



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

**ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΙΝΑΚΩΝ ΑΝΟΜΟΙΟΤΗΤΩΝ ΒΑΘΟΥΣ ΑΠΟ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ
ΜΕΣΩ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

ΜΑΛΤΕΖΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

**ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΙΝΑΚΩΝ ΑΝΟΜΟΙΟΤΗΤΩΝ ΒΑΘΟΥΣ ΑΠΟ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ
ΜΕΣΩ ΠΥΚΝΗΣ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

ΜΑΛΤΕΖΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής

Ιωαννίδης Χαράλαμπος, Αναπληρωτής καθηγητής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εξεταστική επιτροπή

Γεωργόπουλος Ανδρέας, Καθηγητής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ιωαννίδης Χαράλαμπος, Αναπληρωτής καθηγητής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Καρράς Γεώργιος, Καθηγητής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωαννίδη Χαράλαμπο Αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και για την ενθάρρυνση και τη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας τόσο σε πρακτικά όσο και σε θεωρητικά θέματα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Σοϊλέ Σοφία, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό τόσο για την παροχή δεδομένων όσο και για το συνεχές ενδιαφέρον της για την πορεία της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ την Αδάμ Κατερίνα, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό για τη συμβολή της στο κομμάτι της επιπολικής επανασύστασης των εικόνων.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την ηθική και πρακτική στήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.

Πρόλογος

Με τη συνεχή τεχνολογική εξέλιξη του πεδίου της Όρασης Υπολογιστών, η Ψηφιακή Φωτογραμμετρία ακολούθησε έναν παράλληλο δρόμο ξεπερνώντας τον εαυτό της επανακαθορίζοντας τις κλασσικές της προσεγγίσεις και έννοιες. Τα δύο αυτά πεδία στα πλαίσια μίας διερευνητικής προσπάθειας αποτελούν την αιχμή του δόρατος στις νέες τεχνολογικές εφαρμογές που κάνουν χρήση ψηφιακών εικόνων όπως η ρομποτική, οι αυτόματες ανακατασκευές φωτορεαλιστικών 3D μοντέλων του χώρου κ.α.

Για μία σημαντική περίοδο η απόκτηση ενός ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας (Digital Surface Model) υψηλής ποιότητας βασιζόταν κυρίως στη χρήση συστημάτων LIDAR ή επίγειων σαρωτών. Παράλληλα όμως αναπτύσσονταν μέθοδοι και στέρεο αλγόριθμοι (είτε στα εμπορικά λογισμικά σε φωτογραμμετρικούς σταθμούς είτε σε πιο ερευνητικά μέσω της διαδικασίας της πυκνής συνταύτισης σημείων) που αποσκοπούσαν στην εξαγωγή της πληροφορίας του βάθους αποκλειστικά από την συνταύτιση ψηφιακών εικόνων. Όπως αποδείχθηκε στην πράξη από πολλές εφαρμογές, συγκρίσεις και αξιολογήσεις, η πυκνή συνταύτιση σημείων ξεπερνώντας τις προσδοκίες άλλων μεθοδολογιών (περί εύρεσης σημείων ενδιαφέροντος ή συνταύτισης χαρακτηριστικών), έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει μία εναλλακτική διαδικασία πυκνής συλλογής ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας αντάξιου των συστημάτων LIDAR ή των επίγειων σαρωτών της οποίας η ακρίβεια και η αξιοπιστία αυξάνεται συνεχώς.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί σε πρώτο στάδιο να περιγράψει κάποιες από τις συνήθεις μεθοδολογίες που εφαρμόζονται και ενδείκνυνται σε ζεύγη εναέριων εικόνων. Σε δεύτερο στάδιο εκτελείται πυκνή συνταύτιση σημείων προκειμένου να παραχθούν οι αντίστοιχοι πίνακες ανομοιοτήτων βάθους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται αρχικά στη μελέτη και διερεύνηση των μεθοδολογιών που έχουν επικρατήσει να εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια σε περιπτώσεις εναέριων εικόνων και αφορούν την πυκνή συνταύτιση σημείων. Στη συνέχεια, μετά από μια θεωρητική ανάλυση της διαδικασίας της πυκνής συνταύτισης σημείων γίνεται εφαρμογή της στις περιοχές της Αργιθέας και της Σαντορίνης και εξάγονται οι πίνακες ανομοιοτήτων βάθους των ευρύτερων περιοχών. Πιο αναλυτικά, η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο *πρώτο κεφάλαιο*, γίνεται μία εισαγωγή της έννοιας της ψηφιακής συνταύτισης εικόνων ενώ στη συνέχεια παρατίθενται τα τυπικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την εφαρμογή της. Επίσης, περιγράφεται η γεωμετρία του εκάστοτε ζεύγους εναέριων εικόνων και η έννοια της ανομοιοτήτας βάθους.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* περιγράφεται η διαδικασία και τα στάδια εκτέλεσης της πυκνής συνταύτισης σημείων καθώς επίσης και οι δεσμεύσεις που επιβάλλονται κατά την εφαρμογή της. Επιπλέον, αναφέρονται οι διαδικασίες που εκτελούνται στο στάδιο της προ-επεξεργασίας των εικόνων αλλά και αυτές μετά την εξαγωγή του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους κατά την τελική του επεξεργασία. Τέλος, περιγράφονται οι μεθοδολογίες με τις οποίες γίνεται η αξιολόγηση των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* περιγράφονται οι συνήθεις μέθοδοι με τις οποίες υπολογίζεται ο βαθμός ομοιότητας (κόστος συσχέτισης) μεταξύ των εικονοψηφίδων της εικόνας αναφοράς και της εικόνας αναζήτησης. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση αυτών των μεθόδων και απαριθμούνται τα ισχυρά και αδύνατα σημεία τους κατά την πυκνή συνταύτιση σημείων.

Το *τέταρτο κεφάλαιο* αφορά σε κάποιους από τους επικρατέστερους αλγόριθμους συσχέτισης που εκτελούνται, ώστε να παραχθεί ένας πίνακας ανομοιοτήτων βάθους.

Στο *πέμπτο κεφάλαιο* αναφέρονται διάφορες εφαρμογές στις οποίες εξάγονται πίνακες ανομοιοτήτες βάθους μέσω του τοπικού και ημι-καθολικού αλγορίθμου από εναέριες εικόνες που έχουν αποκτηθεί από διαφορετικά συστήματα λήψης εικόνων.

Στο *έκτο κεφάλαιο* γίνεται αναλυτική περιγραφή όλων των σταδίων που ακολουθούνται με σκοπό την εξαγωγή πινάκων ανομοιοτήτων βάθους για τις περιοχές της Αργιθέας και της Σαντορίνης μέσω της πυκνής συνταύτισης σημείων.

Στο *έβδομο κεφάλαιο* γίνεται σύνοψη των συμπερασμάτων που έχουν εξαχθεί στα προηγούμενα κεφάλαια και παράλληλα παρουσιάζονται προτάσεις και προοπτικές για περαιτέρω έρευνα. Τέλος, οι επιστημονικές εργασίες στις οποίες παραπέμπει το κείμενο αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

*School of Rural and Surveying Engineering
National Technical University of Athens, Greece*

**«EXTRACTION OF DISPARITY MAPS VIA DENSE IMAGE MATCHING
APPLIED ON AERIAL IMAGES»**

Maltezos Evangelos

Diploma Thesis

October, 2013

Abstract

The present Diploma Thesis, initially, is concentrated to the study and investigation of the methodology which commonly is applied in the cases of aerial images concerning the dense image matching. Afterwards, a theoretical review and, as well as, an application of the dense image matching to the regions of Argitheia and Santorini is performed while the disparity maps are extracted.

In the *first chapter*, an introduction to the notion of the image matching is given and furthermore, the various problems occurring during its application are also mentioned. Additionally, the geometry of the aerial image pairs and the notion of the disparity are described.

In the *second chapter*, the procedure and the particular stages for performing the dense image matching, and as well as, the imposed constraints during its application are described.

In the *third chapter*, the conventional methods for calculating the similarity degree (cost) among the pixels of the reference and the match image. In addition, they are compared, while their strong and weak points during the dense image matching procedure are presented.

The *fourth chapter* is concerned to some popular stereo algorithms which have to be executed in order to extract a disparity map.

In the *fifth chapter*, some applications in which the disparity maps are extracted by the local and semi-global algorithm originated from aerial images captured by different image receiving systems.

In the *sixth chapter*, an analytical description of all the total number of stages we followed for deducing the disparity map of the regions of Argitheia and Santorini via the dense image matching method.

In the *seventh chapter*, a summary of the conclusions pointed out by the previous chapters, and as well as, some proposals and prospects for further investigation are presented. Finally, the scientific articles cited in the text are quoted in the bibliography.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Πρόλογος	7
Περίληψη	9
Abstract	11
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	19
1.1 Τυπικά προβλήματα κατά την αυτόματη συνταύτιση εικόνων.....	20
1.2 Γεωμετρία του στερεοζεύγους.....	21
Κεφάλαιο 2: Πυκνή συνταύτιση σημείων	25
2.1 Αξιολόγηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους	26
2.2 Δεσμεύσεις	28
2.2.1 Δέσμευση επιπολικής γεωμετρίας (Eipolar constraint)	29
2.2.2 Δέσμευση εκατέρωθεν συνέπειας (Left-right consistency constraint)	32
2.2.3 Δέσμευση διάταξης των εικονοστοιχείων (Ordering constraint)	33
2.2.4 Δέσμευση ομαλότητας (Smoothness constraint)	34
2.2.5 Δέσμευση ομοιότητας (Similarity constraint)	35
2.3 Προ-επεξεργασία εικόνων	35
2.4 Βελτιστοποίηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους.....	36
Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι Υπολογισμού Κόστους Συσχέτισης	39
3.1 Απόλυτες διαφορές (AD) – Τετραγωνικές διαφορές (SD)	40
3.2 Άθροισμα Απόλυτων διαφορών (SAD) – Άθροισμα τετραγωνικών διαφορών (SSD)	41
3.5 ΒΤ.....	41
3.4 Συντελεστής Συσχέτισης - Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Μεταβλητότητας (NCC)	43
3.5 Αμοιβαία Πληροφορία (MI).....	44
3.5 Συγκρίσεις μεθόδων κόστους συσχέτισης	47
Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμοι Συσχέτισης	53
4.1 Τοπικός Αλγόριθμος (Local Algorithm)	53
4.1.1 Winner Takes All (WTA)	54
4.2 Καθολικός Αλγόριθμος (Global Algorithm).....	55
4.2.1 Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic programming - DP).....	57
4.3 Ημι-καθολικός Αλγόριθμος (Semi Global Algorithm - SGM).....	61
Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές σε εναέριες εικόνες με τον τοπικό και τον ημι-καθολικό αλγόριθμο	65

5.1 Εφαρμογές με κατακόρυφες εικόνες.....	65
5.2. Εφαρμογές με πλάγιες εναέριες εικόνες.....	68
5.3 Εφαρμογές με εναέριες εικόνες από δέκτες τύπου Pushbroom	69
5.4 Εφαρμογές με εικόνες από μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)	71
Κεφάλαιο 6: Εφαρμογή.....	75
6.1 Λογισμικό.....	75
6.2 Περιοχές εφαρμογής.....	78
6.2.1 Γενικά στοιχεία.....	78
6.2.2 Προγραμματισμός λήψης των εικόνων	80
6.3 Επιπολική επανασύσταση εικόνων.....	84
6.4 Πυκνή συνταύτιση σημείων	88
6.4.1 Περίπτωση Αργιθέας	88
6.4.2 Περίπτωση Σαντορίνης	100
6.5 Έλεγχος των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους.....	108
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα-Προοπτικές	111
Βιβλιογραφία.....	115

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1 Οι δύο περιπτώσεις αποκρύψεων ομόλογων σημείων σε επίγεια λήψη. Το σημείο (PV) είναι ορατό και στις δύο εικόνες ενώ το σημείο (P0) αποκρύπτεται στη μία.....	21
Σχήμα 1.2 Η κανονική περίπτωση του ζεύγους εναέριας λήψεων.....	22
Σχήμα 1.3 (α) Γενική περίπτωση εικόνας με στροφές ως προς το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (β) Ασυμβατότητα ομόλογων ακτίνων σε ζεύγος εικόνων με μικρές στροφές.....	24
Σχήμα 2.1 (α),(β) Αριστερή και δεξιά εικόνα από σει επίγειων πειραματικών δεδομένων του Πανεπιστημίου Middlebury.....	28
Σχήμα 2.2 Επιπολική γεωμετρία του στερεοζεύγους και δέσμες επιπολικών επιπέδων και ευθειών.....	30
Σχήμα 2.3 Σχέση κανονικοποιημένων και επιπολικών εικόνων.....	32
Σχήμα 2.4 Αντιστροφή ρόλων αριστερής (I1) και δεξιάς (I2) εικόνας ως εικόνα αναφοράς κατά τη δέσμευση εκατέρωθεν συνέπειας.....	33
Σχήμα 2.5 Περίπτωση λεπτών αντικειμένων στο έμπροσθεν της σκηνής.....	34
Σχήμα 2.6 Σωστή (αριστερά) και λανθασμένη (δεξιά) σχετική θέση μεταξύ των εικονοστοιχείων.....	34
Σχήμα 2.7 Περίπτωση ασυνεχειών στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους (όρια βιβλίου με τον τοίχο).....	36
Σχήμα 2.8 Προβλήματα κατά την συνταύτιση σε περιοχές με έλλειψη υψής και περίπτωση ακραίων τιμών (peaks) σε τμήματα του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Οι μαύρες περιοχές απεικονίζουν τις άκυρες ανομοιοότητες βάθους από αναντιστοιχίες ή αποκρύψεις.....	37
Σχήμα 2.9 Περίπτωση άκυρων ανομοιοτήτων βάθους λόγω αποκρύψεων (p1) ή λόγω.....	38
αναντιστοιχιών (p2).....	38
Σχήμα 3.1 Επιφανειακή συνταύτιση με τη χρήση ψηφιακών παραθύρων.....	40
Σχήμα 3.2 Μέθοδος υπολογισμού του κόστους συσχέτισης με τη μέθοδο BT... 43	43
Σχήμα 3.3 Υπολογισμός της κοινής εντροπίας $hI1,I2$. Οι φωτεινότερες περιοχές αντιπροσωπεύουν χαμηλότερες τιμές της κοινής εντροπίας.....	45
Σχήμα 4.1 Παράδειγμα υπολογισμού της ανομοιοτήτας βάθους με τη μέθοδο WTA υπολογίζοντας το συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης με τη μέθοδο SSD. 55	55
Σχήμα 4.2 Πρώτος και δεύτερος τρόπος δόμησης του DSI. Στις πάνω εικόνες παρουσιάζονται πραγματικές περιπτώσεις DSI ενώ στις κάτω εικόνες παραδείγματα όπου είναι εμφανής η ελάχιστη σε κόστος διαδρομή με φωτεινότερες εικονοψηφίδες αυτές με το μικρότερο κόστος συσχέτισης.	58
Σχήμα 4.3 Μεθοδολογία υπολογισμού του DSI με άξονες την ανομοιοτητα βάθους και την αριστερή γραμμή σάρωσης.....	59

Σχήμα 4.4 Παράδειγμα δομής DSI μετά την κατωφλίωση.....	59
Σχήμα 4.5 Διαμόρφωση της ελάχιστης σε κόστος διαδρομής (μετά την κατωφλίωση του DSI) από τις εικονοψηφίδες που έχουν τον χαρακτηρισμό M (ταυτισμένες), L (ορατές μόνο από αριστερά) και R (ορατές μόνο από δεξιά).....	60
Σχήμα 4.6 Η εικόνα αναφοράς και αναζήτησης και η επιλογή των ελαχίστων κοστών συσχέτισης από τη δομή $N \times M \times H$	63
Σχήμα 4.7 Η ελάχιστη σε κόστος διαδρομή στο Disparity Space Image (αριστερά) και οι 16 ή 8 κατευθύνσεις τους κατά τη διαδικασία συσσωμάτωσης στην εικόνα αναφοράς (δεξιά).	63
Σχήμα 5.1 Λόγοι B/H και συνδυασμοί εικόνων.....	66
Σχήμα 5.2 (α), (β) Εικόνες στερεοζεύγους (γ) Πίνακας βάθους με τον ημι-καθολικό αλγόριθμο και τη μέθοδο MI (δ) Νέφος σημείων από την ανακατασκευή της περιοχής ενδιαφέροντος.	67
Σχήμα 5.3 (α) Αριστερή πλάγια εικόνα (β) Νέφος σημείων μέσω του ημι-καθολικού αλγορίθμου με τη μέθοδο MI (γ) Νέφος σημείων αναφοράς από το σύστημα LIDAR.	69
Σχήμα 5.4 Τμήματα διορθωμένων εικόνων μία λωρίδας λήψης από την φωτομηχανή HRSC-AX.	70
Σχήμα 5.5 (α), (β) DSM που προέκυψαν από τον ημι-καθολικό αλγόριθμο με τη μέθοδο MI και τον τοπικό αλγόριθμο με τον συντελεστή συσχέτισης αντίστοιχα (γ) Ορθοφωτογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος (δ) Τρισδιάστατη ανακατασκευή της περιοχής ενδιαφέροντος.	71
Σχήμα 5.6 Αριστερά: Λωρίδες πτήσης και σημεία λήψης των φωτογραφιών του συνολικού μπλοκ. Δεξιά: Περίπτωση μεμονωμένης εικόνας. Η έγχρωμη διαβάθμιση και στις δύο εικόνες απεικονίζει το πλήθος των φωτογραφιών στις οποίες απεικονίζεται η κάθε περιοχή.	72
Σχήμα 5.7 (α) Εικόνα στερεοζεύγους (β) Πίνακας ανομοιοτήτων βάθους που προέκυψε από τον ημι-καθολικό αλγόριθμο με τη μέθοδο MI (γ) Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος της περιοχής ενδιαφέροντος.	73
Σχήμα 6.1 Ελάχιστη και μέγιστη ανομοιοότητα βάθους.	76
Σχήμα 6.2 Απόσπασμα της περιοχής της Αργιθέας	79
Σχήμα 6.3 Απόσπασμα της περιοχής της Σαντορίνης	79
Σχήμα 6.4 Εικόνες που αποκτήθηκαν για την περιοχή της Αργιθέας.	83
Σχήμα 6.5 Εικόνες που αποκτήθηκαν για την περιοχή της Σαντορίνης.	84
Σχήμα 6.6 Στερεοζεύγη επιπολικών εικόνων για την περιοχή της Αργιθέας.....	87
Σχήμα 6.7 Στερεοζεύγη επιπολικών εικόνων για την περιοχή της Σαντορίνης.	88
Σχήμα 6.8 Στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48. (α) Επιλογή του επικαλυπτόμενου τμήματος για την αριστερή εικόνα (β) Μετάθεση της «μάσκας» για τη δεξιά εικόνα (γ) Επιλογή του επικαλυπτόμενου τμήματος για τη δεξιά εικόνα.	89

Σχήμα 6.9	Επικαλυπτόμενο τμήμα του στερεοζεύγους IMG_47-IMG_48. (α) Αριστερή εικόνα (β) Δεξιά εικόνα (γ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο BM (δ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο SGBM.....	90
Σχήμα 6.10	Εξαγωγή ενιαίου πίνακα βάθους του στερεοζεύγους IMG_45-IMG_46 σε δύο φάσεις με σταθερή την τιμή της παραμέτρου number_of_disparities=80. (α),(δ) Αριστερή εικόνα (β),(ε) Δεξιά εικόνα (γ),(ζ) Επιμέρους πίνακες βάθους με τον αλγόριθμο SGBM (θ) Ενιαίος πίνακας βάθους.....	92
Σχήμα 6.11	Εξαγωγή ενιαίου πίνακα βάθους του στερεοζεύγους IMG_45-IMG_46 σε μία φάση με αύξηση της τιμής της παραμέτρου number_of_disparities=128. (α) Αριστερή εικόνα (β) Δεξιά εικόνα (γ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο SGBM.	93
Σχήμα 6.12	Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου BM στο στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγείσες τιμές.	95
Σχήμα 6.13	Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου SGBM στο στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγείσες τιμές.	96
Σχήμα 6.14	Ενιαίος πίνακας ανομοιοτήτων βάθους της ευρύτερης περιοχής...	99
Σχήμα 6.15	(α) Αριστερό επιμέρους τμήμα του στερεοζεύγους IMG_25-IMG_23 (β) Δεξί επιμέρους τμήμα του στερεοζεύγους IMG_25-IMG_23 (γ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο BM (δ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο SGBM (ε) Ενιαίος πίνακας βάθους με το αλγόριθμο SGBM από τη σύνθεση των τεσσάρων επιμέρους τμημάτων.	101
Σχήμα 6.16	(α) Αριστερή εικόνα (β) Δεξιά εικόνα (γ) Επίδραση περιοχών με έλλειψη υψής και κινούμενων αντικειμένων κατά την εξαγωγή του πίνακα βάθους.....	102
Σχήμα 6.17	Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου BM στο στερεοζεύγος IMG_25-IMG_23. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγείσες τιμές.	104
Σχήμα 6.18	Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου SGBM στο στερεοζεύγος IMG_25-IMG_23. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγείσες τιμές.	105
Σχήμα 6.19	Ενιαίος πίνακας ανομοιοτήτων βάθους της ευρύτερης περιοχής.	107

