκος μιας επιπολικής γραμμής.

Η διάσταση της εικονοψηφίδας είναι 15 μm και το σφάλμα παράλλαξης θεωρείται ίσο με 1 pixel. Το εκτιμώμενο σφάλμα υπολογισμού των υψομέτρων είναι:

$$\sigma_z = 6800 \frac{1029}{582} 0.015 = 0.18 \text{ m}$$

ενώ το αναμενόμενο σφάλμα των διαφορών των δύο μοντέλων είναι:

$$\sigma_{\Delta Z} = \sqrt{2} \times 0.18 = 0.26 \text{ m}$$

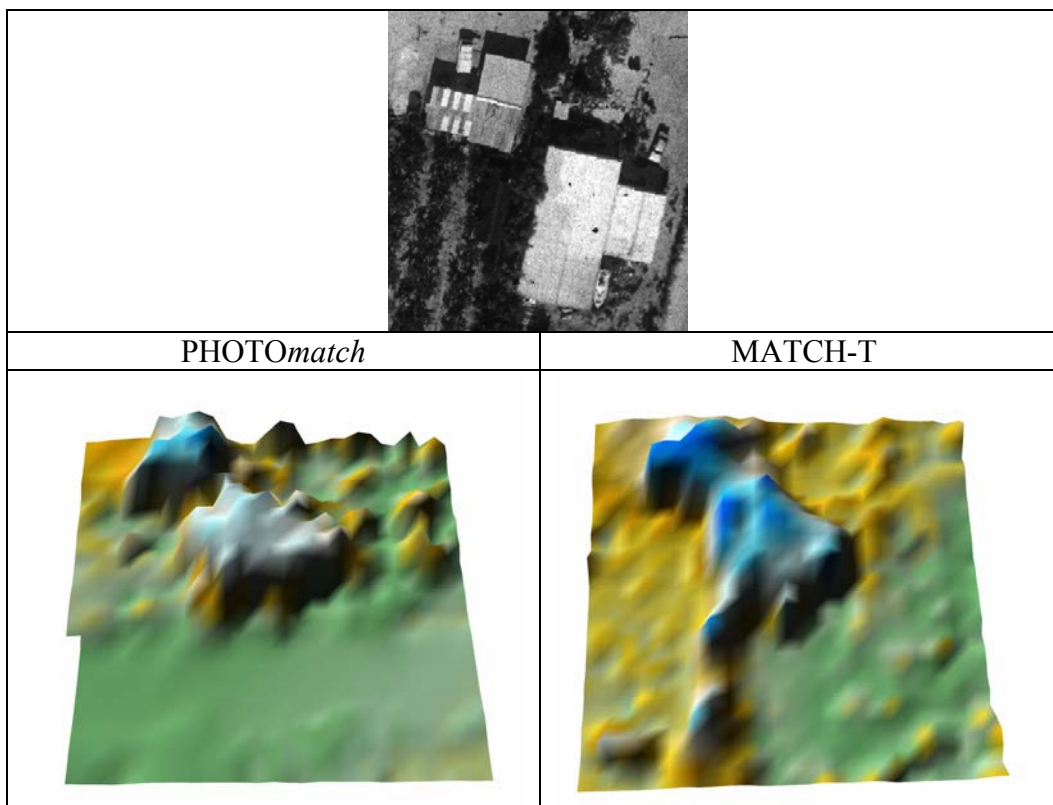
$$\text{Άρα } 3\sigma_{\Delta Z} = 0.76 \text{ m}$$

Τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

<i>RMS</i>	<i>0.71 m</i>
<i>Αποδεκτό σφάλμα 3σ</i>	<i>0.76 m</i>
<i>ποσοστό σημείων στο αποδεκτό διάστημα 3σ</i>	<i>82.9 %</i>
Διαφορές	Ποσοστό %
< σ	56.1
<3 σ	82.9
<4 σ	87.2
<5 σ	90.8
<6 σ	93.4
>10 σ	1.3

Από τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Η μέση τετραγωνική απόκλιση, που προέκυψε από τις εικόνες πλήρους ανάλυσης, μεταξύ του μοντέλου της εργασίας αυτής και του μοντέλου “αναφοράς” από το λογισμικό MATCH-T είναι και εδώ σχετικά μεγάλη. Και πάλι όμως αυτό οφείλεται σε κάποιες μεγάλες διαφορές. Μάλιστα το ποσοστό των διαφορών μέσα στα όρια $\pm\sigma_{\Delta Z}$ είναι εδώ ιδιαίτερα μεγάλο ($> 50\%$), το 83% των διαφορών βρίσκεται μέσα στα όρια $\pm 3\sigma_{\Delta Z}$ της εκτιμηθείσας ανοχής για τις υψομετρικές διαφορές των δύο μοντέλων. Από αυτή την άποψη, έτσι, τα αποτελέσματα θεωρούνται ικανοποιητικά. Υπενθυμίζεται και εδώ ότι το αυτόματο μοντέλο από το MATCH-T δεν έχει “καθαριστεί” καθόλου από χονδροειδή σφάλματα.

Στην επόμενη σελίδα φαίνονται απεικονίσεις του ψηφιακού μοντέλου που παρήχθη με το πρόγραμμα της παρούσας εργασίας σε σύγκριση με το αντίστοιχο από το λογισμικό MATCH-T. Παρατηρείται εκεί ότι, σε γενικές γραμμές, και οι δύο μέθοδοι έχουν προσεγγίσει με επάρκεια τα δύο κτίρια. Μάλιστα το λογισμικό της παρούσας εργασίας εμφανίζεται να διαχωρίζει σαφέστερα τα δύο κτίρια αλλά και να αποδίδει ίσως πιστότερα το περίγραμμά τους. Από την άλλη μεριά, το αποτέλεσμα από το MATCH-T παρουσιάζεται ομαλότερο, πιθανότατα χάρη στον αλγόριθμο εξομάλυνσης του αναγλύφου που χρησιμοποιεί, ενώ η αντίστοιχη διαδικασία που εφαρμόστηκε εδώ αφήνει περισσότερες αδικαιολόγητες διακυμάνσεις.