Κεφάλαιο 1:

Εισαγωγή

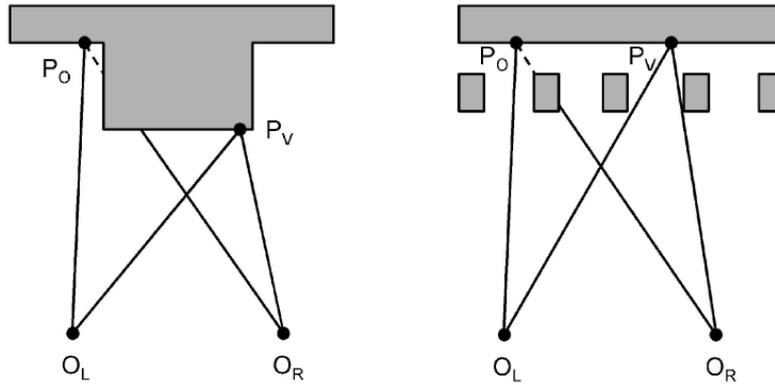
Με τον όρο συνταύτιση καλείται ή εύρεση αντιστοίχισης μεταξύ δύο συνόλων τα οποία μπορεί να είναι εικόνες ή μοντέλα αντικειμένων ή χάρτες κ.α. Η ψηφιακή συνταύτιση εικόνων όπου αποσκοπεί στην αυτόματη εύρεση ομολογιών μεταξύ δύο ή περισσότερων εικόνων, αποτελεί το βασικό συστατικό της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας. Στην Ψηφιακή Φωτογραμμετρία τα πεδία εφαρμογής της αυτόματης συνταύτισης εικόνων όπου δίνονται λύσεις σε πολλά φωτογραμμετρικά προβλήματα όπως ο αυτόματος εσωτερικός προσανατολισμός, ο αυτόματος σχετικός προσανατολισμός, ο αυτόματος αεροτριγωνισμός κ.α. είναι αρκετά (βλ. [1]). Για την υλοποίηση αυτών των αυτόματων διαδικασιών οι μέθοδοι συνταύτισης που χρησιμοποιούνται είναι η επιφανειακή συνταύτιση, η συνταύτιση χαρακτηριστικών και η σχεσιακή συνταύτιση. Η πυκνή συνταύτιση σημείων αποτελεί μία επιπλέον αυτόματη διαδικασία που όπως φαίνεται τείνει να δώσει μία ολοκληρωμένη λύση για τη δημιουργία ενός πυκνού και ποιοτικού ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας ενός αντικειμένου με μεγαλύτερη αντικειμενικότητα, οικονομία και ταχύτητα σε σχέση με τις άλλες διαδικασίες που μέχρι πρότινος εφαρμόζονταν (κλασικές στερεοσκοπικές μέθοδοι, χρήση συστημάτων LIDAR ή επίγειων σαρωτών κ.α.).

1.1 Τυπικά προβλήματα κατά την αυτόματη συνταύτιση εικόνων

Τα σημαντικότερα προβλήματα που εντοπίζονται κατά την αυτόματη εύρεση ομολογιών έχουν να κάνουν με την γεωμετρία της λήψης των εικόνων αλλά και με άλλους παράγοντες όπως οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις, η σύνθετη γεωμετρία της σκηνής κ.α.

Η γεωμετρία της λήψης των εικόνων είναι ζήτημα βαρύνουσας σημασίας, καθώς εμπλέκει αρκετούς παράγοντες οι οποίοι μπορεί να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα. Ως γνωστόν, το πεδίο της Φωτογραμμετρίας δίνει ιδιαίτερη έμφαση στον προγραμματισμό της λήψης των εικόνων για την ελαχιστοποίηση των διαφόρων προβλημάτων, όπως για παράδειγμα αυτό της εκτροπής λόγω αναγλύφου και κατ' επέκταση των αποκρύψεων. Όπου το ανάγλυφο του αντικειμένου μεταβάλλεται απότομα, παρουσιάζονται μεγαλύτερες προοπτικές παραμορφώσεις (που συνεπάγονται αλλαγή σχήματος των αντικειμένων μεταξύ των εικόνων) και αποκρύψεις. Το πρόβλημα των αποκρύψεων παίζει σημαντικό ρόλο στην πυκνή συνταύτιση σημείων, καθώς σχετίζεται άμεσα με την απουσία πληροφορίας στις εικόνες και άρα με τη μη δυνατή εύρεση ομολογιών σε εκείνες τις περιοχές. Για την ελαχιστοποίησή τους απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ του φακού της μηχανής, της κλίμακας των εικόνων, της απόστασης από το αντικείμενο, της απόστασης μεταξύ των λωρίδων λήψης, της βάσης λήψης των εικόνων και του λόγου της βάσης λήψης προς την απόσταση από το αντικείμενο. Συνήθως η βάση λήψης των εικόνων επιλέγεται να είναι μικρή, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αποκρύψεις και οι ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των ομόλογων σημείων. Ωστόσο, για μικρές βάσεις λήψης αυτή η τεχνική μειονεκτεί ως προς την ακρίβεια λόγω της δυσμενούς γεωμετρίας μεταξύ των ομόλογων ακτίνων. Όλη η παραπάνω προσέγγιση εξασφαλίζει την ορατότητα των σημείων ακόμα και σε περισσότερες από δύο εικόνες αποκτώντας έτσι πλεονάζουσα πληροφορία. Επίσης, σημαντική επιρροή στην συνταύτιση εικόνων ασκούν οι διαφορές της κλίμακας και των στροφών μεταξύ των εικόνων (ειδικά στις περιπτώσεις της επίγειας Φωτογραμμετρίας) .

Οι περιπτώσεις αποκρύψεων διακρίνονται στις κλασικές αποκρύψεις και σε αυτές λόγω λεπτών αντικειμένων εμπροσθεν της σκηνής (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Οι δύο περιπτώσεις αποκρύψεων ομόλογων σημείων σε επίγεια λήψη. Το σημείο (P_V) είναι ορατό και στις δύο εικόνες ενώ το σημείο (P_0) αποκρύπτεται στη μία (half-occluded). [2]

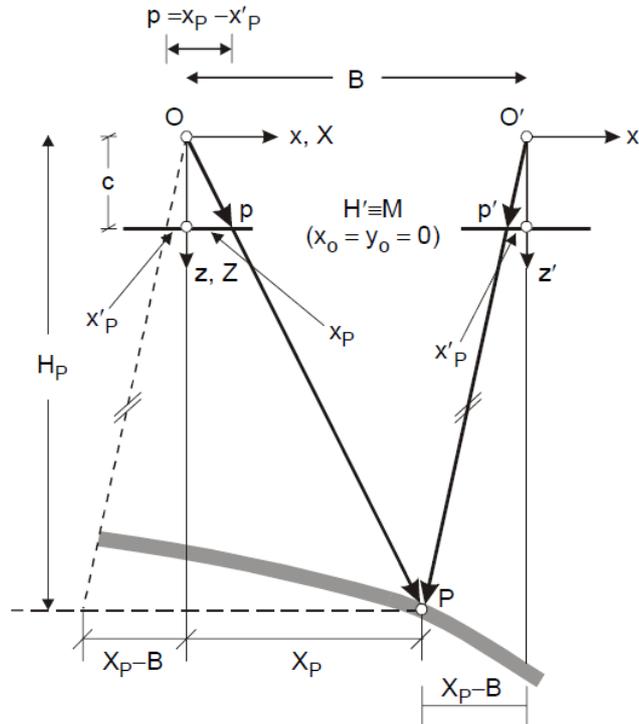
Η δεύτερη περίπτωση αποκρύψεων παρόλο που δεν συναντάται συχνά, έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές όπως τους Dhond and Aggarwal (1992), οι οποίοι χαρακτήρισαν αυτά τα αντικείμενα βάσει των διαστάσεων τους όπως αυτά απεικονίζονται στις εικόνες. Σημειώνεται πως αυτού του είδους οι αποκρύψεις παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυσκολίες σε σχέση με τις κλασικές, παρόλα αυτά όμως αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο. Ο εντοπισμός των αποκρύψεων γίνεται με αρκετές μεθόδους όπως με τη χρήση δεσμεύσεων (π.χ. τη δέσμευση εκατέρωθεν συνέπειας ή τη δέσμευση διάταξης των εικονοστοιχείων), με την παρουσία ασυνεχειών στον πίνακα ανομοιότητας βάθους κ.λπ. Η αντιμετώπιση του προβλήματος των αποκρύψεων γίνεται συνήθως μετά τη συνταύτιση εικόνων στο στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης (βλ. Κεφ.2.4).

Άλλα προβλήματα που συναντώνται στη συνταύτιση εικόνων είναι οι ραδιομετρικές παραμορφώσεις όπως ο θόρυβος, οι ανακλάσεις, οι διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, οι σκιές, η χαμηλή ανάλυση της δειγματοληψίας της εικόνας αλλά και τα κινούμενα αντικείμενα. Επίσης, σημαντικά προβλήματα προκαλούν τα επαναλαμβανόμενα αντικείμενα, η έλλειψη υψής (π.χ. υδάτινες επιφάνειες), η βλάστηση κ.α.

1.2 Γεωμετρία του στερεοζεύγους

Στην κανονική περίπτωση ζεύγους εναέριων λήψεων ο άξονας της λήψης Z είναι κατακόρυφος (παράλληλος στη διεύθυνση του βάθους) και οι άξονες x, y των εικονοσυντεταγμένων είναι παράλληλοι προς τους άξονες του γεωδαιτικού συστήματος (ή οποιοδήποτε συστήματος του χώρου) X, Y αντίστοιχα. Επίσης,

θεωρείται πως η διεύθυνση πτήσης του αεροσκάφους είναι παράλληλη στον άξονα X και πως οι εικόνες έχουν ληφθεί από το ίδιο υψόμετρο πτήσης. Συνεπώς, οι δύο άξονες λήψης είναι παράλληλοι μεταξύ τους και κάθετοι στη βάση λήψης B και οι εικόνες δεν έχουν στροφές ως προς το γεωδαιτικό σύστημα (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Η κανονική περίπτωση του ζεύγους εναέριων λήψεων. [3]

Η φαινομενική μετατόπιση της θέσης ενός σημείου, ως προς ένα άλλο διαφορετικού υψομέτρου ή ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς, η οποία προκαλείται από την αλλαγή της θέσης παρατήρησης, καλείται παράλλαξη. Η παράλλαξη αποτελείται από δύο συνιστώσες, την οριζόντια x-παράλλαξη (p_x) και την κατακόρυφη y-παράλλαξη (p_y). Η x-παράλλαξη ορίζεται ως :

$$p_x = x_p - x'_p \quad (1.1)$$

Από τα σχηματιζόμενα όμοια τρίγωνα του Σχήματος 1.2 (και αναλόγως για τη διεύθυνση y) προκύπτει,

$$\frac{x_p}{X_p} = \frac{c}{H_p} \quad \frac{p_x}{B} = \frac{c}{H_p} \quad \frac{y_p}{Y_p} = \frac{c}{H_p} \quad (1.2)$$

και άρα,

$$X_p = \frac{B}{p_x} x_p \quad Y_p = \frac{B}{p_x} y_p = \frac{B}{p_x} y'_p \quad H_p = \frac{B}{p_x} c \quad (1.3)$$

Από τις εξισώσεις 1.3 προκύπτει πως οι τρισδιάστατες συντεταγμένες του σημείου P στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς μπορούν να προσδιοριστούν με μετρήσεις της x-παράλλαξης με δεδομένες την βάση B του στερεοζεύγους και την σταθερά c της μηχανής. Είναι προφανές πως η p_x είναι μεγαλύτερη για τα υψηλότερα σημεία και μικρότερη για τα χαμηλότερα σημεία και έχει άμεση σχέση με τη γωνία σύγκλισης των ομόλογων ακτίνων (παραλλακτική γωνία). Παρόλο που υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης των συντεταγμένων X_p και Y_p από τις εξισώσεις (1.3) μέσω της p_x , ωστόσο οι μετρήσεις της p_x χρησιμοποιούνται κατά κανόνα για τον υπολογισμό απόλυτων υπομέτρων ή υπομετρικών διαφορών¹. Όσον αφορά την y-παράλλαξη p_y , ορίζεται ως :

$$p_y = Y_p - Y'_p \quad (1.4)$$

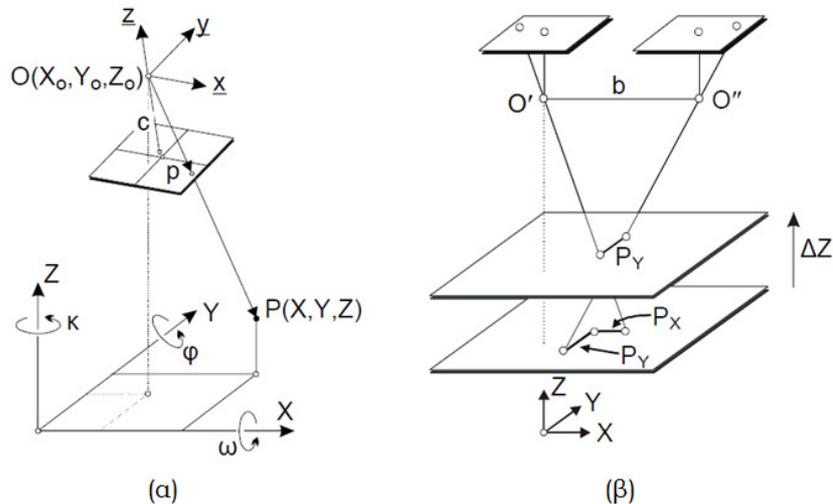
Η y-παράλλαξη επηρεάζεται μόνο από τη διεύθυνση πτήσης του αεροσκάφους. Συνεπώς, στην κανονική περίπτωση ζεύγους λήψεων ισχύει $y_p = y'_p$ και άρα προκύπτει $p_y = 0$.

Ωστόσο, στην γενική περίπτωση εικόνων όπου οι συνθήκες λήψεις είναι πραγματικές, οι εικόνες έχουν στροφές ω , ϕ , κ περί τους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τα συστήματα xyz και XYZ να μην είναι παράλληλα (Σχήμα 1.3.α). Επίσης, το υπόμετρο πτήσης H_p δεν διατηρείται σταθερό ενώ οι άξονες πτήσης δεν είναι συγγραμμικοί. Βάσει των παραπάνω οι ομόλογες ακτίνες είναι ασύμβατες ευθείες στον χώρο και η διαφορά των τομών τους είναι οι παραλλάξεις p_x και p_y (Σχήμα 1.3.β).

Ενώ η ποσότητα p_x αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υπολογισμό των υπομέτρων, η ποσότητα p_y (η οποία στην γενική περίπτωση ζεύγους εικόνων δεν είναι μηδενική), πρέπει να απαλείφεται, ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης. Στις εφαρμογές της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών η y-παράλλαξη απαλείφεται με την επιπολική

¹ Από την διαφορά x-παραλλάξεων δύο σημείων $\Delta p_{12} = p_{x1} - p_{x2}$, μπορεί να προκύψει η υπομετρική τους διαφορά ΔH_{12} (βλ. [4]).

επανασύσταση (κανονικοποίηση) του στερεοζεύγους, ώστε να διευκολύνεται η αυτόματη αναζήτηση ομολογιών (βλ. Κεφ.2.2.1).



Σχήμα 1.3 (α) Γενική περίπτωση εικόνας με στροφές ως προς το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (β) Ασυμβατότητα ομολογων ακτίνων σε ζεύγος εικόνων με μικρές στροφές. [3]

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως η κανονική και η γενική περίπτωση ζεύγους επίγειων λήψεων ισχύει με όμοιο τρόπο όπως αυτή των εναέριων λήψεων με την διαφορά ότι το επίγειο σύστημα είναι στραμμένο κατά 90° . Δηλαδή, ο άξονας X είναι ο παράλληλος άξονας στη διεύθυνση λήψης, ο άξονας Y είναι ο κατακόρυφος άξονας και ο άξονας Z είναι ο άξονας λήψης (παράλληλος στη διεύθυνση του βάθους).

Αναφέρεται πως για λόγους συμβατότητας με την βιβλιογραφία, η x-παράλλαξη στο εξής θα καλείται «*ανομοιότητα βάθους*» (disparity) και ο πίνακας των x-παραλλάξεων θα καλείται «*πίνακας ανομοιοτήτων βάθους*» ή «*πίνακας βάθους*» (disparity map ή depth map).

Κεφάλαιο 2:

Πυκνή συνταύτιση σημείων

Η πυκνή συνταύτιση σημείων είναι μία διαδικασία συνταύτισης εικόνων, για να βρίσκονται ομολογίες για όλα τα σημεία της εικόνας (δηλαδή για όλες τις εικονοψηφίδες) και όχι μόνο για διακριτά σημεία ενδιαφέροντος ή «πρόσφορα» σημεία [5]. Το τελικό προϊόν μετά την πυκνή συνταύτιση σημείων είναι ένας πίνακας ανομοιοτήτων βάθους. Ο πίνακας αυτός εμπεριέχει οπτικοποιημένη την ανομοιότητα βάθους του κάθε εικονοστοιχείου της εικόνας αναφοράς που αντιπροσωπεύει ένα σημείο στον χώρο, μεταφέροντας την πληροφορία της τρίτης διάστασης (στη διεύθυνση του βάθους). Στην στέρεο συνταύτιση εικόνας ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους προκύπτει από τουλάχιστον δύο εικόνες (την εικόνα αναφοράς και την εικόνα αναζήτησης) και είναι χρήσιμος για την ανακατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων αλλά και για άλλες φωτογραμμετρικές διαδικασίες όπως ορθοφωτογραφίες κ.α. Για την πλήρη ανακατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου χρησιμοποιούνται περισσότερες από δύο εικόνες με βάση κάποιες κεντρικές εικόνες αναφοράς (multiple image matching), ώστε να συλλεχθεί όλη η απαραίτητη πληροφορία και να παραχθούν περισσότεροι πίνακες ανομοιοτήτων βάθους. Οι Scharstein και Szeliski (2002) περιέγραψαν τα τέσσερα βασικά στάδια που εκτελούνται στην πυκνή συνταύτιση σημείων:

1. Υπολογισμός του Κόστους Συσχέτισης (Matching Cost Computation)
2. Συσσωμάτωση Κοστών Συσχέτισης (Cost Aggregation)
3. Υπολογισμός της Ανομοιότητας Βάθους (Disparity Computation)
4. Βελτιστοποίηση της Ανομοιότητας Βάθους (Disparity Refinement)

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης (cost) το οποίο μετρά το βαθμό ομοιότητας μεταξύ της κάθε εικονοψηφίδας στην εικόνα αναφοράς με την κάθε πιθανή ομόλογή της στην εικόνα αναζήτησης με ανομοιότητα βάθους d . Ο υπολογισμός τους κόστους συσχέτισης γίνεται με διάφορους τρόπους οι οποίοι περιγράφονται στο Κεφ.3 .

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η υπόθεση πως οι γειτονικές εικονοψηφίδες μίας περιοχής υποστήριξης (ψηφιακό παράθυρο) στην εικόνα αναφοράς, αναφέρονται στην ίδια ανομοιότητα βάθους με την κεντρική. Βάσει αυτής της υπόθεσης τα κόστη συσχέτισης των εικονοψηφίδων που βρίσκονται στην περιοχή υποστήριξης και το κόστος συσχέτισης της κεντρικής συναθροίζονται υπολογίζοντας στο τέλος ένα συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης (βλ. Κεφ.3).

Στο τρίτο στάδιο υπολογίζεται ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους. Το κάθε στοιχείο αυτού του πίνακα απεικονίζει τη βέλτιστη ανομοιότητα βάθους της κάθε εικονοψηφίδας που σχετίζεται είτε με το ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης (βλ. Κεφ.4.1) είτε με τη συνάρτηση ενέργειας που ελαχιστοποιεί (βλ. Κεφ.4.2 και Κεφ.4.3).

Στο τέταρτο στάδιο γίνεται η βελτιστοποίηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους όπου γίνονται διορθώσεις από προβλήματα που έχουν προκύψει αναντιστοιχίες, αποκρύψεις κ.α. (βλ. Κεφ.2.4).