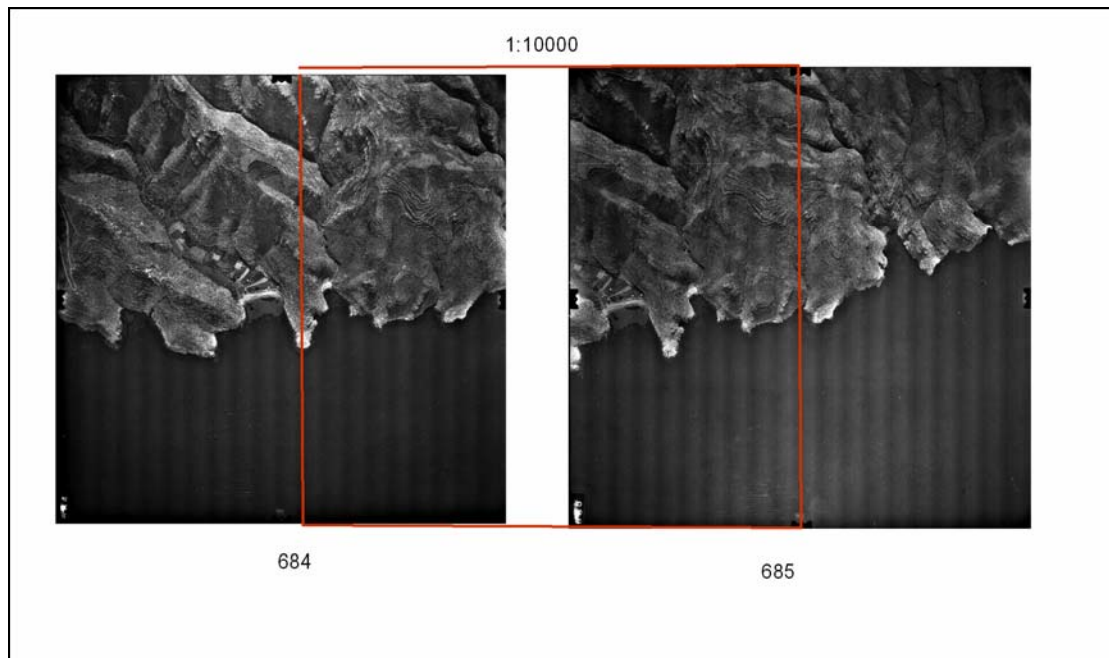
8.4 2^ο Μοντέλο

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε μια βραχώδη περιοχή με έντονο ανάγλυφο προκειμένου να ελεγχθεί ο αλγόριθμος σε μάλλον ακραίες συνθήκες.

Κλίμακα	1:10000
επικάλυψη	60%
σταθερά c μηχανής	152.52 mm

- *Εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων και συνταύτισή τους*

Τα χαρακτηριστικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν εξήχθησαν με τον τελεστή Harris. Η συνταύτιση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του μέγιστου συντελεστή συσχέτισης με παράθυρο 21×21 και περιοχή αναζήτησης 401×401. Η περιοχή αναζήτησης είναι εδώ διπλάσια από την αντίστοιχη στο στερεομοντέλο της πρώτης εφαρμογής εξαιτίας των σημαντικών υψομετρικών διαφορών που παρουσιάζονται στο στερεομοντέλο.



Εικόνα 37. Στερεοζεύγος δεύτερης δοκιμής

- *Σχετικός προσανατολισμός*

Στην περίπτωση αυτού του μοντέλου η διαδικασία του σχετικού προσανατολισμού αποδείχθηκε αρκετά πιο δύσκολη σε σχέση με το προηγούμενο. Η πολύ έντονη αντίθεση των εικόνων και οι ιδιαίτερα απότομες κλίσεις, πράγμα που συνεπάγεται έντονες προοπτικές διαφορές μεταξύ των εικόνων ή και αποκρύψεις, επέτρεψαν αρχικά να εντοπιστούν μόνο 154 ομολογίες σημείων Harris βάσει του συντελεστή συσχέτισης. Από αυτά, τα περισσότερα απορρίφθηκαν κατά την διαδικασία του σχετικού προσανατολισμού, με συνέπεια να απομείνουν τελικά 36 σημεία, καλά όμως κατανεμημένα, για την ολοκλήρωση του προσανατολισμού, ο οποίος έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

Στοιχεία σχετικού προσανατολισμού	
b_y	-0.0417
b_z	-0.0074
ω°	1.5673
φ°	-0.0548
κ°	-2.6073
σ_0 [pixel]	0.27

Με βάση τις ομολογίες αυτές, πραγματοποιήθηκε ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση και κατόπιν διαδικασία σχετικού προσανατολισμού, κατά την οποία δεν απορρίφθηκαν σημεία. Τα αποτελέσματα για τις παραμέτρους και τα τυπικά σφάλματα φαίνονται στον επόμενο πίνακα. Τα σφάλματα είναι εδώ σημαντικά μεγαλύτερα από εκείνα του προηγούμενου μοντέλου λόγω της μεγάλης διαφοράς στον αριθμό των σημείων.

Στοιχεία σχετικού προσανατολισμού με LSM	
b_y	-0.0450 ± 0.0011
b_z	-0.0085 ± 0.0002
ω°	1.6902 ± 0.0344
φ°	-0.0555 ± 0.0229
κ°	-2.5862 ± 0.0057
σ_0 [pixel]	0.20

- *Κατασκευή επιπολικών εικόνων*

Όπως και στο πρώτο στερεομοντέλο, δημιουργήθηκαν επιπολικές εικόνες ίδιας διάστασης εικονοψηφίδας με τις αρχικές. Από τις αβεβαιότητες των γωνιακών παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού υπολογίζεται ο αριθμός των επιπολικών γραμμών στις οποίες θα γίνεται η αναζήτηση των ομόλογων σημείων. Στην ακραία περίπτωση ($x = y = 75 \text{ mm}$) το εύρος γραμμών είναι ίσο με 0.7, πράγμα που σημαίνει ότι αρκεί και εδώ το εύρος των τριών γραμμών που δίδεται από το πρόγραμμα.

- *Εξαγωγή αδρού ψηφιακού μοντέλου*

Το πρώτο ψηφιακό μοντέλο εδάφους παρήχθη από τις εικόνες ανάλυσης 550 dpi. Η διάσταση της εικονοψηφίδας είναι 49 μm . Το αναμενόμενο σφάλμα στις τιμές των υψομέτρων είναι

$$\sigma_z = 10000 \times \frac{1525}{829} \times 0.049 = 901.39 \text{ mm} = 90 \text{ cm} = 0.90 \text{ m}$$

Το αναμενόμενο σφάλμα στις τιμές των υψομέτρων από τις εικόνες μεγάλης ανάλυσης είναι

$$\sigma_z = 10000 \times \frac{1525}{829} \times 0.011 = 202.35 \text{ mm} = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$$

Το αναμενόμενο σφάλμα της διαφοράς δίδεται από το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων.

$$\sigma_{\Delta Z} = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_{z_{ref}}^2} = \sqrt{0.202^2 + 0.901^2} = 0.92 \text{ m}$$

$$\text{Άρα } 3\sigma_{\Delta Z} = 2.8 \text{ m}$$

Για τον έλεγχο του στερεομοντέλου χρησιμοποιούνται δεδομένα αναφοράς που έχουν συλλεγεί αυτόματα στον φωτογραμμετρικό σταθμό LPS. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά στοιχεία:

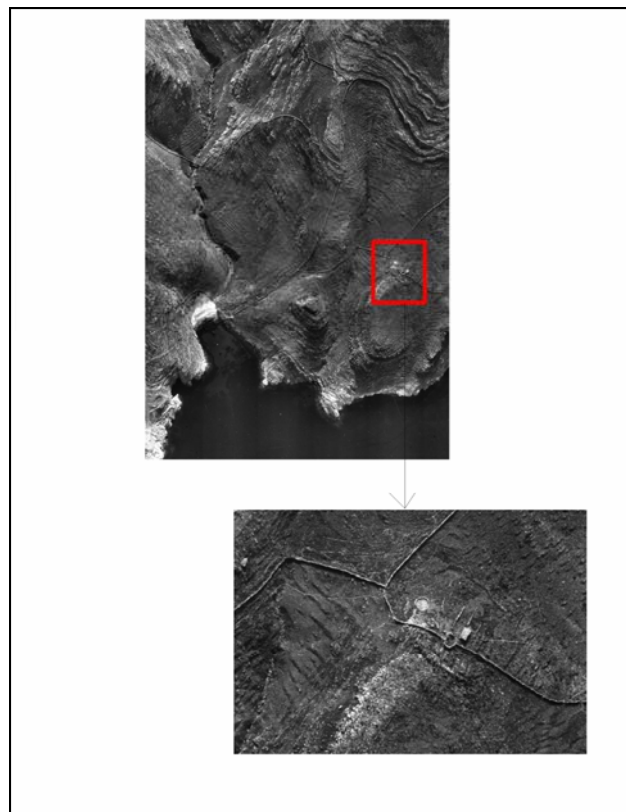
Κλίμακα εικόνων	1:10000
<i>Διάσταση pixel</i>	49 μm
<i>Βάση στερεοζεύγους</i>	829 m
<i>Σφάλμα μέτρησης σημείου</i>	1 pixel
<i>Σφάλμα υψομέτρων $3\sigma_{\Delta Z}$</i>	2.8 m

<i>RMS</i>	<i>1.1 m</i>
Διαφορές	Ποσοστό %
<σ	68.5
<3σ	97.8
<4σ	99.3
<5σ	99.6
<6σ	99.7
>10σ	0.0

Τα αποτελέσματα είναι και εδώ ικανοποιητικά, με την μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ των μοντέλων περίπου ίση με την αναμενόμενη και με περί τα $\frac{2}{3}$ των σημείων να εμφανίζουν διαφορές κάτω του αναμενόμενου, ενώ το 98% των διαφορών βρίσκονται εντός του εύρους $\pm 3\sigma_{\Delta Z}$.

- *Εξαγωγή πυκνού ψηφιακού μοντέλου*

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν και για το πρώτο στερεομοντέλο, πυκνό ψηφιακό μοντέλο από τις εικόνες υψηλής ανάλυσης παρήχθη μόνο σε μικρά τμήματα.



Εικόνα 38. Περιοχή ελέγχου.

Η διάσταση της εικονοψηφίδας είναι 11 μm και το σφάλμα παράλλαξης θεωρείται ίσο με 1 pixel, όποτε το σφάλμα υπολογισμού των υψομέτρων είναι:

$$\sigma_z = 10000 \frac{1525}{829} 0.011 = 0.20m$$

Το αναμενόμενο σφάλμα των διαφορών των δύο μοντέλων είναι:

$$\sigma_{\Delta Z} = \sqrt{2} \times 0.202 = 0.29m, \text{ \acute{a}\rho\alpha } 3\sigma_{\Delta Z} = 0.86m$$

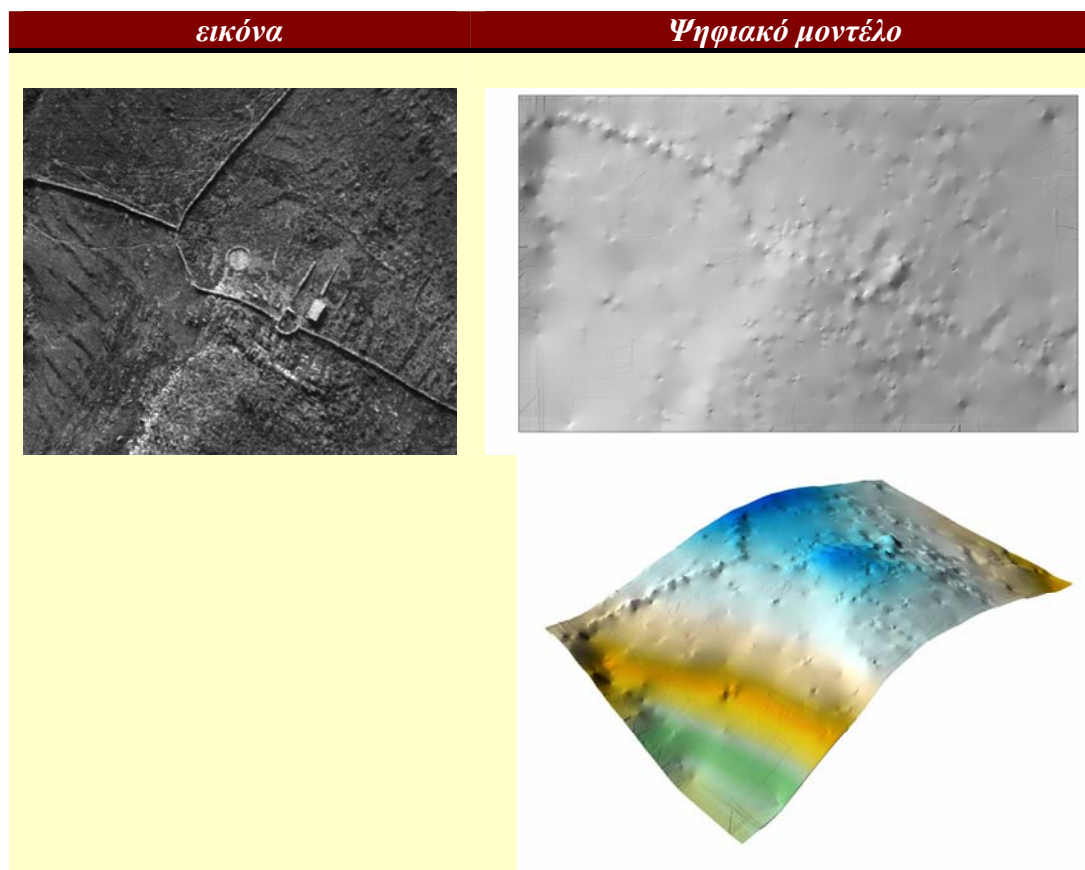
Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των δύο μοντέλων είναι τα εξής.