Σημειώνεται πως η σειρά των παραπάνω σταδίων εξαρτάται από τη μέθοδο υπολογισμού του κόστους συσχέτισης και από τον αλγόριθμο συσχέτισης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η περίπτωση του συντελεστή συσχέτισης (NCC) όπου τα στάδια 1 και 2 εκτελούνται ταυτόχρονα και αυτή της καθολικής μεθόδου όπου αγνοείται το στάδιο 3.

2.1 Αξιολόγηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους

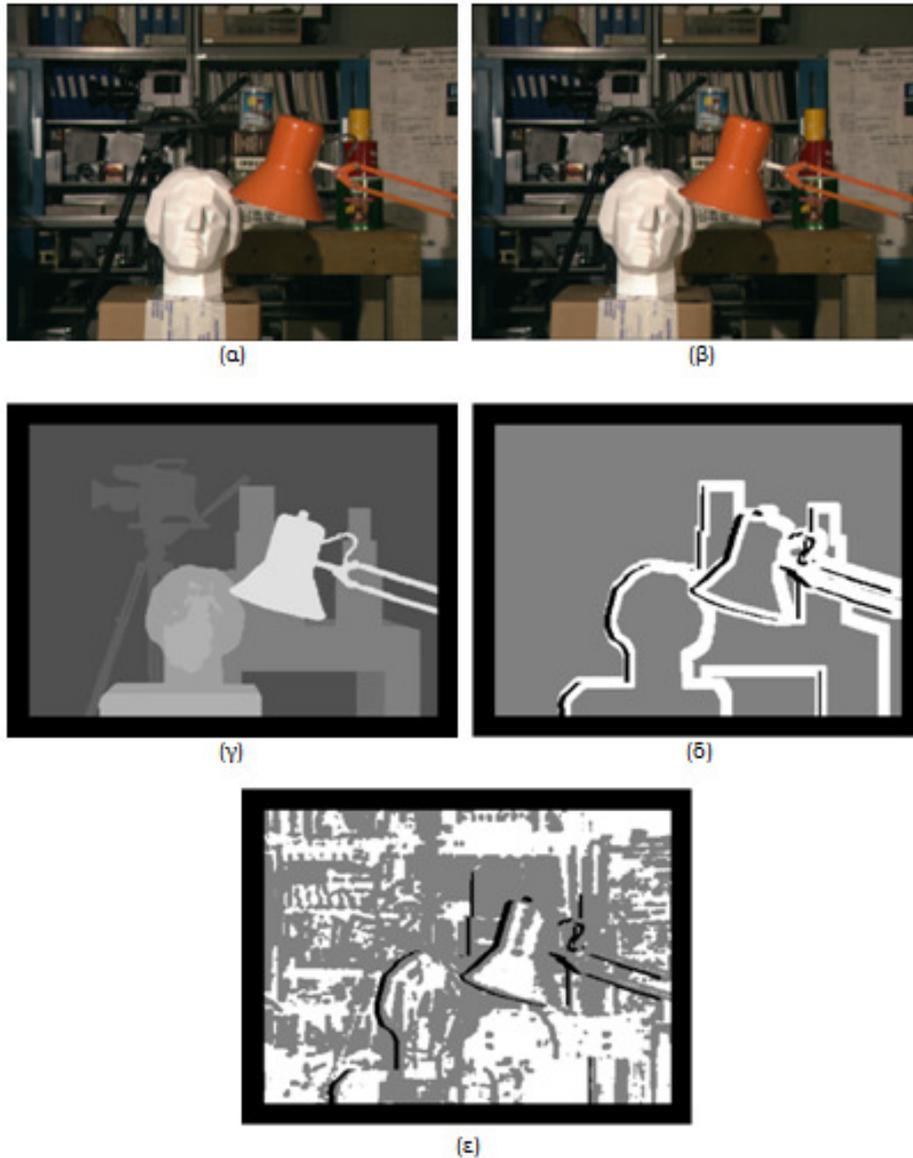
Η αξιολόγηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους και γενικότερα των αλγορίθμων συσχέτισης γίνεται με τη χρήση δεικτών, με οπτικό έλεγχο ή με άλλες διαδικασίες

ελέγχων όπως συγκρίσεις ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας και νεφών σημείων από συστήματα LIDAR ή επίγειους σαρωτές. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το ποσοστό των κακώς συνταυτισμένων σημείων και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) μεταξύ του υπολογιζόμενου πίνακα ανομοιοτήτων βάθους D_c και αυτού που έχει προκύψει από δεδομένα υψηλής ακρίβειας (π.χ. με σαρωτή) ο οποίος καλείται ground truth map (D_T),

$$RMS = \pm \sqrt{\frac{[\nu\nu]}{N}} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{[|\nu| > \delta_D]}{N} \quad (2.2)$$

όπου $\nu = D_c(x, y) - D_T(x, y)$, N ο συνολικός αριθμός των εικονοψηφίδων και δ_D η ανοχή (κατώφλι) της διαφοράς της ανομοιότητας βάθους μεταξύ των εικονοστοιχείων των D_c και D_T . Στο [6] χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον δείκτες στο στάδιο της προ-επεξεργασίας μεταξύ της εικόνας αναφοράς και του ground truth map και αφορούσαν περιοχές με ασυνέχειες βάθους, περιοχές με αποκρύψεις και περιοχές με έλλειψη υψής (Σχήμα 2.1). Ο υπολογισμός των στατιστικών αυτών των περιοχών γίνεται με όμοιο τρόπο όπως η εξίσωση (2.2) με τη χρήση κατωφλίων τα οποία παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο γενικότερα στην πυκνή συνταύτιση σημείων και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις αποδόσεις των αλγορίθμων συσχέτισης.



Σχήμα 2.1 (α),(β) Αριστερή και δεξιά εικόνα από σει επιγείων πειραματικών δεδομένων του Πανεπιστημίου Middlebury² (γ) Ground truth map (δ) Περιοχές κοντά σε ασυνέχειες βάθους (άσπρες περιοχές) και περιοχές με αποκρύψεις (μαύρες περιοχές) (ε) Περιοχές με έλλειψη υψής (άσπρες περιοχές). [6], [7]

2.2 Δεσμεύσεις

Η επιβολή δεσμεύσεων στην πυκνή συνταύτιση σημείων βοηθά στην επίτευξη ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Οι δεσμεύσεις που εφαρμόζονται διαφέρουν ανάλογα με τον αλγόριθμο συσχέτισης που πρόκειται να

² Στην ιστοσελίδα του Πανεπιστημίου Middlebury (βλ. [7]) υποβάλλονται από ερευνητές που ασχολούνται με την πυκνή συνταύτιση σημείων αλγόριθμοι συσχέτισης οι οποίοι αξιολογούνται και κατατάσσονται ανάλογα με τις επιδόσεις τους σε συγκεκριμένα σει δεδομένων.

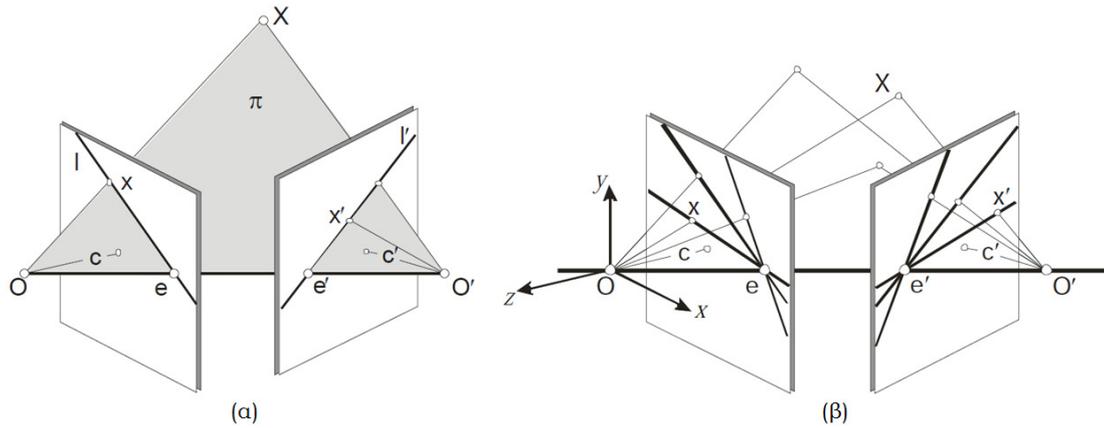
χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, κάποιες από αυτές όπως για παράδειγμα η δέσμευση της επιπολικής γεωμετρίας επιβάλλεται σε όλους τους αλγόριθμους συσχέτισης καθώς μειώνει σημαντικά τον χρόνο αναζήτησης ομολογιών. Στο [8] μπορεί να βρει κανείς εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται αρκετές δεσμεύσεις. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται κάποιες από αυτές.

2.2.1 Δέσμευση επιπολικής γεωμετρίας (Eipolar constraint)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την απαλοιφή της y -παράλλαξης³ γίνεται η επιπολική επανασύσταση (κανονικοποίηση) του στερεοζεύγους ώστε να διευκολύνεται η αυτόματη αναζήτηση ομόλογων σημείων. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της επιπολικής γεωμετρίας μετασχηματίζοντας τις δύο εικόνες στο σύστημα της βάσης λήψης ώστε οι δύο άξονες λήψης να είναι κάθετοι σε αυτήν και παράλληλοι μεταξύ τους, ενώ οι άξονες x των εικόνων να συμπίπτουν με τις γραμμές της κάθε ψηφιακής εικόνας [9].

Η επιπολική γεωμετρία περιλαμβάνει τις έννοιες του επιπολικού επιπέδου και των επιπολικών ευθειών. Το επιπολικό επίπεδο είναι το επίπεδο που δημιουργούν η βάση λήψης του στερεοζεύγους OO' με τα δύο διανύσματα που συνδέουν τα σημεία λήψης O και O' των εικόνων με ένα σημείο του χώρου X . Τα ίχνη του επιπέδου π στα επίπεδα των εικόνων αποτελούν τις επιπολικές ευθείες I και I' και οι τομές της βάσης λήψης με αυτά καλούνται πόλοι (e, e') (Σχήμα 2.2.α). Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα σημεία του χώρου ορίζουν δέσμη επιπολικών επιπέδων, αξονική ως προς την βάση, η οποία με την σειρά της ορίζει επί των εικόνων δύο ομόλογες επίπεδες δέσμες επιπολικών ευθειών με κορυφές τους πόλους [10] (Σχήμα 2.2.β).

³ Στην πράξη τα εναπομένοντα σφάλματα του σχετικού προσανατολισμού δεν επιτρέπουν τον πλήρη μηδενισμό της y -παράλλαξης και για τον λόγο αυτό ανεκτές τιμές της y -παράλλαξης θεωρούνται αυτές που δεν ξεπερνούν συνήθως το 1 pixel.



Σχήμα 2.2 Επιπολική γεωμετρία του στερεοζεύγους και δέσμες επιπολικών επιπέδων και ευθειών.
[9], [10]

Η επιπολική επανασύσταση (κανονικοποίηση) του στερεοζεύγους μπορεί να γίνει αν σε πρώτο στάδιο είναι γνωστές οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού⁴ (εικονοσυντεταγμένες τους πρωτεύοντος σημείου, σταθερά της μηχανής και συντελεστές πολωνύμου της ακτινικής διαστρόφης) όπως και του εξωτερικού προσανατολισμού της κάθε εικόνας $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ ή του σχετικού προσανατολισμού $(\Delta Y_0, \Delta Z_0, \delta\omega, \delta\phi, \delta\kappa)$. Στη συνέχεια εκτελείται η κανονικοποίηση των δύο εικόνων ώστε να γίνουν αυστηρά κατακόρυφες. Σε αυτή τη διαδικασία οι δύο εικόνες στρέφονται κατά τους ανάστροφους πίνακες στροφής τους ως προς το σύστημα του χώρου R_1^T και R_2^T , ώστε να αποκτήσουν μοναδιαίο πίνακα στροφής ως προς στο σύστημα του εξωτερικού ή του σχετικού προσανατολισμού⁵. Ο γενικός πίνακας στροφής R μίας εικόνας είναι :

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Έπειτα, οι δύο εικόνες μετασχηματίζονται στο σύστημα της βάσης μέσω του πίνακα στροφής R_B , ο οποίος υπολογίζεται από τις στροφές της βάσης Ω , Φ και K (Σχήμα

⁴ Για την αποφυγή των επίπλων και χρονοβόρων διαδικασιών της βαθμονόμησης όπου υπολογίζονται τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που επιτρέπουν τη δημιουργία ζεύγους επιπολικών εικόνων από εικόνες που προέρχονται από μη βαθμονομημένες μηχανές (βλ. [9]).

⁵ Στην περίπτωση που είναι γνωστά τα στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού ο πίνακας R_1 είναι μοναδιαίος.

2.3). Έτσι, για την επιπολική επανασύσταση των εικόνων οι πίνακες στροφής που χρησιμοποιούνται είναι οι

$$M_1 = R_B R_1^T \quad (2.4)$$

$$M_2 = R_B R_2^T$$

όπου

$$R_B = \begin{pmatrix} \cos \Phi \cos K & \cos \Phi \sin K & -\sin \Phi \\ -\cos \Omega \sin K + \sin \Omega \sin \Phi \cos K & \cos \Omega \cos K + \sin \Omega \sin \Phi \sin K & \sin \Omega \cos \Phi \\ \sin \Omega \sin K + \cos \Omega \sin \Phi \cos K & -\sin \Omega \cos K + \cos \Omega \sin \Phi \sin K & \cos \Omega \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$K = \arctan\left(\frac{B_y}{B_z}\right) \quad \Phi = \arctan\left(-\frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}\right) \quad \Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (2.6)$$

$$B_x = X_{0_2} - X_{0_1} \quad B_y = Y_{0_2} - Y_{0_1} \quad B_z = Z_{0_2} - Z_{0_1} \quad (2.7)$$

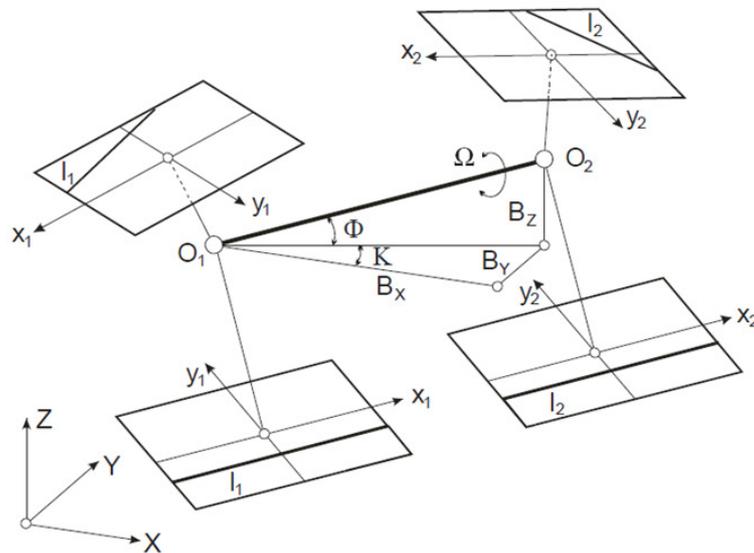
Τέλος, οι συντεταγμένες των κανονικοποιημένων εικόνων x_n, y_n υπολογίζονται με ένα δισδιάστατο προβολικό μετασχηματισμό μέσω της συνθήκης συγγραμμικότητας, η οποία στην προκειμένη περίπτωση συνδέει το σύστημα των εικόνων με αυτό των κανονικοποιημένων.

$$x_n = -c \frac{m_{n11}(x - x_0) + m_{n12}(y - y_0) - m_{n13}c}{m_{n31}(x - x_0) + m_{n32}(y - y_0) - m_{n33}c} \quad (2.8)$$

$$y_n = -c \frac{m_{n21}(x - x_0) + m_{n22}(y - y_0) - m_{n23}c}{m_{n31}(x - x_0) + m_{n32}(y - y_0) - m_{n33}c}$$

όπου m_n τα στοιχεία των πινάκων στροφής M , x_0, y_0 οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, x, y οι εικονοσυντεταγμένες των αρχικών εικόνων, c' και c οι σταθερές της μηχανής των κανονικοποιημένων και των αρχικών εικόνων αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, μετά την επιπολική επανασύσταση των

εικόνων η αναζήτηση των ομολογιών γίνεται κατά μήκος των επιπολικών ευθειών οι οποίες συμπίπτουν πλέον με τις σειρές των εικόνων.



Σχήμα 2.3 Σχέση κανονικοποιημένων και επιπολικών εικόνων. [9]

Η ακρίβεια των επιπολικών εικόνων εξαρτάται από την ανάλυση των εικόνων του στερεοζεύγους αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η ακρίβεια προσδιορισμού των παραμέτρων του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος παρεμβολής για την απόδοση των τιμών φωτεινότητας των εικονοψηφίδων. Για τον έλεγχο της διαδικασίας της επιπολικής επανασύστασης των εικόνων αρκεί να υπολογιστούν οι εικονοσυντεταγμένες δύο ομόλογων σημείων στις κανονικοποιημένες εικόνες των οποίων οι συντεταγμένες y πρέπει θεωρητικά να ταυτίζονται (πρακτικά να διαφέρουν ελάχιστα). Επίσης, μπορεί να γίνει οπτικός έλεγχος σχεδιάζοντας στις κανονικοποιημένες εικόνες τις επιπολικές ευθείες οι οποίες οφείλουν να συμπίπτουν και να περιλαμβάνουν τα ομόλογα σημεία.

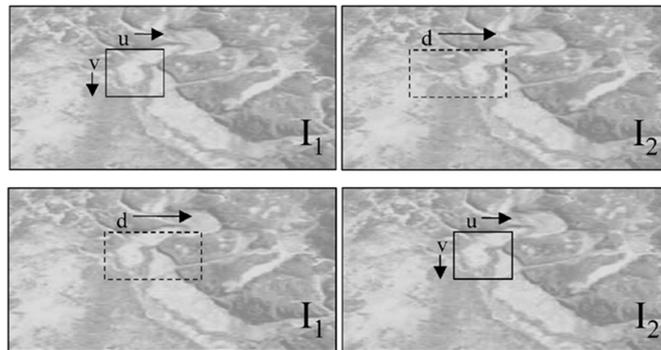
2.2.2 Δέσμευση εκατέρωθεν συνέπειας (Left-right consistency constraint)

Η δέσμευση αυτή επιβάλλεται κατά τη διαδικασία του υπολογισμού της ανομοιότητας βάθους και αποτελεί στην ουσία έναν έλεγχο της συνέπειας μεταξύ των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους D_b και D_m που αντιστοιχούν στην εικόνα αναφοράς και στην εικόνα αναζήτησης. Παρόλο που ο D_m προκύπτει από τα ίδια κόστη συσχέτισης που είχαν υπολογιστεί για τον D_b , ωστόσο μπορεί να

παρατηρηθούν διαφορές μεταξύ των δύο αυτών πινάκων. Γενικώς έγκυρες ανομοιοότητες βάθους θεωρούνται αυτές που ικανοποιούν αυστηρά την παρακάτω συνθήκη (βλ. [11]) :

$$D_b(p) = D_m(p - [D_b(p), 0]) \quad (2.9)$$

Ενδεικτικά αναφέρεται πως στο [12] η εγκυρότητα των ανομοιοτήτων βάθους κρίθηκε από την συνθήκη $|D_{bp} - D_{mq}| \leq 1$. Ο έλεγχος της συνέπειας μεταξύ των D_b και D_m αποτελεί ένα εύχρηστο και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση της ποιότητας του εκάστοτε πίνακα ανομοιοτήτων βάθους καθώς εντοπίζονται εσφαλμένες συνταυτίσεις ή περιοχές με αποκρύψεις.



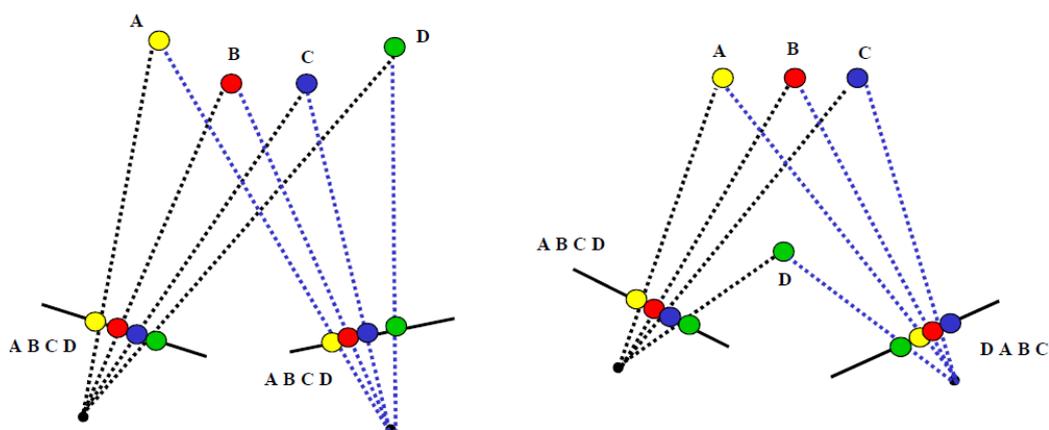
Σχήμα 2.4 Αντιστροφή ρόλων αριστερής (I_1) και δεξιάς (I_2) εικόνας ως εικόνα αναφοράς κατά τη δέσμευση εκατέρωθεν συνέπειας. [2]

2.2.3 Δέσμευση διάταξης των εικονοστοιχείων (Ordering constraint)

Με τη δέσμευση διάταξης των εικονοστοιχείων εξετάζεται η σχετική θέση μεταξύ των εικονοψηφίδων που βρίσκονται πάνω στην επιπολική ευθεία θεωρώντας παράλληλα πως οι επιφάνειες των αντικείμενων δεν παρουσιάζουν ασυνέχειες. Η σχετική θέση μεταξύ των εικονοψηφίδων θεωρητικά πρέπει να παραμένει η ίδια και για τις δύο εικόνες. Παρόλα αυτά μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα σε περιπτώσεις λεπτών αντικειμένων που βρίσκονται στο έμπροσθεν της σκηνής σε μικρές αποστάσεις λήψης.