Τμήμα 1

<i>Κλίμακα εικόνων</i>	<i>1:10000</i>
<i>Διάσταση pixel</i>	11 μ m
<i>Βάση στερεοζεύγους</i>	829 m
<i>Σφάλμα μέτρησης σημείου</i>	1 pixel
<i>Σφάλμα υψομέτρων</i>	0.86 m

RMS	0.96 m
<i>Διαφορές</i>	<i>Ποσοστό %</i>
< σ	22.9
<3 σ	71.5
<4 σ	83.4
<5 σ	89.3
<6 σ	92.7
>10 σ	1.8

Οπτικά το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω



Τμήμα 2

Στο δεύτερο τμήμα έγινε μια προσπάθεια περαιτέρω πύκνωσης του μοντέλου σε μια μικρότερη περιοχή προκειμένου να εξαχθεί μια τεχνική κατασκευή και συγκεκριμένα ένα κτίριο. Οπτικά το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω



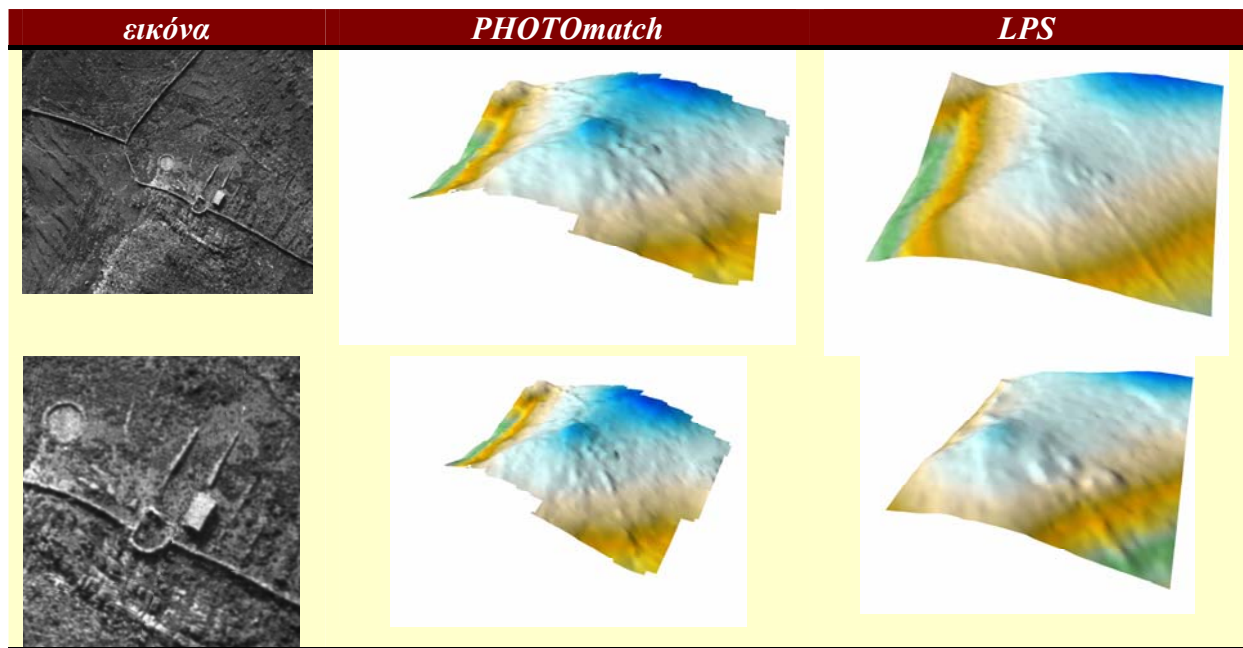
Τόσο στο Τμήμα 1 όσο και στο Τμήμα 2, η αυτόματη διαδικασία απέδωσε, σε πολύ αδρές γραμμές βέβαια, τις χονδρικές μεταβολές του αναγλύφου εντοπίζοντας ορισμένες από τις απότομες μεταβολές.

Τα στοιχεία από τις συγκρίσεις των μοντέλων από τον αλγόριθμο PHOTOMatch της εργασίας αυτής και από το λογισμικό του φωτογραμμετρικού σταθμού LPS είναι:

<i>Κλίμακα εικόνων</i>	<i>1:10000</i>
<i>Διάσταση pixel</i>	11 μm
<i>Βάση στερεοζεύγους</i>	829 m
<i>Σφάλμα μέτρησης σημείου</i>	1 pixel
<i>Σφάλμα υψομέτρων</i>	0.86 m

<i>RMS</i>	<i>0.81 m</i>
<i>Διαφορές</i>	<i>Ποσοστό %</i>
$<\sigma$	34.1
$<3\sigma$	78.9
$<4\sigma$	86.7
$<5\sigma$	90.9
$<6\sigma$	93.9
$>10\sigma$	0.6

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται τα ψηφιακά μοντέλα που παρήχθησαν από τα δύο αυτά λογισμικά.



Συμπεράσματα

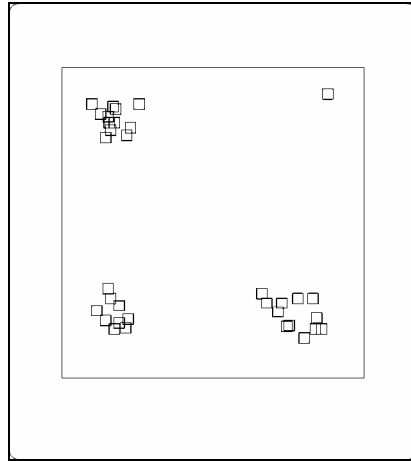
Για την έκθεση και ανάλυση των συμπερασμάτων που πηγάζουν από την εφαρμογή και τις δοκιμές της, κρίνω απαραίτητη την αναφορά στους στόχους της φωτογραμμετρικής έρευνας τα τελευταία χρόνια και ειδικότερα στον τομέα των αυτοματισμών.

Κατ' αρχάς, παρατηρώντας τις διαδικασίες της φωτογραμμετρίας σε επίπεδο καθαρής εφαρμογής είμαι σε θέση να διαπιστώσω τα εξής. Ήδη στους φωτογραμμετρικούς σταθμούς υπάρχουν τα εργαλεία του αυτόματου σχετικού προσανατολισμού, του αυτόματου αεροτριγωνισμού όσο και της αυτοματοποιημένης συλλογής ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Είναι όμως σαφές – και εδώ έγκειται και η διατήρηση της έννοιας του ψηφιακού φωτογραμμετρικού σταθμού – πως τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω αυτοματισμών ελέγχονται από το χρήστη σε όλα τα στάδια της παραγωγής. Αναλυτικότερα, οι επιλογές των σταθμών συνήθως είναι συνήθως οι εξής. Αυτόματη εξαγωγή και ταύτιση σημείων von Gruber για τον αυτόματο σχετικό προσανατολισμό. Πραγματοποίηση σχετικού προσανατολισμού. Στη συνέχεια δίδεται η δυνατότητα στον χρήστη να αποδεχθεί ή να διορθώσει χειροκίνητα τα σημεία. Ο απόλυτος προσανατολισμός δεν γίνεται αυτόματα, διότι θα απαιτούσε, εκτός των άλλων, πολύ ακριβή χαρτογραφικά υπόβαθρα και ενημερωμένες βάσεις χαρτογραφικών δεδομένων. Μετά από τον υπολογισμό των παραμέτρων του απόλυτου προσανατολισμού ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει τη δυνατότητα αυτόματης συλλογής ψηφιακού μοντέλου εδάφους εισάγοντας ή όχι ένα ψηφιακό μοντέλο-οδηγό (πχ. ένα παγκόσμιο υπομετρικό μοντέλο). Στη συνέχεια μπορεί να αξιολογήσει και να διορθώσει το μοντέλο στερεοσκοπικά (editing) και να αποδώσει γραμμικά στοιχεία.

Το ερώτημα που τίθεται είναι πώς οι αυτοματισμοί επιδρούν στη δομή και στη σειρά εργασιών ενός φωτογραμμετρικού σταθμού. Η επίδραση αυτή εξαρτάται από την αξιοπιστία με την οποία ένας αλγόριθμος, και τελικά ένα “άρθρωμα” (module), επιλύει ένα πρόβλημα. Εδώ έγκειται και το σημαντικότερο ζήτημα των φωτογραμμετρικών αυτοματισμών που είναι η απόλυτα πιθανοκρατική διάσταση που παρουσιάζει η επεξεργασία εικόνας. Το πρόβλημα των φωτογραμμετρικών αλγορίθμων έχει απόλυτα ντετερμινιστική διάσταση εάν αφαιρέσουμε το ζήτημα της επεξεργασίας εικόνων (βλ. εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων, κατάτμηση εικόνας, αναγνώριση προτύπων). Το θέμα όμως αυτό είναι το κρισιμότερο στους αυτοματισμούς και παρουσιάζει την εξής ιδιαιτερότητα. Δεν μπορεί να υπάρξει αλγόριθμος που να επιλύει πλήρως ένα πρόβλημα και δεν μπορούν να υπάρξουν προσομοιωμένα δεδομένα που να ελέγχουν πλήρως τον αλγόριθμο και να βεβαιώνουν την ορθότητά του. Στην πραγματικότητα τις περισσότερες φορές τα δεδομένα δοκιμής που χρησιμοποιούνται ελέγχουν μόνο το κατά πόσον το άρθρωμα (υλοποίηση αλγορίθμου) υλοποιεί σωστά τον αλγόριθμο και όχι τον ίδιο τον αλγόριθμο.

Εξετάζοντας κανείς τους φωτογραμμετρικούς αυτοματισμούς που υλοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (αυτόματος σχετικός, κατασκευή επιπολικών εικόνων, αυτόματη συλλογή ψηφιακού μοντέλου) μπορεί να εξαγάγει τα εξής συμπεράσματα.

Η εύρεση χαρακτηριστικών σημείων εξαρτάται από την υφή της εικόνας. Η κατανομή των χαρακτηριστικών σημείων στο στερεομοντέλο δεν είναι απολύτως ευνοϊκή (για παράδειγμα, στο στερεομοντέλο της Κέας). Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον, είναι πιθανό μια περιοχή να μην έχει υφή σε μια περιοχή Gruber. Αυτό σημαίνει πως δεν θα γίνει αναζήτηση ομοιοτήτων σε αυτή την περιοχή. Επιπλέον, είναι δυνατόν ο αριθμός των σημείων στις τέσσερις περιοχές Gruber να μην έχει ομοιομορφία. Στην ακραία περίπτωση που απεικονίζεται παρακάτω



το μοναδικό σημείο που βρίσκεται πάνω δεξιά είναι δυνατό να θεωρηθεί χονδροειδές σφάλμα κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης παρατηρήσεων αφού τα υπόλοιπα σημεία, πλην αυτού, μπορούν να “κλειδώσουν” σε μια διαφορετική λύση με μικρότερο σ_0 χωρίς τη συμμετοχή του. Αυτή η κατ’ αρχήν αδυναμία του αλγορίθμου φανερώνει την ανάγκη ελέγχου του κατά τη διαδικασία από το χρήστη. Δείχνει ακόμα την κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί η βελτίωσή του.