Σχήμα 2.5 Περίπτωση λεπτών αντικειμένων στο έμπροσθεν της σκηνής. [13]



Σχήμα 2.6 Σωστή (αριστερά) και λανθασμένη (δεξιά) σχετική θέση μεταξύ των εικονοστοιχείων. [14]

2.2.4 Δέσμευση ομαλότητας (Smoothness constraint)

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που μπορεί να συμβούν κατά την αντιστοίχιση της κάθε εικονοψηφίδας γίνονται υποθέσεις περί εξομάλυνσης των επιφανειών των αντικειμένων οι οποίες αποτελούν δεσμεύσεις στο κομμάτι των αλγορίθμων. Ο περιορισμός που τηρείται είναι οι τιμές χαρακτηρισμού των εικονοστοιχείων να μεταβάλλονται ομαλά σε όλη την εικόνα διατηρώντας παράλληλα τις όποιες ασυνέχειες υπάρχουν, όπως για παράδειγμα εκείνες στα όρια των αντικειμένων [15]. Η δέσμευση ομαλότητας χρησιμοποιείται κατά κόρον στις καθολικές και ημι-καθολικές μεθόδους ως όρος που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση ενέργειας.

2.2.5 Δέσμευση ομοιότητας (Similarity constraint)

Στη δέσμευση αυτή γίνεται η θεώρηση πως οι ομολόγες εικονοψηφίδες έχουν την ίδια τιμή φωτεινότητας και στις δύο εικόνες. Στην πραγματικότητα λόγω των διαφορών ραδιομετρικών παραμορφώσεων η θεώρηση αυτή δεν επαληθεύεται πάντα. Ωστόσο, χρησιμοποιείται συχνά κυρίως στις τοπικές μεθόδους.

2.3 Προ-επεξεργασία εικόνων

Σε πολλές περιπτώσεις για τη βελτίωση της απόδοσης της στέρεο συνταύτισης των εικόνων εφαρμόζονται σε αυτές φίλτρα κυρίως πριν την εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων που εξομαλύνουν τις αρχικές εικόνες διατηρώντας τις ακμές των αντικειμένων όπως για παράδειγμα τα LoG (Laplacian of Gaussian) και BilSub (Bilateral filtering).

$$I_{LoG} = I \otimes K_{LoG}, K_{LoG}(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.10)$$

$$I_{BilSub}(p) = I(p) - \frac{\sum_{q \in N_p} I(p) e^s e^r}{\sum_{q \in N_p} e^s e^r}, s = -\frac{(q-p)^2}{2\sigma_s^2}, r = -\frac{(I(q) - I(p))^2}{2\sigma_r^2} \quad (2.11)$$

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και άλλα φίλτρα τα οποία βελτιώνουν τις αρχικές εικόνες ενισχύοντας την υφή τους, μειώνοντας συγχρόνως τις έντονες ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικονοψηφίδων. Τέτοια φίλτρα είναι το Mean filter όπως περιγράφεται στο [16], όπου από την κάθε κεντρική εικονοψηφίδα αφαιρείται ο μέσος όρος των εντάσεων των εικονοψηφίδων που βρίσκονται εντός του ψηφιακού παραθύρου του φίλτρου και παράλληλα προστίθεται η σταθερή τιμή 128 για την αποφυγή αρνητικών τιμών.

$$I_{mean}(p) = I(p) - \frac{1}{|N_p|} \sum_{q \in N_p} I(q) + 128 \quad (2.12)$$

Αντίστοιχο φίλτρο με το Mean filter είναι αυτό του οποίου η κεντρική εικονοψηφίδα I_c παίρνει την τιμή της ποσότητας $\min[\max(I_c - \bar{I}, -I_{cap}), I_{cap}]$, όπου \bar{I} ο μέσος όρος των εντάσεων των εικονοψηφίδων του ψηφιακού παραθύρου και I_{cap} ένας θετικός σταθερός όρος με προκαθορισμένη τιμή 30 [17]. Τέλος, πολλές φορές

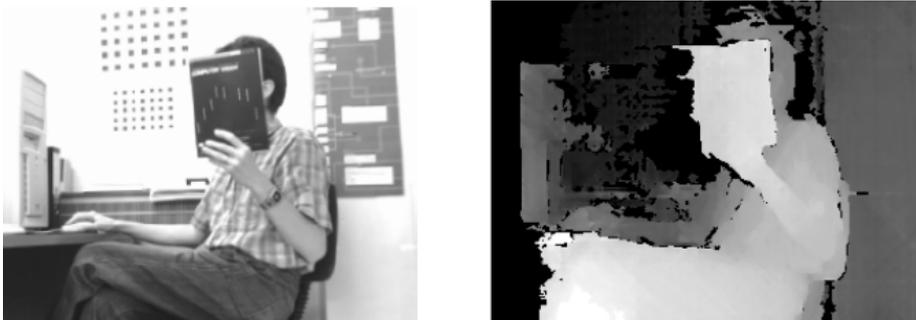
εφαρμόζονται για την ενίσχυση των ακμών των αντικειμένων αλλά και την ταυτόχρονη εξομάλυνσή τους και άλλα φίλτρα κλίσης, όπως για παράδειγμα το Sobel κατά τη διεύθυνση x και κατά y .

$$G_x^{sobel} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * I \quad , \quad G_y^{sobel} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * I \quad (2.13)$$

2.4 Βελτιστοποίηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους

Η διαδικασία βελτιστοποίησης εκτελείται, ώστε να απαλειφθούν εναπομείναντα σφάλματα στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Γενικότερα, στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές μέθοδοι που βελτιώνουν την εικόνα αυτού του πίνακα και στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται μερικές από αυτές.

Στις περιοχές όπου υπάρχουν αντικείμενα των οποίων το υπόβαθρο έχει ελλιπή υφή έχει παρατηρηθεί πως παρουσιάζονται ασυνέχειες στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους, οι οποίες περιβάλλουν τα αντικείμενα που βρίσκονται στο εμπροσθεν μέρος της σκηνής (Σχήμα 2.7). Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι τοίχοι σε εσωτερικούς χώρους κ.α. Αξίζει να σημειωθεί πως τέτοια προβλήματα δεν συμβαίνουν σε εναέριες εικόνες υψηλής ανάλυσης καθώς αυτού του είδους οι εικόνες στην πραγματικότητα έχουν υφή.



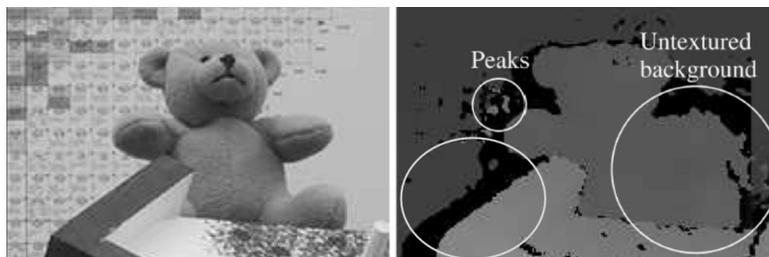
Σχήμα 2.7 Περίπτωση ασυνεχειών στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους (όρια βιβλίου με τον τοίχο).

[18]

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνονται διάφορες υποθέσεις, για παράδειγμα ότι στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους δεν μπορούν να συμβαίνουν ασυνέχειες που αντιστοιχούν σε περιοχές με ελλιπή υφή της εικόνας αναφοράς ή ότι τα αντικείμενα στο φυσικό φόντο οφείλουν να έχουν ορατή υφή στον πίνακα

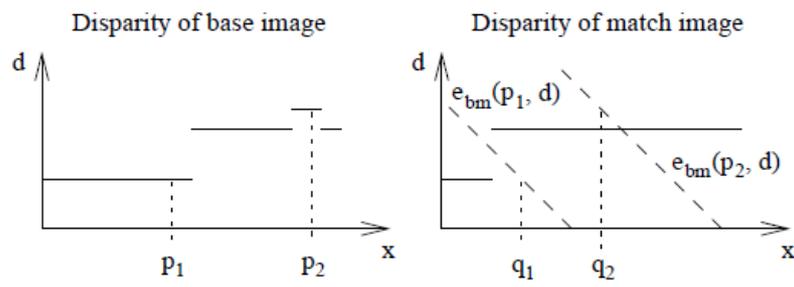
ανομοιοτήτων βάθους. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι στην επιφάνεια μιας περιοχής με έλλειψη υψής είναι δυνατό να προσαρμοστεί ένα επίπεδο στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Η υπόθεση αυτή είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις τοίχων ή άλλων επιφανειών σε εσωτερικούς χώρους.

Μία άλλη διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται στη διαδικασία βελτιστοποίησης του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους είναι η αφαίρεση εξατομικευμένων τμημάτων που παρουσιάζουν ακραίες τιμές (Σχήμα 2.8). Ο εντοπισμός αυτών των τμημάτων γίνεται με κατάτμηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους, όπου ελέγχονται οι ανομοιοότητες βάθους των γειτονικών εικονοστοιχείων. Οι συνήθεις λόγοι που προκαλούν αυτό το πρόβλημα είναι η έλλειψη υψής, η παρουσία ανακλάσεων και γενικότερα η παρουσία του θορύβου στις εικόνες. Το μέγεθος των τμημάτων που αφαιρούνται ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή. Ενδεικτικά αναφέρεται πως στην εφαρμογή [16] τα τμήματα που ακυρώθηκαν περιείχαν λιγότερες από είκοσι (20) εικονοψηφίδες. Σε πολλές εφαρμογές για την εξάλειψη των στιγμάτων αλλά και των περιοχών που περιέχουν ακραίες τιμές εφαρμόζεται συνήθως το φίλτρο διαμέσου (Median filter) το οποίο εξομαλύνει τις εικόνες και παράλληλα διατηρούνται οι ακμές των αντικειμένων.



Σχήμα 2.8 Προβλήματα κατά την συνταύτιση σε περιοχές με έλλειψη υψής και περίπτωση ακραίων τιμών (peaks) σε τμήματα του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Οι μαύρες περιοχές απεικονίζουν τις άκυρες ανομοιοότητες βάθους από αναντιστοιχίες ή αποκρύψεις. [12]

Επίσης, άλλη διαδικασία που εκτελείται είναι η εφαρμογή της δέσμευσης εκατέρωθεν συνέπειας. Με τη δέσμευση αυτή εντοπίζονται οι αναντιστοιχίες μεταξύ των εικονοψηφίδων αλλά και οι περιοχές που περιέχουν αποκρύψεις (βλ. Σχήμα 2.9). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι αντίστοιχες ανομοιοότητες βάθους χαρακτηρίζονται ως άκυρες και για αυτό το λόγο δημιουργούνται κενά στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους (βλ. Σχήμα 2.8). Για την πλήρωση αυτών των κενών εκτελείται παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών ανομοιοτήτων βάθους.



Σχήμα 2.9 Περίπτωση άκυρων ανομοιοτήτων βάθους λόγω αποκρύψεων (p_1) ή λόγω αναντιστοιχιών (p_2). [18]

Κεφάλαιο 3:

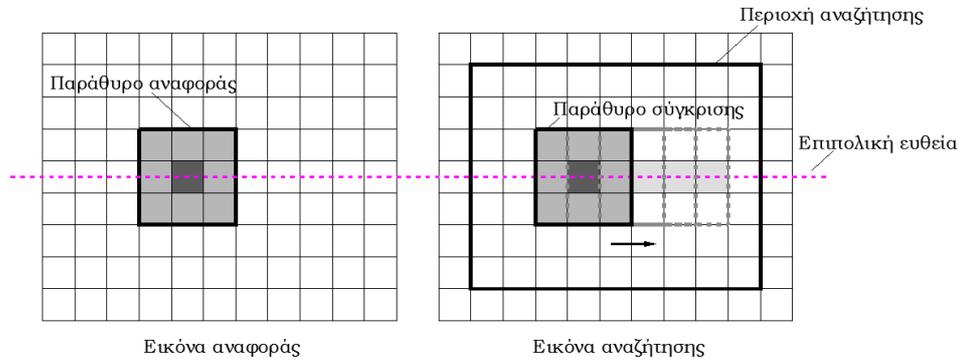
Μέθοδοι Υπολογισμού Κόστους Συσχέτισης

Οι πιο συνήθεις τεχνικές υπολογισμού του κόστους συσχέτισης είναι αυτές που βασίζονται στην τιμή φωτεινότητας της κάθε εικονοψηφίδας είτε για εικόνες με τόνους του γκρι είτε για έγχρωμες με τρία κανάλια (RGB)⁶. Παρόλο που αυτές οι μέθοδοι είναι ευαίσθητες σε περιοχές με ελλιπή υφή ή με αποκρύψεις χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά. Παράλληλα, μπορεί στη βιβλιογραφία να βρει κανείς και άλλες μεθόδους λιγότερο ευαίσθητες σε τέτοιες περιοχές όπως αυτές που πρότειναν οι Zabih και Woodfill (1994), οι οποίοι χρησιμοποίησαν τους μη παραμετρικούς μετασχηματισμούς Rank και Census που βασίζονται στις σχετικές θέσεις των τιμών έντασης και όχι σε αυτές καθαυτές.

Ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης με τεχνικές που βασίζονται στην τιμή φωτεινότητας των εικονοστοιχείων γίνεται είτε σε επίπεδο εικονοψηφίδων είτε σε επίπεδο ψηφιακών παραθύρων (επιφανειακή συνταύτιση). Στις τοπικές μεθόδους ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται κυρίως με τη χρήση ψηφιακών παραθύρων καθώς εκμεταλλεύονται τη γειτονική περιοχή περί του κάθε εικονοστοιχείου υπολογίζοντας στο τέλος ένα συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον ορισμό ενός πρότυπου παραθύρου αναφοράς

⁶ Στις έγχρωμες εικόνες με τρία κανάλια ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης εκτελείται σε κάθε κανάλι ξεχωριστά και στη συνέχεια γίνεται η συνάθροισή τους για την εύρεση ενός συνολικού κόστους συσχέτισης. Σε εφαρμογές όπως στα [16] και [19] το όφελος εκτελώντας στέρεο συνταύτιση με έγχρωμες εικόνες δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο και τα αποτελέσματα είναι περίπου τα ίδια με τις ασπρόμαυρες εικόνες.

για το οποίο επιχειρείται η αντιστοίχσή του με ένα παράθυρο σύγκρισης σε μία περιοχή αναζήτησης στην εικόνα αναζήτησης (Σχήμα 3.1). Αντίθετα, στις καθολικές μεθόδους, όπου αγνοείται η διαδικασία συσσωμάτωσης, ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται σε επίπεδο εικονοψηφίδων.



Σχήμα 3.1 Επιφανειακή συνταύτιση με τη χρήση ψηφιακών παραθύρων.

3.1 Απόλυτες διαφορές (AD) – Τετραγωνικές διαφορές (SD)

Οι πιο συνήθεις περιπτώσεις υπολογισμού του κόστους συσχέτισης σε επίπεδο εικονοψηφίδων είναι η μέθοδος των απόλυτων διαφορών (Absolute Differences) και των τετραγωνικών διαφορών (Squared Differences). Η δέσμευση που χρησιμοποιείται και στις δύο περιπτώσεις είναι αυτή της ομοιότητας. Ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης γίνεται ως

$$C_{AD}(p, d) = |I_L(p) - I_R(p - d)| \quad (3.1)$$

$$C_{SD}(p, d) = (I_L(p) - I_R(p - d))^2 \quad (3.2)$$

, όπου p η εικονοψηφίδα στην αριστερή εικόνα, $p - d$ η εικονοψηφίδα στην δεξιά εικόνα, d η ανομοιότητα βάθους και I_L, I_R οι τιμές φωτεινότητας της αριστερής και δεξιάς εικόνας αντίστοιχα.

3.2 Άθροισμα Απόλυτων διαφορών (SAD) – Άθροισμα τετραγωνικών διαφορών (SSD)

Στις περιπτώσεις των τοπικών μεθόδων όπου εκτελείται η διαδικασία συσσωμάτωσης, ο υπολογισμός του συσσωματωμένου κόστους συσχέτισης γίνεται ως

$$C_{SAD}(p, d) = \sum_{q \in N_p} |I_L(p) - I_R(p - d)| \quad (3.3)$$

$$C_{SSD}(p, d) = \sum_{q \in N_p} (I_L(p) - I_R(p - d))^2 \quad (3.4)$$

, όπου N_p είναι οι γειτονικές εικονοψηφίδες γύρω από την κεντρική. Για τις γειτονικές εικονοψηφίδες γίνεται η ίδια υπόθεση με πριν, δηλαδή περί ομοιότητας των τιμών έντασης των ομόλογων εικονοστοιχείων. Στη βιβλιογραφία γενικότερα μπορεί να βρει κανείς διάφορες παραλλαγές των SAD και SSD όπως οι μέθοδοι ZSAD (Zero Mean Sum of Absolute Difference), ZSSD (Zero Mean Sum of Squared Difference) κ.α.

3.5 BT

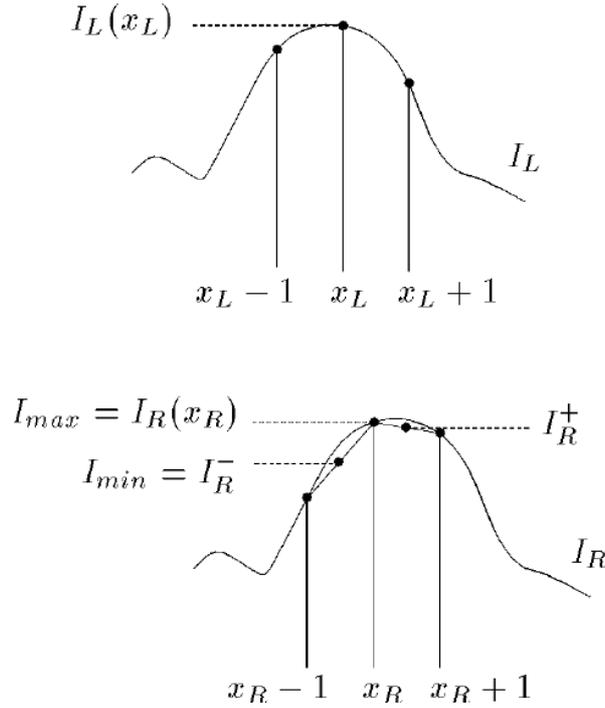
Η μέθοδος από τους Birchfield και Tomasi [20] υπολογίζει το κόστος συσχέτισης μεταξύ δύο εικονοψηφίδων με τη χρήση γραμμικών παρεμβολών στις γειτονικές τους εικονοψηφίδες (συνήθως με τη μέθοδο των απόλυτων διαφορών).

$$C_{BT}(x_L, x_R) = \min\{\bar{d}(x_L, x_R, I_L, I_R), \bar{d}(x_R, x_L, I_R, I_L)\} \quad (3.5)$$

, όπου για x_L ως εικονοψηφίδα της εικόνας αναφοράς και x_R ως εικονοψηφίδα της εικόνας αναζήτησης είναι :

$$\begin{aligned}
\bar{d}(x_L, x_R, I_L, I_R) &= \max\{0, I_L(x_L) - I_{\max}, I_{\min} - I_L(x_L)\} \\
I_{\min} &= \min(I_R^-, I_R^+, I_R(x_R)) \\
I_{\max} &= \max(I_R^-, I_R^+, I_R(x_R)) \\
I_R^- &= (I_R(x_R) + I_R(x_R - 1))/2 \\
I_R^+ &= (I_R(x_R) + I_R(x_R + 1))/2
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Ομοίως ισχύει για το συμμετρικό $\bar{d}(x_R, x_L, I_R, I_L)$ με x_R ως εικονοψηφίδα της εικόνας αναφοράς και x_L ως εικονοψηφίδα της εικόνας αναζήτησης. Επίσης, I_L και I_R είναι οι εντάσεις των εικονοψηφίδων (Σχήμα 3.2). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά στις καθολικές μεθόδους σε επίπεδο εικονοψηφίδων, ωστόσο χρησιμοποιείται και στις τοπικές μεθόδους μέσω ψηφιακών παραθύρων. Παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την AD, το υπολογιστικό της κόστος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο (αυξάνεται κατά περίπου 10%). Παράλληλα, θεωρείται πιο αποδοτική και λιγότερο ευαίσθητη στην επίδραση της δειγματοληψίας του σήματος της εικόνας, όταν η ένταση των εικονοψηφίδων μεταβάλλεται απότομα (π.χ. στις ασυνέχειες βάθους ή σε επαναλαμβανόμενα αντικείμενα). Σημειώνεται πως όταν υφίστανται άλλες παραμορφώσεις όπως για παράδειγμα επίπλαστοι μετασχηματισμοί (alias) λόγω χαμηλής ανάλυσης της δειγματοληψίας (το οποίο σημαίνει αραιή πληροφορία μικρότερη του $2 \times f_{\max_{\text{εισόδου}}}$), η γραμμικά παρεμβαλλόμενη συνάρτηση ενδέχεται να μην προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις εντάσεις των εικονοψηφίδων, με αποτέλεσμα την αδυναμία των περισσότερων μεθόδων σε εκείνη την περιοχή.