Η κατασκευή των επιπολικών εικόνων είναι μια πλήρως ελεγχόμενη διαδικασία εφόσον τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού θεωρηθούν αποδεκτά. Συνεπώς η πλήρης αυτοματοποίησή της είναι δυνατή. Όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, ο έλεγχος των επιπολικών εικόνων μπορεί να αφορά μόνο τη γεωμετρία (Y_n αριστερής = Y_n δεξιάς) ή τη γεωμετρία και τη ραδιομετρία. Ο έλεγχος της γεωμετρίας δεν θα επαληθεύει ακριβώς την παραπάνω ισότητα εφόσον τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού εμπεριέχουν σφάλμα. Σημειώνεται ότι το σφάλμα αυτό στις επιπολικές εικόνες εξαρτάται από τα σφάλματα των γωνιών (αλλά και των γραμμικών παραμέτρων) του σχετικού προσανατολισμού, όπως αυτό περιγράφεται στις αντίστοιχες σχέσεις των διαφορικά μικρών μεταβολών που εφαρμόζονταν παλαιότερα σε διαδικασίες εμπειρικού σχετικού προσανατολισμού. Το παραπάνω σφάλμα καθορίζει και τον αριθμό των γραμμών μέσα στον οποίο “κινείται” το ομόλογο σημείο.

Η αυτόματη συλλογή ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι η πιο “επίπονη” διαδικασία αυτοματισμού που προγραμματίστηκε στην εργασία αυτή. Η ορθότητά της εξαρτάται από το ποσοστό των σημείων για τα οποία η συνταύτιση είναι επιτυχής. Η εσφαλμένη συνταύτιση έχει ως συνέπεια απότομες υψομετρικές διαφορές (spike) στο ψηφιακό μοντέλο.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυτής είναι ο έλεγχός της, δεδομένου ότι προφανώς δεν υπάρχει κάποιο μαθηματικό μοντέλο το οποίο θα πρέπει να πληρούν τα σημεία του εδάφους. Κατά συνέπεια ο μόνος αυτόματος έλεγχος που μπορεί κατ’ αρχήν να υπάρξει είναι ο έλεγχος των υψομετρικών διαφορών που εμφανίζονται γύρω από κάθε σημείο.

Ο έλεγχος αυτός (module ‘Outlier_detector’) δίνει καλά αποτελέσματα στην περίπτωση όπου τα λανθασμένα σημεία είναι περιορισμένα και κυρίως δεν είναι συγκεντρωμένα ανά περιοχές. Τότε, με ένα ενδεικτικό εύρος 10 m (για τις κλίμακες που χρησιμοποιήθηκαν εδώ) στο οποίο υπολογίζονται τα στατιστικά υψομετρικά στοιχεία του μοντέλου) μπορούν να αφαιρεθούν αυτόματα τα λανθασμένα σημεία σε μια διαδικασία “εξομάλυνσης” της επιφάνειας. Ο αλγόριθμος αυτός όμως ελέγχου του μοντέλου δεν μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν πολλά λανθασμένα σημεία είναι συγκεντρωμένα στην ίδια περιοχή. Για παράδειγμα, αν ένα σημαντικό

ποσοστό των σημείων που βρίσκονται μέσα στην περιοχή ελέγχου (πχ. το ένα τρίτο) είναι λανθασμένα σημεία, τότε η τυπική απόκλιση θα είναι μεγάλη. Συνεπώς είναι δύσκολο να εντοπιστούν από τον αλγόριθμο όλα τα λανθασμένα σημεία.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα που μπορεί να κατατεθεί σχετικά με τον αλγόριθμο αυτό αφαίρεσης των χονδροειδών σφαλμάτων είναι η ιδιότητά του να συγκλίνει κατά την επαναληπτική του εφαρμογή. Αναλυτικότερα ο αλγόριθμος αυτός έχει ως στοιχεία εισόδου ένα ψηφιακό μοντέλο και την ακτίνα του κύκλου για τον υπολογισμό των στατιστικών στοιχείων. Μετά από κάθε εφαρμογή ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται στο νέο ψηφιακό μοντέλο. Η διαδικασία τερματίζεται όταν ο αλγόριθμος σταματήσει να αφαιρεί σημεία.

Αναλύοντας τη συνεισφορά του ψηφιακού μοντέλου στη συνταύτιση σημείων μπορούν να ειπωθούν τα εξής. Είναι σημαντικό το χρησιμοποιούμενο αδρό ψηφιακό μοντέλο να μην περιέχει λανθασμένα σημεία. Ο αλγόριθμος υπολογισμού του διαστήματος στηλών αναζήτησης πάνω στην επιπολική γραμμή καθορίζεται από τη μέγιστη υψομετρική διαφορά σε μια περιοχή αναζήτησης γύρω από το σημείο. Είναι φανερό ότι η ύπαρξη εσφαλμένων σημείων αυξάνει τη θεωρούμενη υψομετρική διαφορά (μέγιστο υψόμετρο – ελάχιστο υψόμετρο) συνεπώς και την περιοχή αναζήτησης του σημείου. Το ομόλογο σημείο όμως εξακολουθεί να είναι εντός της περιοχής αναζήτησης. Αυτό προσδίδει στον αλγόριθμο μια σταθερότητα στα σφάλματα του ψηφιακού μοντέλου-οδηγού. Η αύξηση όμως του διαστήματος αναζήτησης αυξάνει παράλληλα την πιθανότητα λανθασμένης συνταύτισης του σημείου.

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η καλύτερη μεθοδολογία συλλογής ψηφιακού μοντέλου είναι η εξής.

Κατ' αρχάς εξάγονται σημεία ενδιαφέροντος (Harris) στην αριστερή εικόνα. Τα σημεία αυτά χρησιμοποιούνται για την πύκνωση του ψηφιακού μοντέλου με τη διαδικασία που περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Ως πρώτο μοντέλο-οδηγός μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκείνο που εξάγεται από τα σημεία του σχετικού προσανατολισμού εφόσον αυτά μετασχηματιστούν στο σύστημα της βάσης. Στο νέο σημειοσύνολο (νέφος σημείων) εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της επαναληπτικής αφαίρεσης σημείων ('Outlier_detector'). Το διορθωμένο αυτό ψηφιακό μοντέλο χρησιμοποιείται στο επόμενο επίπεδο πύκνωσης. Στη συνέχεια εξάγονται στην αριστερή εικόνα περισσότερα σημεία ενδιαφέροντος με "χαλαρότερο" σημειακό τελεστή και επαναλαμβάνεται η διαδικασία όσες φορές κρίνει ο χρήστης απαραίτητες. Σημειώνεται ότι είναι σημαντική η εφαρμογή του αλγορίθμου αφαίρεσης σημείων στο ψηφιακό μοντέλο που εξάγεται σε κάθε επίπεδο της διαδικασίας.

Ένα ερώτημα στο οποίο δε μπορεί να δοθεί σαφής απάντηση είναι η ακτίνα του κύκλου υπολογισμού των στατιστικών στοιχείων στον αλγόριθμο της επαναληπτικής αφαίρεσης σημείων. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε γενικά ακτίνα 10 m. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως απαιτήθηκε η χρησιμοποίηση διαφορετικών διαδοχικά ακτίνων (5 m ή και 1 m) προκειμένου να προκύψει ένα αποδεκτό αποτέλεσμα. Είναι γενικά σωστό να ειπωθεί ότι η περιοχή πρέπει να είναι 'αρκετά' μικρή ώστε να ισχύει η βασική υπόθεση του αλγορίθμου που είναι η θεώρηση της κανονικής κατανομής ως της κατανομής που ακολουθούν τα σημεία στην περιοχή, πράγμα που δεν είναι θεωρητικά σωστό καθώς τα σημεία φυσικά δεν ακολουθούν κάποιου είδους κατανομή.

Κρίνοντας γενικότερα, τέλος, τα αποτελέσματα της αυτόματης 3D ανακατασκευής επιφανειών από αεροφωτογραφίες, θα έλεγε κανείς ότι είναι κατ' αρχήν ικανοποιητικά. Περιγράφουν σε αδρές γραμμές των ανάγλυφο και εμφανίζονται αρκετά κοντά σε αποτελέσματα από καθιερωμένα εμπορικά λογισμικά (πολύ δε περισσότερο που για να συγκριθούν τα μοντέλα χρειάστηκε να παρεμβληθούν κανονικοί κানাβοί, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμα και ένα μεμονωμένο χονδροειδές σφάλμα θα επηρεά-

ζει και αρκετά γειτονικά σημεία). Παρ' όλα αυτά, μετά το πέρας της εργασίας αισθάνεται κανείς ότι όσα ερωτήματα απαντήθηκαν τόσο και ακόμα περισσότερα γεννήθηκαν. Έτσι, η παρούσα διπλωματική εργασία θα ολοκληρωθεί με ορισμένες προτάσεις.

Προτάσεις

Το ζήτημα των φωτογραμμετρικών αυτοματισμών είναι ίσως το κεντρικότερο από τα πεδία έρευνας που απασχολούν τη φωτογραμμετρική κοινότητα μετά τη μετάβαση στην ψηφιακή εποχή της φωτογραμμετρίας. Οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που θα δοθούν παρακάτω αφορούν, προφανώς, μόνο τα πεδία τα οποία πραγματεύτηκε η εργασία αυτή.

Όπως αναφέρθηκε στα συμπεράσματα, το ζήτημα του αυτόματου σχετικού προσανατολισμού δεν είναι εδώ απόλυτα λυμένο, καθώς οι αυτοματισμός που προγραμματίστηκε στην εργασία αυτή δε λαμβάνει υπ' όψιν την κατανομή των σημείων στο επικαλυπτόμενο τμήμα. Ο εμπλουτισμός του αλγορίθμου ώστε να είναι σε θέση να 'διαβάζει' την κατανομή των σημείων είναι ένα αξιοσημείωτο ζήτημα προς έρευνα. Το τελικό αποτέλεσμα μιας τέτοιας έρευνας μπορεί να είναι ένας αλγόριθμος, και τελικά ένα άρθρωμα (module), πχ. σε κάποιον φωτογραμμετρικό σταθμό. Αυτό θα καθιστούσε τη διαδικασία του σχετικού προσανατολισμού απόλυτα αυτοματοποιημένη. Για να γίνει αυτό πρέπει να βρεθούν κατάλληλοι δείκτες αξιολόγησης του αποτελέσματος. Οι στατιστικοί δείκτες της μεταβλητότητας της μονάδας βάρους και του πίνακα μεταβλητοτήτων-συμμεταβλητοτήτων δεν αποτελούν πάντοτε ασφαλείς δείκτες που μπορούν να δώσουν πληροφορία για την κατανομή των σημείων καθώς και με μια 'κακή' κατανομή μπορεί να προκύψουν σχετικά μικρές τιμές. Το εργαλείο που έχει ένας ερευνητής στην περίπτωση αυτή είναι η χρησιμοποίηση βαρών στις παρατηρήσεις-ομολογίες σημείων. Όπως είναι γνωστό η έννοια του βάρους είναι η εξής. Εάν μια ομολογία σημείων έχει μεγαλύτερο βάρος από τις υπόλοιπες η συμμετοχή της στη διαμόρφωση των τελικών τιμών του σχετικού προσανατολισμού είναι μεγαλύτερη. Το ζήτημα που ανακύπτει είναι με ποια μεθοδολογία θα προκύπτουν τα βάρη ομολογιών. Αυτό μπορεί να γίνει με τη θεώρηση τμημάτων του επικαλυπτόμενου τμήματος της εικόνας (πχ. τεταρτημόρια) κάποιων διαστάσεων. Σε κάθε τέτοιο τμήμα αντιστοιχεί ένας αριθμός ομολογιών. Σε κάποια τμήματα ο αριθμός θα είναι μεγάλος και σε κάποια πολύ μικρός. Θεωρώντας ότι 'κανονικά' όλα τα τμήματα του στερεοζεύγους πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό ομολογιών, μια εξίσωση υπολογισμού των βαρών θα μπορούσε να είναι

$$P_i = \frac{1/\text{αριθμός_σημείων_στο_τμήμα}}{\text{συνολικός_αριθμός_σημείων}}$$

Με τον τρόπο αυτό τα σημεία που βρίσκονται στα 'δυσμενή' τμήματα αποκτούν μεγαλύτερο βάρος. Μια ακόμα παράμετρος που θα πρέπει να αξιολογηθεί είναι το πόσο σημαντικά είναι τα σημεία στο σχετικό προσανατολισμό. Οι σημαντικές περιοχές είναι οι περιοχές von Gruber. Εφόσον υπάρχουν σημεία και κατανέμονται κανονικά σε αυτές τις περιοχές τότε τα εσωτερικά τους τμήματα αποκτούν μικρή σημασία και δεν έχουν λόγο να έχουν μεγάλο βάρος.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το γεωμετρικό ζήτημα της επιλογής των βαρών είναι ένα σημαντικό πεδίο έρευνας. Παράλληλα, το στατιστικό κριτήριο (δηλαδή η ακρίβεια των ομολογιών) μπορεί επίσης να συμμετάσχει στην διαμόρφωση βαρών,