Σχήμα 3.2 Μέθοδος υπολογισμού του κόστους συσχέτισης με τη μέθοδο BT. [20]

3.4 Συντελεστής Συσχέτισης - Κανονικοποιημένη Συνάρτηση Μεταβλητότητας (NCC)

Ο συντελεστής συσχέτισης χρησιμοποιείται συχνά στις τοπικές μεθόδους για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης και αποτελεί έναν δείκτη ομοιότητας μεταξύ του παραθύρου αναφοράς και του παραθύρου αναζήτησης. Αν ο συντελεστής συσχέτισης πάρει τιμές ± 1 , τότε τα δύο παράθυρα έχουν πλήρη συσχέτιση (θετική ή αρνητική αντίστοιχα) ενώ, όταν πάρει την τιμή μηδέν (0), τότε τα δύο παράθυρα δεν συσχετίζονται.

$$C_{NCC}(p, d) = \frac{\sum_{q \in N_p} (I_L(q) - \bar{I}_L(p))(I_R(q-d) - \bar{I}_R(p-d))}{\sqrt{\sum_{q \in N_p} (I_L(q) - \bar{I}_L(p))^2 \sum_{q \in N_p} (I_R(q-d) - \bar{I}_R(p-d))^2}} \quad (3.7)$$

, όπου q το σύνολο των γειτονικών εικονοψηφίδων N_p και $\bar{I}(p) = \frac{1}{N_p} \sum_{q \in N_p} I(q)$.

3.5 Αμοιβαία Πληροφορία (MI)

Η μέθοδος της αμοιβαίας πληροφορίας (Mutual Information-MI) αποτελεί μία από τις μεθόδους για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης ακόμα και σε εικόνες με σύνθετες ραδιομετρικές σχέσεις. Βασίζεται σε ολόκληρη την εικόνα σε επίπεδο εικονοψηφίδων και όχι σε ψηφιακά παράθυρα. Η αμοιβαία πληροφορία αποτελεί ένα μέτρο για την «ευθυγράμμιση» του μοντέλου που βασίζεται στο εύρος μιας κατανομής πιθανότητας δύο εικόνων (εντροπία H_I) και στην κοινή τους εντροπία H_{I_1, I_2} .

$$MI_{I_1, I_2} = H_{I_1} + H_{I_2} - H_{I_1, I_2} \quad (3.8)$$

όπου, I_1, I_2 οι εικόνες 1 και 2 και

$$H_I = -\int_0^1 P_I(i) \log P(i) di \quad (3.9)$$

$$H_{I_1, I_2} = -\int_0^1 \int_0^1 P_{I_1, I_2}(i_1, i_2) \log P_{I_1, I_2}(i_1, i_2) di_1 di_2 \quad (3.10)$$

Οι εντροπίες H_{I_1}, H_{I_2} υπολογίζονται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας P_I της κάθε εικόνας. Τα ουσιώδη χαρακτηριστικά που ελαττώνουν την εντροπία δίνουν μεγαλύτερη πληροφορία, καθώς η εντροπία είναι τρόπος μέτρησης της αβεβαιότητας. Το ιστόγραμμα μιας εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας P_I . Όταν το ιστόγραμμα μιας εικόνας είναι σχεδόν επίπεδο, τότε η εντροπία της είναι χαμηλή και η πιθανότητα εύρεσης ομολογιών είναι πολύ μικρή. Αντίθετα, σε ένα ιστόγραμμα που ακολουθεί την κανονική κατανομή και με υψηλή τυπική απόκλιση (δηλαδή με μεγάλη μεταβλητότητα των τόνων) η πιθανότητα εύρεσης ομολογιών είναι μεγαλύτερη. Όταν οι εικόνες είναι καλά «ευθυγραμμισμένες», τότε η κοινή τους εντροπία H_{I_1, I_2} είναι χαμηλή και η αμοιβαία πληροφορία υψηλή. Η κοινή εντροπία μπορεί να μειωθεί, αν βελτιωθεί η «ευθυγράμμιση» των δύο εικόνων με μία μετατόπιση τους. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της κοινής εντροπίας στην περίπτωση της στέρεο συνταύτισης εικόνων περιλαμβάνει αρχικά έναν

μετασχηματισμό της δεύτερης εικόνας σύμφωνα με έναν αρχικό πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται ώστε οι ομοιογένειες των σημείων να βρίσκονται στην ίδια θέση και στις δύο εικόνες, δηλαδή $I_1 = I_b$ και $I_2 = f_D(I_m)$ [12]. Ο Kim (2003) μετασχημάτισε την εξίσωση (3.10) συναρτήσε του αθροίσματος των όρων που εξαρτώνται από τις εντάσεις των αντιστοιχιών για κάθε εικονοψηφίδα p .

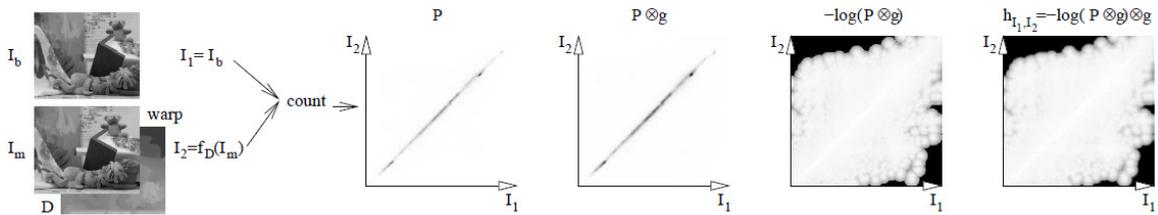
$$H_{I_1, I_2} = \sum_p h_{I_1, I_2}(I_{1p}, I_{2p}) \quad (3.11)$$

Ο όρος h_{I_1, I_2} υπολογίζεται από την κοινή κατανομή πιθανότητας P_{I_1, I_2} των αντίστοιχων εντάσεων αριθμού εικονοψηφίδων n και με συνέλιξη με τη χρήση 2D Gaussian φίλτρου σε δύο φάσεις για εξομάλυνση (Σχήμα 3.3).

$$h_{I_1, I_2}(i, k) = -\frac{1}{n} \log(P_{I_1, I_2}(i, k) \otimes g(i, k)) \otimes g(i, k) \quad (3.12)$$

$$P_{I_1, I_2}(i, k) = \frac{1}{n} \sum_p T[(i, k) = (I_{1p}, I_{2p})] \quad (3.13)$$

όπου ο όρος T είναι ένας δείκτης που παίρνει την τιμή ένα (1), όταν η συνθήκη στα ορίσματα της είναι αληθής και μηδέν (0), όταν είναι ψευδής.



Σχήμα 3.3 Υπολογισμός της κοινής εντροπίας h_{I_1, I_2} . Οι φωτεινότερες περιοχές αντιπροσωπεύουν χαμηλότερες τιμές της κοινής εντροπίας. [12]

Η εντροπία H_{I_1} θεωρείται σταθερή ενώ η H_{I_2} σχεδόν σταθερή λόγω του αρχικού πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Έτσι, ο όρος $h_{I_1, I_2}(I_{1p}, I_{2p})$ χρησιμεύει ως κόστος για την συνταύτιση των δύο εντάσεων. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις αποκρύψεων

που δεν υφίσταται αντιστοίχιση και επομένως αυτές οι περιοχές πρέπει να μην υπολογίζονται, γιατί οδηγούν στην αποσταθεροποίηση των εντροπιών H_{I_1} και H_{I_2} . Αξίζει να σημειωθεί πως, αν συμπεριλάβει κανείς αυτές τις εντροπίες στον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης, βελτιώνονται τα όρια των αντικειμένων. Εκφράζοντας τις εντροπίες H_{I_1} , H_{I_2} ομοίως με την εξίσωση (3.11), τότε :

$$H_I = \sum_p h_I(I_p) \quad (3.14)$$

$$h_I(i) = -\frac{1}{n} \log(P_I(i) \otimes g(i)) \otimes g(i) \quad (3.15)$$

Οι κατανομές πιθανότητας P_{I_1} , P_{I_2} των εικόνων δεν πρέπει να υπολογίζονται στο σύνολο τους αλλά μόνο για το επικαλυπτόμενο μέρος μεταξύ τους. Για αυτό και ο υπολογισμός της P_{I_1} είναι $P_{I_1}(i) = \sum_k P_{I_1, I_2}(i, k)$. Τελικά το κόστος συσχέτισης υπολογίζεται ως

$$C_{MI}(p, d_p) = -MI_{I_1, I_2} \Rightarrow -C_{MI}(p, d_p) = h_{I_1}(p) + h_{I_2}(d_p) - h_{I_1, I_2}(p, d_p) \quad (3.16)$$

, όπου d_p η ανομοιότητα βάθους. Όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.16), το κόστος συσχέτισης είναι η αρνητική τιμή του MI_{I_1, I_2} λόγω της αντίθετης εννοιολογικής σημασίας μεταξύ κόστους και αμοιβαίας πληροφορίας. Οι όροι $h_{I_1}(p)$ και $h_{I_2}(d_p)$ είναι επιθυμητό να έχουν υψηλές τιμές, για να προσδιοριστούν όσες το δυνατόν περισσότερες περιοχές (χωρίς αυτές να περιλαμβάνουν περιοχές με αποκρύψεις). Αντιθέτως ο όρος $h_{I_1, I_2}(p, d_p)$ απαιτείται να έχει χαμηλές τιμές, για να εξασφαλίζεται η καλή «ευθυγράμμιση» των εικόνων. Ο απαιτούμενος πίνακας ανομοιοτήτων βάθους που ορίζεται αρχικά για τον υπολογισμό του πρώτου C_{MI} περιέχει είτε τυχαίες τιμές είτε προκύπτει από μία γρήγορη μέθοδο συσχέτισης (π.χ. με τη μέθοδο NCC). Έπειτα επαναπροσδιορίζεται επαναληπτικά. Συνεπώς, το C_{MI} που υπολογίζεται κάθε φορά χρησιμοποιείται πρώτα για την συνταύτιση των εικόνων και στη συνέχεια για τον προσδιορισμό του νέου πίνακα ανομοιοτήτων βάθους ο οποίος αποτελεί την αρχική τιμή για την επόμενη επανάληψη. Έχει παρατηρηθεί

πως περίπου στις τρεις (3) επαναλήψεις ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους σταθεροποιείται εκτός και αν έχει προσδιορισθεί αρχικά με κάποια μέθοδο συσχέτισης που συγκλίνει γρηγορότερα. Μία επέκταση της μεθόδου MI είναι η Hierarchical Mutual Information (HMI) κατά την οποία εκτελείται ένας ιεραρχικός υπολογισμός που αναδρομικά χρησιμοποιεί τον ανανεωμένο κάθε φορά πίνακα ανομοιοτήτων βάθους ως αρχικό [12].

3.5 Συγκρίσεις μεθόδων κόστους συσχέτισης

Κατά καιρούς έχουν γίνει πολλές αξιολογήσεις των μεθόδων κόστους συσχέτισης. Για να είναι αξιόπιστες αυτές οι αξιολογήσεις και να μπορέσουν να καταγράψουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονέκτημα των μεθόδων κόστους συσχέτισης, πρέπει να περιλαμβάνουν μία σειρά παραμέτρων που επηρεάζουν την συνταύτιση των εικόνων. Για παράδειγμα, οι εικόνες πρέπει να περιλαμβάνουν αντικείμενα σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους, ώστε να αποτυπώνεται η διαφορετική επίδραση του φωτισμού, αντικείμενα στο εμπροσθεν ή στο πίσω μέρος της σκηνής με αρκετή ή ελλιπή υφή, κεκλιμένες ή καμπύλες ή και επίπεδες επιφάνειες κ.λπ. Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται επιλεγμένες περιπτώσεις συγκρίσεων από τα [6], [16] και [21] στα οποία μπορεί να βρει κανείς περισσότερα στοιχεία για αλγόριθμους και μεθόδους κόστους συσχέτισης που δεν περιγράφονται αναλυτικά στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στη βιβλιογραφία γενικότερα έχει γίνει διάκριση μεταξύ των μεθόδων κόστους συσχέτισης χαρακτηρίζοντας τις ως παραμετρικές, μη παραμετρικές και άλλες όπως η MI. Στις παραμετρικές μεθόδους ανήκουν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν την ένταση των εικονοψηφίδων για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης, οι οποίες είναι οι AD, SAD, ZSAD, BT, NCC κ.λπ. Από την άλλη μεριά, στις μη παραμετρικές μεθόδους ανήκουν οι μέθοδοι Rank και Census οι οποίες έχουν την ιδιαιτερότητα να εκμεταλλεύονται τη σχετική διάταξη των εικονοψηφίδων που βρίσκονται εντός του ψηφιακού παραθύρου και όχι την τιμή της φωτεινότητάς τους. Αυτό αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των παραμετρικών μεθόδων, όταν υφίστανται στις εικόνες ραδιομετρικές παραμορφώσεις ή όταν περιλαμβάνονται εντός των ψηφιακών παραθύρων περιοχές με ασυνέχειες βάθους (δηλαδή κοντά στα όρια των αντικειμένων) που περιέχουν ακραίες τιμές. Οι παραμετρικές μέθοδοι και ειδικά η μέθοδος NCC τείνουν να θολώνουν τα όρια των αντικειμένων στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους σε αντίθεση με τις μη παραμετρικές που διαχειρίζονται καλύτερα αυτού του είδους προβλήματα. Αξίζει να σημειωθεί πως σε διάφορες

εφαρμογές έχει γίνει συνδυασμός των δύο μεθόδων, δηλαδή εφαρμόστηκαν πρώτα οι μέθοδοι Census και Rank ως φίλτρα στο στάδιο της προ-επεξεργασίας των εικόνων και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος SAD. Επίσης, αναφέρεται πως οι μη παραμετρικές μέθοδοι είναι εξίσου ευαίσθητες με τις παραμετρικές σε περιοχές με ελλιπή υφή και για αυτό το λόγο έχουν προταθεί διάφορες παραλλαγές όπως οι Soft Rank filter κ.λπ.

Στο [16] έγινε σύγκριση μεταξύ των μεθόδων κόστους συσχέτισης σε σει επιγείων πειραματικών δεδομένων για τον τοπικό και τον ημι-καθολικό αλγόριθμο, όπως και για τον καθολικό αλγόριθμο graph cuts. Σε πρώτο στάδιο η σύγκριση έγινε στις αρχικές εικόνες οι οποίες αποκτήθηκαν στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Middlebury (βλ. [7]). Σημειώνεται πως στο συγκεκριμένο σετ δεδομένων η βάση λήψης (B) των εικόνων είναι μικρή για την ελαχιστοποίηση των αποκρύψεων. Έπειτα, ακολούθησε σύγκριση για τις ίδιες εικόνες, αφού πρώτα είχε γίνει αλλαγή στην ραδιομετρία της δεξιάς εικόνας συνολικά με τεχνητό τρόπο. Έτσι, η δεξιά εικόνα του κάθε στερεοζεύγους υπέστη αλλαγές στη φωτεινότητά της με γραμμικό-συνολικό (gain range) και μη γραμμικό-τοπικό (gamma range) τρόπο αλλά και με βαθμιαίο ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο της εικόνας (vignetting effect). Στην πρώτη περίπτωση, οι ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων ήταν σχεδόν αμελητέες δεδομένου ότι αποκτήθηκαν σε συνθήκες εργαστηρίου σε εσωτερικό χώρο. Η μέθοδος BT είναι γενικότερα αποτελεσματική στις περιοχές με υψηλές συχνότητες και στις ασυνέχειες βάθους καθιστώντας έτσι τις μεθόδους AD και SD (ή SAD και SSD) υποδεέστερες σε σχέση με αυτήν. Παρόλα αυτά και οι δύο μέθοδοι είχαν περίπου τις ίδιες αποδόσεις χωρίς τη χρήση φίλτρων. Αυτό συνέβη, επειδή τα όποια κενά στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους που δημιουργήθηκαν μετά την εφαρμογή της μεθόδου AD στον έλεγχο εκατέρωθεν συνέπειας συμπληρώθηκαν επιτυχώς μέσω παρεμβολής. Θα μπορούσε να περιμένει κανείς πως το γεγονός ότι οι εικόνες δεν είχαν μεγάλες ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ τους δεν θα είχε επίδραση στην εφαρμογή των μεθόδων BT και AD και θα απέδιδαν καλύτερα από όλες τις υπόλοιπες μεθόδους. Αυτό δεν συμβαίνει, καθώς οι επιφάνειες που φωτογραφίζονται στον πραγματικό χώρο δεν είναι όλες Λαμπερτιανές (Lambertian surfaces)⁷. Η χρήση των φίλτρων Mean και

⁷ Λαμπερτιανή επιφάνεια (Lambertian surface) είναι η επιφάνεια η οποία ανακλά την προσπίπτουσα ακτινοβολία ισοτροπικά (διάχυτη ανάκλαση) και ακολουθεί το νόμο συνημιτόνου του Lambert. Η διάχυτη ανάκλαση οφείλεται σε μικροσκοπική τραχύτητα μιας επιφάνειας και αποτελεί ένα ιδανικό μοντέλο ανάκλασης. Κάποιες φυσικές επιφάνειες

LoG στο στάδιο της προ-επεξεργασίας είχε ως αποτέλεσμα την άμβλυση των ακμών των αντικειμένων στις περιοχές κοντά σε ασυνέχειες βάθους. Για τον λόγο αυτό η απόδοσή τους και στους τρεις αλγόριθμους συσχέτισης ήταν χειρότερη σε σχέση με το φίλτρο BilSuB που με τη μέθοδο BT είχαν αρκετά χαμηλό ποσοστό σφαλμάτων μαζί με τις μεθόδους Census και HMI. Επίσης, η απόδοση της μεθόδου NCC ήταν μέτρια, καθώς ως γνωστόν είναι ευαίσθητη σε περιοχές με επαναλαμβανόμενα αντικείμενα και σε περιοχές με χαμηλή υφή.

Στη δεύτερη περίπτωση κατά την οποία έγιναν αλλαγές στην ραδιομετρία όλης της δεξιάς εικόνας η γραμμική μείωση της φωτεινότητας επηρέασε αρνητικά τις μεθόδους AD και BT, καθώς αυτές βασίζονται στη δέσμευση ομοιότητας. Αντιθέτως, η χρήση και των τριών φίλτρων (ιδιαίτερα του BilSub) για μικρές γραμμικές ραδιομετρικές διαφορές με τη μέθοδο BT βοήθησε στη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, παρατηρήθηκαν ίδιες αποδόσεις για τις μη γραμμικές ραδιομετρικές αλλαγές με μόνη διαφορά τη μέθοδο NCC που στον τοπικό αλγόριθμο είχε αρκετά μικρό ποσοστό σφαλμάτων. Στην τρίτη περίπτωση αλλαγής της φωτεινότητας με βαθμιαίο τρόπο κατά την οποία η αλλαγή της φωτεινότητας γίνεται τοπικά, οι μέθοδοι AD και BT είχαν απότομη μείωση της απόδοσης τους ενώ οι υπόλοιπες μέθοδοι διατηρήθηκαν στα ίδια επίπεδα με πριν. Όσον αφορά τη μέθοδο HMI, στις γραμμικές και στις μη γραμμικές αλλαγές της φωτεινότητας απέδωσε εξίσου καλά με τη μέθοδο NCC με τον τοπικό αλγόριθμο όπως και με τη μέθοδο Census με τον ημι-καθολικό. Στην βαθμιαία αλλαγή της φωτεινότητας φάνηκε πως ως μέθοδος δεν ανταποκρίνεται καλά, καθώς έχει την δυνατότητα να μοντελοποιεί την σχέση μεταξύ των δύο εικόνων με τη χρήση των ιστογραμμάτων τους κυρίως συνολικά και όχι τοπικά. Αξίζει να σημειωθεί πως παράλληλα με τις παραπάνω συγκρίσεις έγινε και σύγκριση των μεθόδων με αλλαγή της ραδιομετρίας της δεξιάς εικόνας με φυσικό τρόπο σε διαφορετικές θέσεις. Αυτού του είδους η αλλαγή ραδιομετρίας μοιάζει περισσότερο με γραμμική όμως εμπεριέχει και τοπικές αλλαγές οι οποίες επηρέασαν αρνητικά τη μέθοδο HMI. Όμοια με πριν, οι αποδοτικότερες μέθοδοι ήταν οι BT με το φίλτρο BilSuB, η NCC και η Census. Η τελευταία σύγκριση περιελάμβανε την προσθήκη τεχνητού θορύβου (Gaussian noise) και στις δύο εικόνες με διάφορους λόγους σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR)⁸, όπου όλες οι μέθοδοι στον τοπικό

προσεγγίζουν το μοντέλο αυτό (π.χ. το χιόνι, η άμμος, τα υφάσματα, οι τοίχοι των δωματίων, κάποια δάπεδα, το δέρμα και το χαρτί).