Όπως αναφέρθηκε και στα συμπεράσματα της εργασίας, η συλλογή ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι η πιο επίπονη διαδικασία που δοκιμάστηκε εδώ. Στην εργα-

σία αυτή ελέγχθηκε η συλλογή νέφους σημείων. Τα νέφη σημείων αναπαριστούν την επιφάνεια του εδάφους πιστά και μπορούν να δώσουν πολύ καλά οπτικά αποτελέσματα στην περίπτωση ‘γυμνού εδάφους’. Σε περιπτώσεις όπου τα έδαφος καλύπτεται από τεχνικές κατασκευές (κτίρια) τα νέφη σημείων δεν μπορούν εύκολα να αποδώσουν σωστά τα όριά τους. Για να γίνει ακριβής απόδοση των τεχνικών κατασκευών απαιτείται αυτόματος ορισμός γραμμών ασυνέχειας (breaklines). Η αναγνώριση γραμμών ασυνέχειας είναι από τα πιο ενδιαφέροντα σύγχρονα ζητήματα έρευνας της ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Η αναγνώριση γίνεται είτε με την εξαγωγή και συνταύτιση ακμών (edge detection και edge matching) είτε μη χρησιμοποίηση των ‘οφιοειδών δικτύων’ (network snakes). Τα δίκτυα αυτά έχουν την ιδιότητα να προσαρμόζονται στις θέσεις κάθετα στις μέγιστες μεταβολές των τόνων. Σε κάθε περίπτωση μετά την εξαγωγή των γραμμών στις δύο εικόνες ακολουθεί το στάδιο της συνταύτισης καμπυλών. Σημειώνεται πως οποιοδήποτε γραμμικό στοιχείο αναγνωριστεί στις δύο εικόνες και γίνεται σωστά η συνταύτιση με μια μέθοδο (πχ. Hough transform) δεν είναι βέβαιο πως αυτό αντιστοιχεί σε γραμμή ασυνέχειας του υψομετρικού μοντέλου. Η συσχέτιση των γραμμών που εξάγονται με το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την ιδιότητα της γραμμής που έχει εξαχθεί και συνταυτιστεί.

Κατ’ αρχάς εφόσον το γραμμικό στοιχείο εξαχθεί και συνταυτιστεί στις δύο εικόνες είναι γνωστά τα υψόμετρα κάθε σημείου του. Συνεπώς είναι γνωστή η κλίση του. Δεν υπάρχει όμως κάποια αντιστοιχία ανάμεσα στον τύπο κλίσης και στο εάν η γραμμή είναι γραμμή ασυνέχειας (πχ. σχέση της μορφής επίπεδη γραμμή \Rightarrow γραμμή ασυνέχειας). Εδώ έγκειται και η χρησιμότητα του ψηφιακού μοντέλου που παράγεται από το νέφος σημείων (μέθοδος παρούσας εργασίας). Το ζητούμενο είναι η συσχέτιση του ψηφιακού μοντέλου με το γραμμικό στοιχείο (την 3D ανακατασκευή του) για να εξαχθεί το συμπέρασμα αν είναι η όχι γραμμή ασυνέχειας.

Βιβλιογραφία

- Baltsavias E.P., 1991. *Multiphoto Geometrically Constrained Matching*. PhD Thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- Γεωργόπουλος Α., 1998. *Ψηφιακή Φωτογραμμετρία*. Σπουδαστικές σημειώσεις ΕΜΠ.
- Γραμματικόπουλος Λ., 2000. *Ψηφιακή Μονοεικονική Απόδοση με χρήση DTM. Το πρόγραμμα OIS*. Διπλωματική Εργασία, ΤΑΤΜ ΕΜΠ.
- Δερμάνης Α., 1986. *Συνορθώσεις Παρατηρήσεων και Θεωρία Εκτίμησης*. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Δερμάνης Α., 1991. *Αναλυτική Φωτογραμμετρία*. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Grün A., 1996. Least squares matching: a fundamental measurement algorithm. In: Atkinson K.B., *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, pp. 217-255.
- Harris C., Stephens M., 1988. *A Combined Corner and Edge Detector*. Proc. Fourth Alvey Vision Conference, pp. 147-151.
- Heipke C., 1992. *A Global Approach for Least-Squares Image Matching and Surface Reconstruction in Object Space*. In: OEEPE Publ. No. 32.
- Καρράς Γ., *Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στη Φωτογραμμετρία*. Σπουδαστικές σημειώσεις ΕΜΠ.
- P. Kovesi: <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/>
- Lillesand T., Kiefer R., 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 4th Edition.
- Moravec H. P., 1977. Towards automatic visual obstacle avoidance. Proc. 5th *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 584, 1977.
- Moravec H. P., 1979. Visual mapping by a robot rover. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 598-600.
- Μπουτσικάκης Δ., 2003. *Προγραμματισμός και Έλεγχος Γραμμικού Αλγορίθμου Σχετικού Προσανατολισμού με Εφαρμογή του στην Αυτόματη Εύρεση Προσεγγιστικών Τιμών σε Πολυεικονικές Συνορθώσεις*. Διπλωματική εργασία ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
- Πέτσα Ε. 2000. *Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*. Σπουδαστικές Σημειώσεις ΤΕΙ Αθήνας.
- Potuková M., 2005. *Image Matching and its Applications in Photogrammetry*. PhD Thesis, Czech Technical University in Prague.
- Russ J., 1994. *Image Processing Handbook*. CRC Press.

Schenk T., 1999. *Digital Photogrammetry*, Vol.1, TerraScience.

Σκαρλάτος Δ., 2006. *Διερεύνηση της Αυτόματης Επιλογής Παραθύρου Ελαχιστοτετραγωνικής Συνταύτισης και του Ελέγχου Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου χωρίς Δεδομένα Αναφοράς*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Στεντούμης Χ., 2007. *Ελαχιστοτετραγωνική Συνταύτιση Εικόνας – Σύνταξη Προγράμματος και Εφαρμογή στον Αυτόματο Σχετικό Προσανατολισμό Αεροφωτογραφιών*. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

<http://www.cim.mcgill.ca/~dparks/CornerDetector.htm>