⁸ Μεγαλύτερος λόγος SNR σημαίνει πως υπάρχει λιγότερος θόρυβος στις εικόνες.

αλγόριθμο είχαν χαμηλή απόδοση λόγω της διαδικασίας συσσωμάτωσης. Δεν συνέβη το ίδιο όμως με τον ημι-καθολικό και τον καθολικό αλγόριθμο graph cuts όπου η μέθοδος που υπερίσχυσε ήταν η HMI. Επίσης, αναφέρεται πως μετά από κανονικοποίηση των σφαλμάτων για το κάθε στερεοζεύγος και τον κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά, αποδείχθηκε πως για την περίπτωση της μεθόδου Census η απόδοσή της δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα της σκηνής σε αντίθεση με τις μεθόδους AD και BT και HMI.

Στο [6] στο ίδιο σετ δεδομένων με το [7] οι μέθοδοι SAD και SSD με τον τοπικό αλγόριθμο είχαν τα ίδια περίπου αποτελέσματα μεταξύ τους, όμως σε χαμηλές τιμές περικοπής του κόστους συσχέτισης είχαν υψηλά σφάλματα. Γενικώς η τιμή της περικοπής του κόστους συσχέτισης ποικίλλει ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο στερεοζεύγος και μπορεί να μειώσει την επιρροή των εσφαλμένων συνταυτίσεων κυρίως στις περιοχές όπου τα ψηφιακά παράθυρα εμπεριέχουν ασυνέχειες βάθους. Αυτό όμως που απαιτείται είναι ο υπολογισμός της βέλτιστης τιμής της ανάλογα με τον λόγο SNR. Καλύτερη εναλλακτική αντί της εύρεσης της βέλτιστης τιμής της περικοπής του κόστους συσχέτισης μπορεί να είναι η χρήση των μετακινούμενων παραθύρων (shiftable windows) τα οποία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στις ασυνέχειες βάθους που περιλαμβάνουν περιοχές με αρκετή υφή. Η μέθοδος BT τόσο με τη μέθοδο SAD όσο και με την SSD, απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις (ιδιαίτερα στις χαμηλές τιμές περικοπής) σε σχέση με τις παραδοσιακές SAD και SSD με τον τοπικό αλγόριθμο.

Στην εφαρμογή [21] έγινε προσπάθεια να γίνει σύγκριση μεταξύ των μεθόδων κόστους συσχέτισης όχι μόνο για μικρές βάσεις λήψης που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες αξιολογήσεις αλλά και για μεγαλύτερες οι οποίες συνεπάγονται μεγαλύτερες ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές αλλά και εναέριες εικόνες σε διάφορους λόγους μεταξύ της βάσης λήψης (B) και του ύψους πτήσης (H). Η σύγκριση αφορούσε τις μεθόδους AD, Census, HMI και του CMIC (συνδυασμός των μεθόδων Census και HMI) με τον ημι-καθολικό αλγόριθμο. Στις εναέριες εικόνες η απόδοση της μεθόδου AD μειωνόταν απότομα όσο μεγάλωνε ο λόγος B/H λόγω των επιφανειών των αντικειμένων που δεν ήταν Λαμπερτιανές αλλά και λόγω των διαφόρων ραδιομετρικών παραμορφώσεων. Παρόλα αυτά, σε μικρότερους λόγους B/H η μέθοδος HMI υπερίσχυσε της AD, καθώς ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους που παρήγαγε ήταν ομαλότερος με έντονες τις ακμές των αντικειμένων. Παράλληλα, δεν εμπεριείχε θόρυβο ειδικά στις αστικές περιοχές. Η μέθοδος Census στις μικρές βάσεις λήψης παρήγαγε έναν θορυβώδη πίνακα ανομοιοτήτων βάθους με

τις ακμές των αντικειμένων να είναι θολές, όμως στις μεγαλύτερες βάσεις είχε τα πιο αποδοτικά αποτελέσματα. Η συνδυαστική μέθοδος MIC αξιοποίησε τα πλεονεκτήματα των μεθόδων HMI και Census και για αυτό ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά στους μεγαλύτερους λόγους Β/Η διατηρώντας συγχρόνως τις ακμές και την ομαλότητα των επιφανειών των αντικειμένων. Με βάση τις δορυφορικές εικόνες που αποκτήθηκαν από τον δορυφόρο Worldview-1, η συνολική περιοχή ενδιαφέροντος περιελάμβανε αστικά, ημιαστικά και ορεινά κομμάτια. Η μέθοδος HMI και στις τρεις περιοχές ήταν η λιγότερο αποδοτική, ενώ αυτή που εμφάνισε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν η MIC και αμέσως μετά η Census.

Κεφάλαιο 4:

Αλγόριθμοι Συσχέτισης

4.1 Τοπικός Αλγόριθμος (Local Algorithm)

Οι τοπικές μέθοδοι δίνουν περισσότερη έμφαση στη διαδικασία υπολογισμού του κόστους συσχέτισης και του σταδίου της συνάθροισής του σε μία περιοχή υποστήριξης (ψηφιακό παράθυρο). Οι περιοχές υποστήριξης μπορεί να είναι είτε δισδιάστατες (ευνοώντας μειωτικά παράλληλες επιφάνειες) είτε τρισδιάστατες (υποστηρίζοντας κεκλιμένες επιφάνειες). Οι πιο απλές περιπτώσεις των περιοχών υποστήριξης είναι αυτές που τα ψηφιακά παράθυρα είναι τετραγωνικά όπως περιγράφηκε στο Σχήμα 3.1. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί περιοχές υποστήριξης όπου η διαδικασία συσσωμάτωσης εκτελείται είτε με συνέλιξη με φίλτρο Gauss ή με προσαρμοζόμενα βάρη με διωνυμικό φίλτρο⁹, είτε με ψηφιακά παράθυρα με προσαρμοζόμενες διαστάσεις και σχήμα όπως τα μετακινούμενα παράθυρα (shiftable windows), είτε με παράθυρα κατάτμησης κ.λπ. (βλ. [6], [22]).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όσον αφορά τις μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν απλά ψηφιακά παράθυρα για τη διαδικασία συσσωμάτωσης, ο υπολογισμός της ανομοιότητας βάθους της κάθε εικονοψηφίδας εξαρτάται μόνο από την τιμή της έντασής της μέσα σε αυτά. Η αντιστοίχιση του κάθε παραθύρου αναφοράς και ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισής του για το αντίστοιχο παράθυρο αναζήτησης εκτελείται ανεξάρτητα χωρίς να επηρεάζεται από άλλα

⁹ Οι προσεγγίσεις που κάνουν χρήση περιοχών υποστήριξης με ψηφιακά παράθυρα με βάρη ως προς το κέντρο τους, έχουν την ιδιαιτερότητα ότι η κάθε εικονοψηφίδα μέσα σε ένα παράθυρο συσσωμάτωσης επηρεάζει το τελικό κόστος συσχέτισης βασιζόμενη όχι μόνο στην τιμή της έντασής της αλλά και στην απόστασή της από την κεντρική εικονοψηφίδα του παραθύρου. [22]

σημεία. Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται Block Matching και υπάγονται στην κατηγορία των επιφανειακών συνταυτίσεων με το κόστος συσχέτισής τους να υπολογίζεται με κάποιες από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στο Κεφ.3. Η επιλογή των διαστάσεων ενός παραθύρου αποτελεί ζήτημα βαρύνουσας σημασίας. Για να είναι αξιόπιστος ο υπολογισμός του κόστους συσχέτισης, πρέπει οι διαστάσεις του να είναι τόσο μεγάλες, ώστε να περιέχεται όλη η απαραίτητη πληροφορία (τιμές έντασης) και να μειώνεται παράλληλα η πιθανότητα εσφαλμένων συνταυτίσεων. Συγχρόνως, οι διαστάσεις του πρέπει να είναι τόσο μικρές, ώστε να ελαχιστοποιείται η μεταβολή της ανομοιότητας βάθους μέσα στο παράθυρο. Η πρώτη περίπτωση αφορά κυρίως τις περιοχές με ελλιπή υφή ενώ η δεύτερη αφορά περισσότερο κεκλιμένες επιφάνειες ή ασυνέχειες βάθους κοντά στα όρια των αντικειμένων. Όταν ένα παράθυρο διασχίσει μία ασυνέχεια βάθους, τότε κάποια σημεία θα συνταυτιστούν με την ανομοιότητα βάθους του αντικειμένου στο εμπροσθεν μέρος της σκηνής ενώ τα υπόλοιπα θα συνταυτιστούν με αυτό στο πίσω μέρος της σκηνής, με αποτέλεσμα το τελικό συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης των σημείων κοντά στην ασυνέχεια βάθους να κυμαίνεται μεταξύ δύο ανομοιοτήτων βάθους. Γενικά, από τις δύο περιοχές αυτή που θα περιοριστεί είναι αυτή που περιέχει περισσότερη υφή. Τελικά, η επιλογή ενός ψηφιακού παραθύρου με μεγάλες διαστάσεις έχει ως αποτέλεσμα έναν ομαλότερο αλλά όχι και τόσο ακριβή πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Αντίθετα, επιλέγοντας ένα παράθυρο μικρότερων διαστάσεων τα αποτελέσματα είναι πιο ακριβή. Ωστόσο, ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους περιέχει περισσότερο θόρυβο ενώ παράλληλα αυξάνεται η πιθανότητα να γίνουν εσφαλμένες αντιστοιχίσεις.

Εκτός από τις μεθόδους Block Matching υπάρχουν και άλλες μέθοδοι όπως οι Gradient-Based Optimization και οι Feature Matching που αναφέρονται στο [2]. Τέλος, αναφέρεται πως οι τοπικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν σε σχέση με τους άλλους αλγόριθμους κυρίως ως προς τον χρόνο εφαρμογής τους, καθώς δεν έχουν μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Παρόλα αυτά, σε αρκετές εφαρμογές παρά την απλή λογική τους έχουν αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

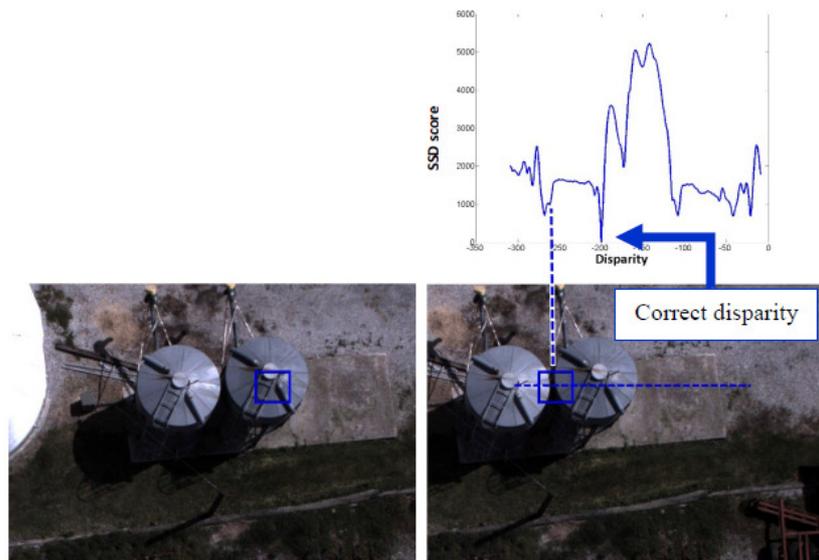
4.1.1 Winner Takes All (WTA)

Μετά τον υπολογισμό και τη συνάθροιση των κοστών συσχέτισης, η μέθοδος που χρησιμοποιείται στις τοπικές μεθόδους είναι η Winner Takes All (WTA) με την οποία επιλέγεται η ανομοιότητα βάθους d_p της κάθε εικονοψηφίδας που

σχετίζεται με το συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης που έχει τη χαμηλότερη τιμή (Σχήμα 4.1). Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για την κάθε εικονοψηφίδα, παράγεται ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους D .

$$D = \forall p | : \arg \min_{d_p} \left(\sum_{q \in N(p)} E_{data}(d_p) \right) \quad (4.1)$$

, όπου p και $N(p)$ είναι το κάθε σημείο του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους και η περιοχή συνάθροισης (γειτονικές εικονοψηφίδες) αντίστοιχα, ενώ ο όρος $E_{data}(d_p)$ είναι τα κόστη συσχέτισης που έχουν υπολογισθεί με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στο Κεφ.3 (π.χ. SAD, SSD, NCC κ.λπ.).



Σχήμα 4.1 Παράδειγμα υπολογισμού της ανομοιοτήτας βάθους με τη μέθοδο WTA υπολογίζοντας το συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης με τη μέθοδο SSD. [23]

4.2 Καθολικός Αλγόριθμος (Global Algorithm)

Για τον υπολογισμό της ανομοιοτήτας βάθους οι καθολικές στέρεο μέθοδοι αγνοούν τη διαδικασία συσσωμάτωσης και εκτελούν κάποιες επαναληπτικές διαδικασίες ή διαδικασίες βελτιστοποίησης. Αντί της διαδικασίας συσσωμάτωσης χρησιμοποιούνται οι δεσμεύσεις διάταξης των εικονοστοιχείων και ομαλότητας οι οποίες ελαχιστοποιούν τις αναντιστοιχίες μεταξύ των εικονοψηφίδων και βοηθούν στην εξομάλυνση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Το αντικείμενο των καθολικών μεθόδων είναι η αναζήτηση αυτών των ανομοιοτήτων βάθους d που

ελαχιστοποιούν μία καθολική συνάρτηση ενέργειας $E(d)$. Έτσι, με τον τρόπο αυτό παράγεται ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους D .

$$D = \arg \min (E_d (d_p)) \quad (4.2)$$

$$E(d) = E_{data} (d) + \lambda E_{smooth} (d) \quad (4.3)$$

Ο όρος $E_{data} (d)$ περιέχει τα κόστη συσχέτισης σε επίπεδο εικονοψηφίδων ή τα συσσωματωμένα κόστη συσχέτισης (για περιπτώσεις όπως του συντελεστή συσχέτισης) στο DSI (βλ. Κεφ.4.2.1).

$$E_{data} (d) = \sum_{(x,y)} C(x, y, d(x, y)) \quad (4.4)$$

Ένας τρόπος για τη μαθηματική κωδικοποίηση των δεσμεύσεων ομαλότητας είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς των ανομοιοτήτων βάθους μεταξύ των γειτονικών εικονοψηφίδων σε όλη την εικόνα (κατακόρυφα και οριζόντια) (βλ. [22], [24]).

$$E_{smooth} (d) = \sum_{(x,y)} p(d(x, y) - d(x + 1, y)) + p(d(x, y) - d(x, y + 1)) \quad (4.5)$$

, όπου ο όρος p συμβολίζει μία γνησίως αύξουσα συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ των ανομοιοτήτων βάθους και y η εκάστοτε γραμμή σάρωσης. Στο [22] αναφέρεται πως ο όρος $E_{smooth} (d)$ μπορεί να μετασχηματιστεί, ώστε να εξαρτάται και από τις διαφορές των αντίστοιχων εντάσεων δηλαδή ως

$$E_{smooth} (d) = p_d (d(x, y) - d(x + 1, y)) \cdot p_I (\|I(x, y) - I(x + 1, y)\|) \quad (4.6)$$

, όπου p_I είναι μία γνησίως φθίνουσα συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ των εντάσεων που μειώνει το κόστος ομαλότητας σε περιπτώσεις όπου οι κλίσεις μεταξύ των εντάσεων είναι υψηλές. Επίσης, αναφέρεται πως το εύρος των τιμών των κοστών συσχέτισης επηρεάζει την τιμή λ η οποία σχετίζεται με το βάρος του όρου

$E_{smooth}(d)$. Για παράδειγμα, όταν για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης χρησιμοποιείται η μέθοδος SD, τότε απαιτείται μεγαλύτερη τιμή λ σε σχέση με το αν χρησιμοποιούταν η μέθοδος AD. Επομένως, ένα επιπλέον ζήτημα είναι η εύρεση της βέλτιστης τιμής λ ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης.

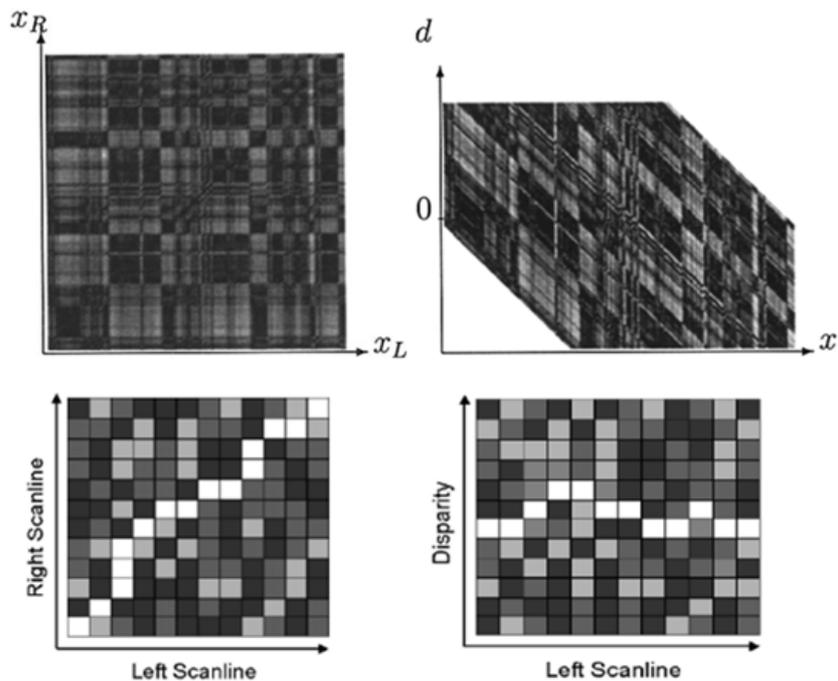
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι καθολικές μέθοδοι δεν χρησιμοποιούν τοπικές δεσμεύσεις όπως για παράδειγμα τη δέσμευση ομοιότητας μεταξύ πιθανών ομολογιών, αλλά εκμεταλλεύονται δεσμεύσεις όπως αυτή της ομαλότητας και της διάταξης των εικονοψηφίδων. Με αυτόν τον τρόπο οι αλγόριθμοι αυτοί είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε περιοχές που έχουν ελλιπή υφή. Παρόλα αυτά το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του καθολικού κόστους συσχέτισης είναι NP-hard (Non-deterministic Polynomial-time hard) έχοντας στην πράξη μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα από τις τοπικές μεθόδους. Για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης ενέργειας έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι όπως ο δυναμικός προγραμματισμός, graph cuts, belief propagation, simulated annealing, intrinsic curves κ.α. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα ακριβείς και αποτελεσματικές (ιδιαίτερα η graph cuts), ωστόσο μειονεκτούν ως προς τον χρόνο εφαρμογής τους λόγω του υψηλού υπολογιστικού κόστους (ιδιαίτερα σε εικόνες υψηλής ανάλυσης) αλλά και ως προς τις υψηλές απαιτήσεις τους στην μνήμη του υπολογιστή.

4.2.1 Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic programming - DP)

Σε αυτή τη μέθοδο η καθολική συνάρτηση ενέργειας υπολογίζεται σε στάδια, όπου η μετάβαση από στάδιο σε στάδιο καθορίζεται μέσα από έναν αριθμό δεσμεύσεων [2]. Σε αυτή τη μέθοδο εκτός από τη δέσμευση ομαλότητας χρησιμοποιείται και η δέσμευση διάταξης των εικονοψηφίδων κατά μήκος των επιπολικών ευθειών, η οποία επιτρέπει στην καθολική συνάρτηση ενέργειας να καθορίζεται ως η ελάχιστη σε κόστος διαδρομή μέσα σε μία δομή Disparity Space Image (DSI). Η ελαχιστοποίηση αυτή γίνεται μονοδιάστατα (1D) καθώς για το κάθε ζεύγος αντίστοιχων γραμμών σάρωσης κατασκευάζεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα ζευγάρια μία δομή DSI η οποία περιέχει όλα τα τοπικά κόστη συσχέτισης μεταξύ των πιθανών ομολογιών. Για την κάθε δομή DSI επιλέγεται η ελάχιστη σε κόστος διαδρομή της οποίας το κόστος συσχέτισης είναι το άθροισμα των ελάχιστων τοπικών κοστών συσχέτισης (βλ. εξίσωση (4.7)). Το τοπικό κόστος

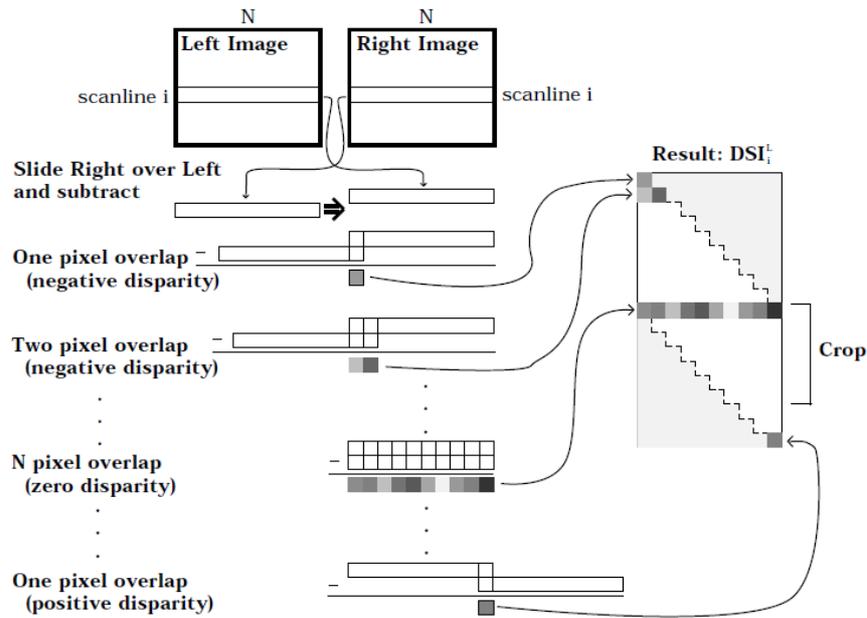
συσχέτισης για το κάθε σημείο στο DSI υπολογίζεται με μία από τις μεθόδους σε επίπεδο εικονοψηφίδων όπως αυτές που αναφέρθηκαν στο Κεφ.3.

Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να δομηθεί ένα DSI είναι δύο. Ο πρώτος τρόπος γίνεται με τον ορισμό δύο αξόνων, όπου ο κατακόρυφος άξονας είναι η δεξιά γραμμή σάρωσης ενώ ο οριζόντιος άξονας είναι η αριστερή γραμμή σάρωσης. Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού προσδιορίζει την ελάχιστη σε κόστος διαδρομή από την κάτω αριστερή γωνία έως την πάνω δεξιά γωνία (ή και αντίστροφα) του DSI. Ο δεύτερος τρόπος δόμησης του DSI γίνεται όμοια με τον πρώτο τρόπο με την διαφορά πως ο κατακόρυφος άξονας είναι το εύρος των ανομοιοτήτων βάθους. Αντίθετα με πριν, η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την ελάχιστη σε κόστος διαδρομή από την πρώτη έως την τελευταία στήλη.



Σχήμα 4.2 Πρώτος και δεύτερος τρόπος δόμησης του DSI. Στις πάνω εικόνες παρουσιάζονται πραγματικές περιπτώσεις DSI ενώ στις κάτω εικόνες παραδείγματα όπου είναι εμφανής η ελάχιστη σε κόστος διαδρομή με φωτεινότερες εικονοψηφίδες αυτές με το μικρότερο κόστος συσχέτισης. [2], [25]

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο παράγεται το DSI με άξονες την ανομοιοτητα βάθους και την αριστερή γραμμή σάρωσης. Το κόστος συσχέτισης της κάθε εικονοψηφίδας μεταξύ των δύο γραμμών σάρωσης απεικονίζεται σε τόνους του γκρι ενώ παράλληλα καταχωρείται η ανομοιοτητα βάθους η οποία παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές.

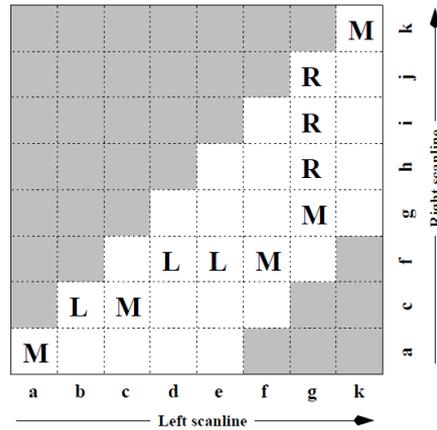


Σχήμα 4.3 Μεθοδολογία υπολογισμού του DSI με άξονες την ανομοιότητα βάθους και την αριστερή γραμμή σάρωσης. [26]

Για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας κατά την εύρεση της ελάχιστης σε κόστος διαδρομής γίνεται η χρήση κατωφλίων ως προς τη μέγιστη και την ελάχιστη ανομοιότητα βάθους, για να περιοριστεί το εύρος των ανομοιοτήτων βάθους (Σχήμα 4.4). Με τη χρήση της δέσμευσης διάταξης των εικονοψηφίδων, κάθε εικονοψηφίδα στο DSI χαρακτηρίζεται είτε ως ταυτισμένη είτε ως αποκρυπτόμενη (είτε από δεξιά είτε από αριστερά). Στη δεύτερη περίπτωση προστίθεται μία σταθερή τιμή κόστους λόγω αυτής της απόκρυψης. Στην περίπτωση που η εικονοψηφίδα είναι αποκρυπτόμενη, αυτό καταγράφεται στο DSI επηρεάζοντας τη μορφή της ελάχιστης σε κόστος διαδρομής (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.4 Παράδειγμα δομής DSI μετά την κατωφλίωση. [6]



Σχήμα 4.5 Διαμόρφωση της ελάχιστης σε κόστος διαδρομής (μετά την κατωφλίωση του DSI) από τις εικονοψηφίδες που έχουν τον χαρακτηρισμό M (ταυτισμένες), L (ορατές μόνο από αριστερά) και R (ορατές μόνο από δεξιά). [22]

Συνεπώς, το κόστος της ελάχιστης διαδρομής $D(m,n)$ μπορεί να υπολογιστεί ανάλογα με τον χαρακτηρισμό της κάθε εικονοψηφίδας (M, L, R) ως

$$\begin{aligned}
 D(m,n,M) &= \min(D(m-1,n-1,M), D(m-1,n,L), D(m-1,n-1,R)) + C'(m,n) \\
 D(m,n,L) &= \min(D(m-1,n-1,M), D(m-1,n,L)) + O \\
 D(m,n,R) &= \min(D(m,n-1,M), D(m,n-1,R)) + O
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

, όπου O η ποινή κόστους λόγω απόκρυψης και $C'(m,n)$ το τοπικό κόστος συσχέτισης στο DSI.

Εκτός από την ελαχιστοποίηση του καθολικού κόστους συσχέτισης στις ανεξάρτητες γραμμές σάρωσης, έχουν προταθεί και άλλες προσεγγίσεις με επιπλέον δεσμεύσεις, μέσω των οποίων μπορεί να μειωθεί περαιτέρω η ασάφεια κατά την στέρεο συνταύτιση (βλ.[2]). Ένα από τα πλεονεκτήματα του δυναμικού προγραμματισμού αλλά και γενικώς των καθολικών μεθόδων είναι ότι μπορούν να υποστηρίξουν περιοχές που έχουν ελλειπή υφή που σε αντίθετη περίπτωση η συνταύτιση τους θα ήταν εσφαλμένη. Όπου παρουσιάζονται τέτοιες περιοχές τοπικά δεν αποτελούν ιδιαίτερο πρόβλημα στις καθολικές μεθόδους, καθώς η συνάρτηση κόστους συσχέτισης (π.χ. διαφοράς έντασης) σε αυτές είναι χαμηλή. Από την άλλη μεριά, ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως, όταν εφαρμόζεται η συνάρτηση κόστους κοντά σε περιοχές με αποκρύψεις, τότε αυτή παίρνει υψηλές τιμές καθιστώντας έτσι δύσκολη την επιλογή του βέλτιστου κόστους συσχέτισης για αυτές τις εικονοψηφίδες. Παράλληλα, η απαίτηση της

μεθόδου για την επιβολή της δέσμευσης διάταξης των εικονοψηφίδων αυξάνει την πιθανότητα να διαδοθούν τοπικά λάθη λόγω των αποκρύψεων κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης επηρεάζοντας άλλες πιθανές καλές ομολογίες. Λόγω αυτού του προβλήματος και μετά την συμπλήρωση των κενών του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους από τις έγκυρες γειτονικές ανομοιοότητες βάθους που προηγούνται στην γραμμή σάρωσης, παρουσιάζονται σε αυτόν οριζόντιες ραβδώσεις. Αυτό έχει ως συνέπεια η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού να μειονεκτεί σε σχέση με άλλες καθολικές μεθόδους αλλά και με άλλες προσεγγίσεις όπως ο ημι-καθολικός αλγόριθμος ο οποίος αναλύεται στο παρακάτω κεφάλαιο.

Μία παραλλαγή του δυναμικού προγραμματισμού είναι η μέθοδος scanline optimization (SO). Η μέθοδος αυτή διαφέρει κυρίως στο ότι δεν ασχολείται με τις κατακόρυφες γραμμές σάρωσης στις δεσμεύσεις ομαλότητας της εξίσωσης (4.5) και στο ότι δεν χρησιμοποιεί τη δέσμευση διάταξης των εικονοστοιχείων. Οι διαφορές αυτές κάνουν αυτή τη μέθοδο πιο απλή υπολογιστικά σε σχέση με τον δυναμικό προγραμματισμό, ωστόσο εμφανίζει και αυτή οριζόντιες ραβδώσεις στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Παρόλα αυτά, οι μέθοδοι του δυναμικού προγραμματισμού και scanline optimization, όταν συνδυάζονται με εξελιγμένες μεθόδους συσσωμάτωσης ή όταν χρησιμοποιούν φωτοσταθερά σημεία (GCPs) (βλ. [26]), μπορούν να παράξουν ακριβή αποτελέσματα και σε σχετικά μικρό υπολογιστικό χρόνο.

4.3 Ημι-καθολικός Αλγόριθμος (Semi Global Algorithm - SGM)

Η ημι-καθολική μέθοδος είναι μία προσέγγιση μεταξύ των τοπικών και καθολικών αλγορίθμων. Επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει μια καθολική συνάρτηση ενέργειας $E(d)$ επιλύοντας έναν αριθμό από μονοδιάστατα (1D) προβλήματα ελαχιστοποίησης με τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού ή της scanline optimization. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρόλο που οι καθολικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ποιότητα και ακρίβεια, πάσχουν συνήθως από την υψηλή υπολογιστική τους πολυπλοκότητα η οποία οδηγεί μερικές φορές σε χαμηλές αποδόσεις. Αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση του ημι-καθολικού αλγορίθμου αποδίδοντας συγχρόνως περίπου τα ίδια αποτελέσματα με τις καθολικές μεθόδους.

Όπως και στους υπόλοιπους αλγόριθμους, ο βασικός στόχος σε πρώτο στάδιο είναι η συσχέτιση της κάθε εικονοψηφίδας της εικόνας αναφοράς με την ομολογή

της στην εικόνα αναζήτησης. Κάθε σχέση μεταξύ ομόλογων εικονοψηφίδων, περιγράφεται από τον όρο κόστους συσχέτισης και το άθροισμα αυτών των κοστών ορίζει το καθολικό κόστος συσχέτισης για το οποίο ισχύει η υπόθεση ότι είναι το ελάχιστο όταν υφίσταται η βέλτιστη συνταύτιση μεταξύ των εικονοψηφίδων. Ο Hirschmüller [12] όρισε τη συνάρτηση ενέργειας ως

$$E(D) = \sum_p \left(C(p, d_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|d_p - d_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_p - d_q| > 1] \right) \quad (4.8)$$

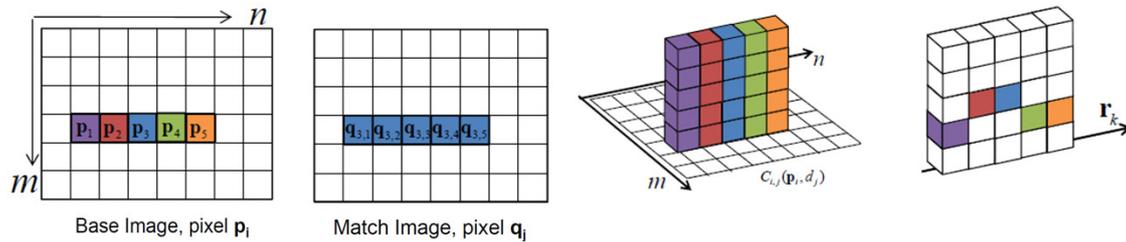
, όπου ο πρώτος όρος $C(p, d_p)$ είναι το κόστος συσχέτισης, ενώ ο δεύτερος ($P_1 T[|d_p - d_q| = 1]$) και ο τρίτος όρος ($P_2 T[|d_p - d_q| > 1]$) είναι οι δεσμεύσεις ομαλότητας. Ο δεύτερος όρος επιβάλλει ποινή P_1 για τις όλες τις εικονοψηφίδες $q_{i,j}$ σε μία γειτονιά N_p των οποίων οι ανομοιοτήτες βάθους διαφέρουν κατά μία (1) εικονοψηφίδα και επιτρέπει την καλή προσαρμογή του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους στις κεκλιμένες ή καμπύλες επιφάνειες. Ο τρίτος όρος επιβάλλει ποινή P_2 στις εικονοψηφίδες που έχουν μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των ανομοιοτήτων βάθους (ανεξαρτήτως του μεγέθους τους), δηλαδή εκεί όπου υπάρχουν ασυνέχειες βάθους. Για τον λόγο αυτό κρίνεται ωφέλιμη η προσαρμογή του όρου P_2 ανάλογα με την τοπική κλίση της έντασης των εικονοψηφίδων στην εικόνα αναφοράς I_b . Επομένως, ο όρος P_2 υπολογίζεται ως

$$P_2 = \frac{P_2'}{|I_{bp} - I_{bq}|} \quad (4.9)$$

Αυτό που θα πρέπει να επισημανθεί είναι πως σε κάθε περίπτωση πρέπει να διασφαλίζεται ότι $P_2 > P_1$, ώστε να γίνεται σωστά η εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου.

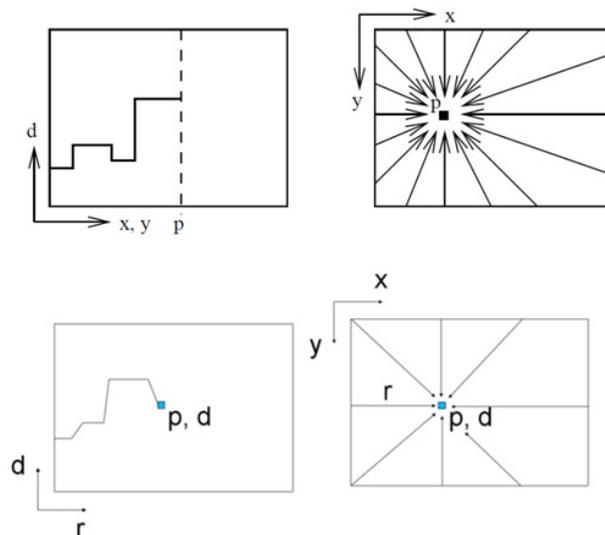
Ένα μειονέκτημα του τοπικού αλγορίθμου είναι πως το ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης που επιλέγεται δεν είναι πάντα διακριτό και επομένως ο υπολογισμός της ανομοιοτήτας βάθους μπορεί να είναι λανθασμένος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος εκτελείται στον ημι-καθολικό αλγόριθμο μία διαδικασία συσσωμάτωσης όπου συναρμολογείται μία δομή κόστους τύπου $N \times M \times H$, όπου H το σετ των πιθανών ομολογιών για το διάστημα μεταξύ της

μέγιστης και της ελάχιστης ανομοιότητας βάθους (εύρος ανομοιοτήτων βάθους) (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6 Η εικόνα αναφοράς και αναζήτησης και η επιλογή των ελαχίστων κοστών συσχέτισης από τη δομή $N \times M \times H$. [27]

Η δομή $N \times M \times H$ περιέχει τα συσσωματωμένα κόστη συσχέτισης $S(p, d)$ ενός αριθμού ελάχιστων σε κόστος διαδρομών. Για την κάθε εικονοψηφίδα p και ανομοιότητα βάθους d , το $S(p, d)$ υπολογίζεται με τη συνάθροιση των κοστών συσχέτισης όλων των απαιτούμενων ελάχιστων μονοδιάστατων διαδρομών κόστους (1D) που καταλήγουν σε αυτή την εικονοψηφίδα. Ο απαιτούμενος αριθμός των ελάχιστων σε κόστος διαδρομών είναι οκτώ (8) ενώ για καλύτερα αποτελέσματα μπορεί να είναι δεκαέξι (16) (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Η ελάχιστη σε κόστος διαδρομή στο Disparity Space Image (αριστερά) και οι 16 ή 8 κατευθύνσεις τους κατά τη διαδικασία συσσωμάτωσης στην εικόνα αναφοράς (δεξιά). [12], [28]

Το κόστος συσχέτισης κατά μήκος μίας μονοδιάστατης ελάχιστης σε κόστος διαδρομής σε μία κατεύθυνση r ορίζεται αθροιστικά ως

$$\begin{aligned}
L_r(p, d) = C(p, d) + \min(& L_r(p-r, d), \\
& L_r(p-r, d-1) + P_1, \\
& L_r(p-r, d+1) + P_1, \\
& \min_i L_r(p-r, i) + P_2)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

, όπου ο όρος $C(p, d)$ είναι το τοπικό κόστος συσχέτισης της κάθε εικονοψηφίδας το οποίο υπολογίζεται με μία από τις μεθόδους που περιγράφηκαν στο Κεφ.3. Στο υπόλοιπο τμήμα της εξίσωσης (4.10) προστίθεται το ελάχιστο κόστος συσχέτισης της προηγούμενης εικονοψηφίδας της ίδιας διαδρομής και συμπεριλαμβάνονται οι όροι P_1 και P_2 . Σημειώνεται πως σε αυτό το κόστος συσχέτισης δεν επιβάλλεται η δέσμευση διάταξης των εικονοψηφίδων, καθώς η δέσμευση αυτή δεν μπορεί να επιβληθεί σε διαδρομές που δεν ταυτίζονται με τις επιπολικές ευθείες. Επομένως, αυτή η προσέγγιση πλησιάζει τη μέθοδο scanline optimization παρά τον δυναμικό προγραμματισμό [6]. Συνεπώς, το κάθε συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης στη δομή $N \times M \times H$ υπολογίζεται ως

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d) \tag{4.11}$$

Η τελική τιμή του κάθε στοιχείου του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους D υπολογίζεται με τη μέθοδο WTA, δηλαδή γίνεται η επιλογή του ελάχιστου συσσωματωμένου κόστους συσχέτισης $S(p, d)$. Έτσι, ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους υπολογίζεται ως

$$D = \arg \min_d S(p, d) \tag{4.12}$$

Ο ημι-καθολικός αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός χωρίς να απαιτεί υψηλό υπολογιστικό χρόνο και εφαρμόζεται αρκετά στην συνταύτιση εναέριων εικόνων υψηλής ανάλυσης σε περιοχές με δομημένο περιβάλλον. Ωστόσο, ανάλογα με το είδος της σκηνής αντιμετωπίζει προβλήματα που έχουν να κάνουν κυρίως με αντικείμενα των οποίων το υπόβαθρο τους έχει ελλιπή υφή.

Κεφάλαιο 5:

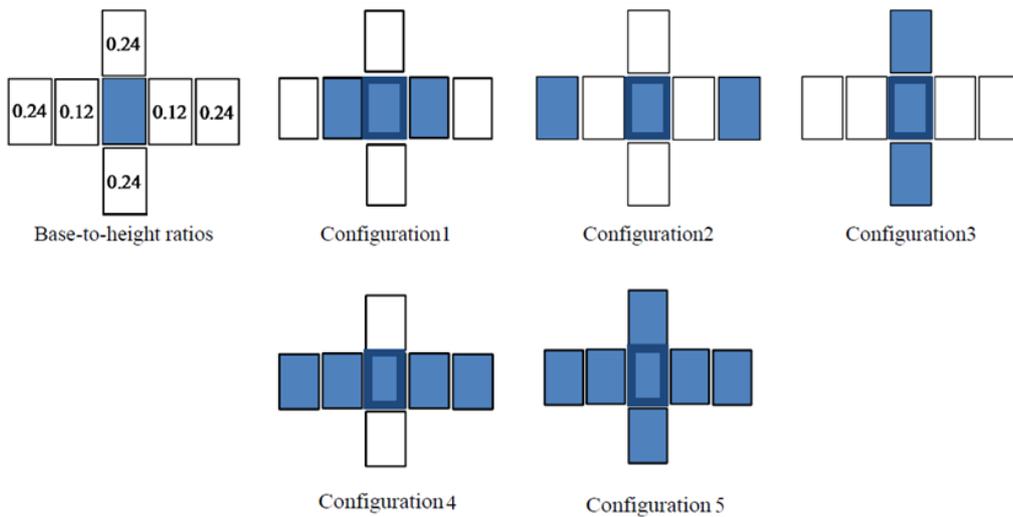
Εφαρμογές σε εναέριες εικόνες με τον τοπικό και τον ημι-καθολικό αλγόριθμο

5.1 Εφαρμογές με κατακόρυφες εικόνες

Η ποιότητα ενός ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας που παράγεται μέσα από τη διαδικασία της πυκνής συνταύτισης σημείων εξαρτάται σημαντικά από την γεωμετρία της λήψης των εικόνων. Αυτό σημαίνει πως ο κάθε συνδυασμός εικόνων δίνει διαφορετικής ποιότητας αποτελέσματα σε ακρίβεια και αξιοπιστία. Ο N.Haala [27] εφήρμοσε διαφορετικούς γεωμετρικούς συνδυασμούς πολλών εναέριων εικόνων που είχαν πολλαπλές επικαλύψεις και απεικόνιζαν αστικές περιοχές (Σχήμα 5.1). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι χρησιμοποιούμενες εικόνες αποκτήθηκαν από φωτομηχανή υψηλής ανάλυσης (βλ. [29]). Ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε ήταν ο ημι-καθολικός σε συνδυασμό με τη μέθοδο MI. Όπως αποδείχθηκε, ο λόγος της βάσης λήψης προς το ύψος πτήσης επηρεάζει σημαντικά τόσο την υπομετρική ακρίβεια¹⁰ των σημείων όσο και το ποσοστό των συνταυτισμένων σημείων. Πιο συγκεκριμένα, όσο η βάση λήψης αυξανόταν για

¹⁰ Στην «κανονική» περίπτωση του στερεοζεύγους η υπομετρική ακρίβεια εξαρτάται σημαντικά από τον λόγο B/H καθώς ισχύει $\sigma_H = (H^2 / (B \cdot c)) \cdot \sigma_{px}$ όπου B η βάση λήψης, c η σταθερά της μηχανής και σ_{px} το σφάλμα της x-παραλλάξης.

δεδομένο ύψος πτήσης (δηλαδή όσο μειωνόταν το ποσοστό της επικάλυψης) η υψομετρική ακρίβεια των σημείων βελτιωνόταν¹¹ ενώ παράλληλα το ποσοστό των συνταυτισμένων σημείων μειωνόταν. Η μείωση αυτή του ποσοστού των συνταυτισμένων σημείων σχετίζεται άμεσα με την παρουσία αποκρύψεων, καθώς είναι προφανές πως οι μεγαλύτερες βάσεις λήψεις εντείνουν την παρουσία τους. Οι μικρότερες βάσεις λήψεις διευκολύνουν την πυκνή συνταύτιση των εικόνων, μειονεκτούν όμως ως προς την γεωμετρία, καθώς εμφανίζουν προβλήματα στην αλληλοτομία¹² των ομόλογων ακτίνων.



Σχήμα 5.1 Λόγοι B/H και συνδυασμοί εικόνων. [27]

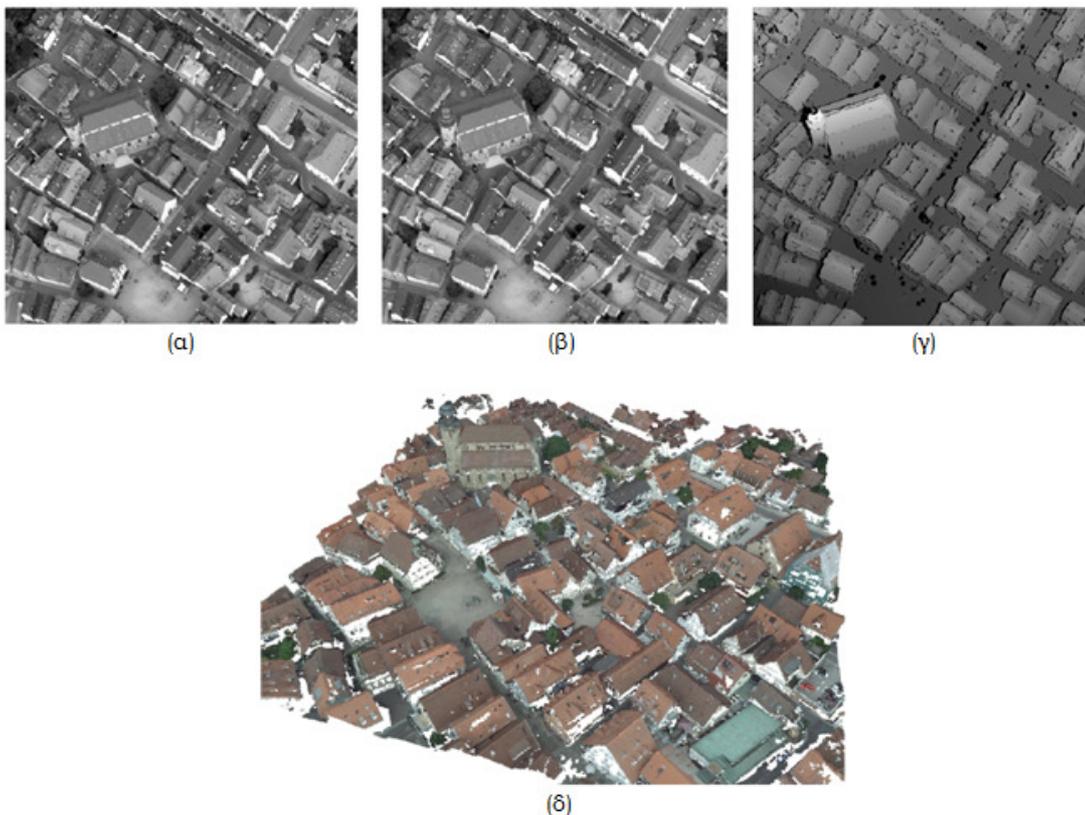
Πρέπει να σημειωθεί πως για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται εικόνες από διαφορετικές λωρίδες λήψης (Σχήμα 5.1, Configuration 3), παρόλο που ο λόγος B/H είναι ίδιος με αυτόν με εικόνες από την ίδια λωρίδα λήψης (Σχήμα 5.1, Configuration 1), τα αποτελέσματα είναι δυσμενέστερα και παρουσιάζουν διαφορές. Αυτό οφείλεται στη χρονική διαφορά με την οποία φωτογραφίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος όπου η έκθεση των αντικειμένων είναι διαφορετική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη έντονων ραδιομετρικών διαφορών μεταξύ των εικόνων. Οι συνδυασμοί Configuration 4 και 5 εκμεταλλεύονται σε μεγάλο βαθμό την πλεονάζουσα πληροφορία από τις πολλαπλές εικόνες συνδυάζοντας διαφορετικούς λόγους B/H. Ειδικότερα ο συνδυασμός Configuration 5 εκμεταλλεύεται τρεις λωρίδες λήψεις παρέχοντας όλη την απαιτούμενη

¹¹ Για την αποφυγή κονδροειδών λαθών, οι αποδεκτές τιμές για τα τρισδιάστατα σημεία ήταν αυτές που η τυπική τους απόκλιση δεν ξεπερνούσε το 3σ .

¹² Η γεωμετρία της λήψης έχει να κάνει με την αλληλοτομία των ομόλογων ακτίνων που στην ιδανική περίπτωση σχηματίζουν παραλλακτική γωνία ίση με 90° (βλ. [30]).

πληροφορία για την ακριβή και πλήρη καταγραφή του κάθε αντικειμένου (Σχήμα 5.2). Τελικά, οι ακρίβειες που επιτεύχθηκαν ήταν της τάξης των 0.14-0.25 pixels.

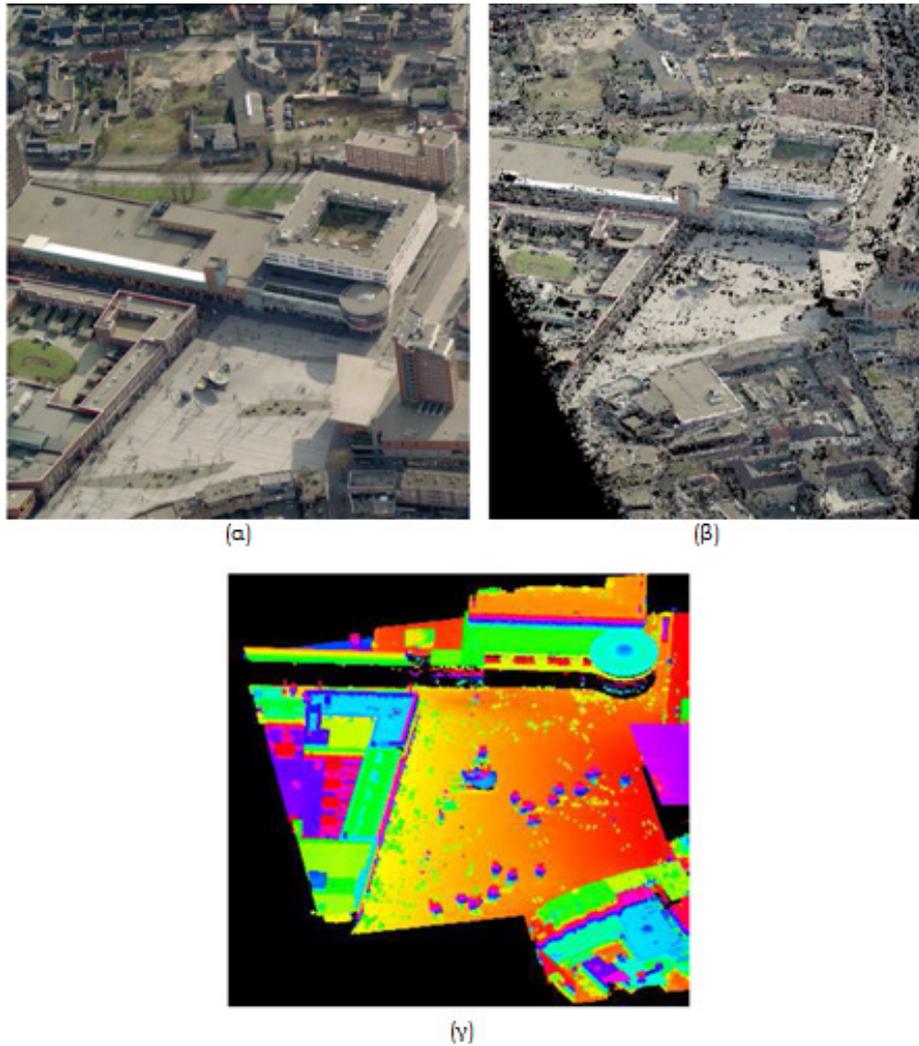
Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω κεφάλαια, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται στην συνταύτιση εικόνων (όπως και κατά τη σύνταξη αληθών ορθοφωτογραφιών) είναι το πρόβλημα των αποκρύψεων. Στις αστικές περιοχές το πρόβλημα αυτό είναι εντονότερο γι' αυτό και συνήθως προτείνεται η αύξηση της κατά πλάτος επικάλυψης από 20% σε 60% μεταξύ των εικόνων παρόλο το κόστος που απαιτεί μία τέτοια φωτογράφιση. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ορατότητα των αντικειμένων σε τουλάχιστον δύο γραμμές πτήσης, αποφεύγοντας έτσι την ύπαρξη περιοχών χωρίς πληροφορία. Όσον αφορά την κατά μήκος επικάλυψη, ο N.Haala [27] πρότεινε την αύξησή της από 60% που είναι στις συνήθεις εφαρμογές της κλασικής Φωτογραμμετρίας σε 80% για την επίτευξη του ίδιου στόχου, δηλαδή την πυκνή συλλογή πληροφορίας ειδικά σε αστικό περιβάλλον. Με επικαλύψεις αυτής της τάξης αλλά και με τη χρήση πολλών εικόνων, ελαχιστοποιούνται οι όποιες αναντιστοιχίες κατά την συνταύτιση των εικόνων και αυξάνεται η ποιότητα του νέφους σημείων.



Σχήμα 5.2 (α), (β) Εικόνες στερεοζεύγους (γ) Πίνακας βάθους με τον ημι-καθολικό αλγόριθμο και τη μέθοδο MI (δ) Νέφος σημείων από την ανακατασκευή της περιοχής ενδιαφέροντος. [27]

5.2. Εφαρμογές με πλάγιες εναέριες εικόνες

Σε άλλη εφαρμογή του M.Gerk [31] ο ημι-καθολικός αλγόριθμος με τη μέθοδο MI ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματικός με πολλαπλές εναέριες κατακόρυφες και πλάγιες εικόνες υψηλής ανάλυσης. Οι πλάγιες εικόνες, παρόλο που έχουν προβλήματα με τις διαφορές κλίμακας λόγω της γωνίας κλίσης και με τις αποκρύψεις (ειδικά στα ψηλότερα αντικείμενα), απεικονίζουν αρκετά καλά τις όψεις των κτιρίων. Ο M.Gerk χρησιμοποίησε τα συστήματα FLI-MAP400 (για πλάγιες και κατακόρυφες εικόνες) (βλ. [32]) και Pictometry (μόνο για πλάγιες εικόνες) (βλ. [33]). Επίσης, σύγκρινε τους πίνακες ανομοιοτήτων βάθους που προέκυψαν από τις εικόνες του κάθε συστήματος αλλά και μεταξύ τους, ενώ παράλληλα σύγκρινε τα παραγόμενα νέφη τρισδιάστατων σημείων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από ένα σύστημα LIDAR (Σχήμα 5.3). Βάσει της σύγκρισης αυτής το 60-70% των ομολογιών βρίσκονταν εντός του διαστήματος ± 3 pixels, το οποίο δείχνει την ικανότητα του ημι-καθολικού αλγορίθμου να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε τέτοιου είδους εικόνες δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές πλατφόρμες σε διάφορους συνδυασμούς.

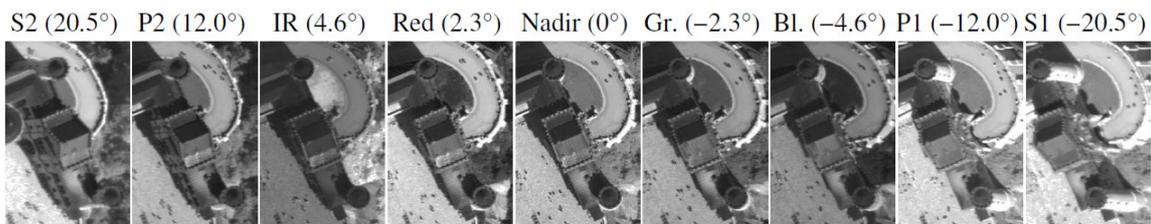


Σχήμα 5.3 (α) Αριστερή πλάγια εικόνα (β) Νέφος σημείων μέσω του ημι-καθολικού αλγορίθμου με τη μέθοδο MI (γ) Νέφος σημείων αναφοράς από το σύστημα LIDAR. [31]

5.3 Εφαρμογές με εναέριες εικόνες από δέκτες τύπου Pushbroom

Στο [34] μπορεί να βρει κανείς μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή σε αστική περιοχή, όπου εκτελείται πυκνή συνταύτιση σημείων με τη χρήση εναέριων εικόνων από δέκτες τύπου Pushbroom με την φωτομηχανή υψηλής ανάλυσης HRSC-AX (βλ. [35]). Η αρχή λειτουργίας των δεκτών τύπου Pushbroom είναι πως η κάθε εικόνα δημιουργείται με την κίνηση του αισθητήρα κατά μήκος της διεύθυνσης του αεροσκάφους με την κάθε λωρίδα σάρωσης να αποτελείται από μία σειρά εικονοστοιχείων με πλάτος ίσο με ένα (1) pixel. Οι εικόνες που αποκτώνται με λήψη στερεοζευγών από δέκτες τέτοιου τύπου με προγραμματισμό της κατεύθυνσης των τηλεσκοπίων, έχουν την ιδιαιτερότητα πως δεν κανονικοποιούνται

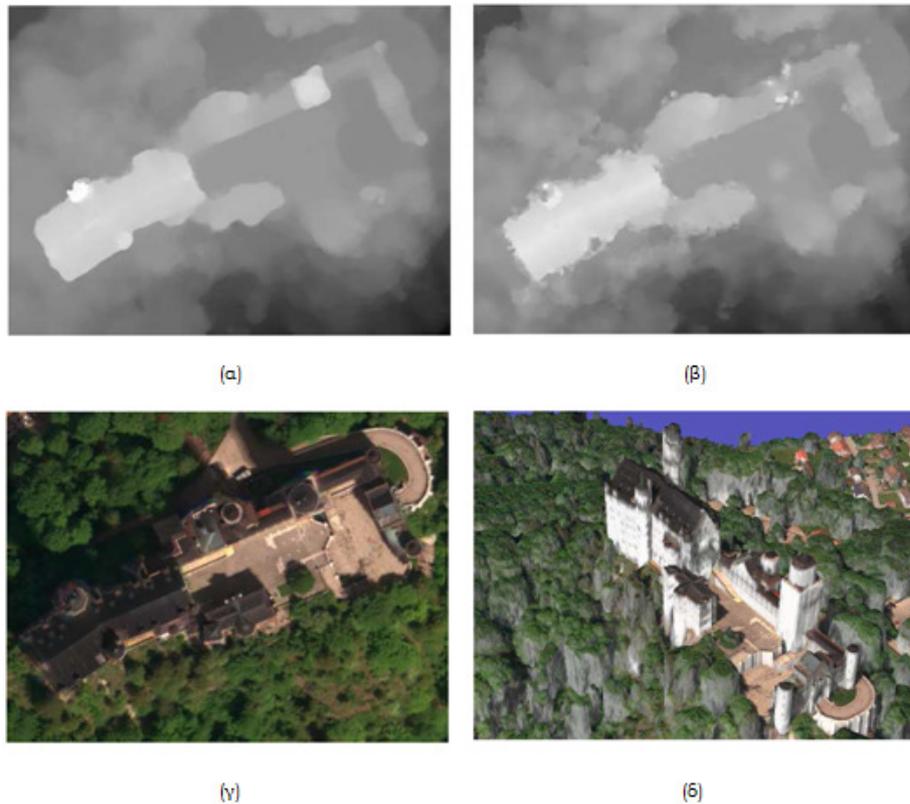
ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, όπως περιγράφηκε στο Κεφ.2.2.1, ακόμα και αν είναι γνωστή η επιπολική τους γεωμετρία. Η κίνηση του αεροσκάφους κατά μήκος της κάθε λωρίδας πτήσης με αυτούς τους δέκτες έχει ως αποτέλεσμα οι επιπολικές ευθείες να απεικονίζονται ως καμπύλες γραμμές. Η συγκεκριμένη φωτομηχανή διαθέτει εννέα (9) κανάλια από τα οποία τα πέντε (5) είναι παγχρωματικά ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα (4) είναι το μπλε, το κόκκινο, το πράσινο και το υπέρυθρο. Στο κάθε κανάλι αντιστοιχεί μία αεροφωτογραφία η οποία στο στάδιο της προεξεργασίας υφίσταται γεωμετρικές διορθώσεις (Σχήμα 5.4). Οι διορθωμένες αυτές εικόνες μπορούν να θεωρηθούν ως κανονικοποιημένες παρόλο που οι επιπολικές ευθείες σε αυτές είναι καμπύλες γραμμές. Ωστόσο, υπάρχει διαφορετική προσέγγιση κατά την πυκνή συνταύτιση σημείων ανάλογα με τον αλγόριθμο συσχέτισης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Στο [34] η συνταύτιση των εικόνων έγινε με τη χρήση του τοπικού αλγορίθμου με τον συντελεστή συσχέτισης και του ημι-καθολικού αλγορίθμου με τη μέθοδο MI. Στην πρώτη περίπτωση η περιοχή αναζήτησης ήταν μία γραμμική δισδιάστατη περιοχή της οποίας οι διαστάσεις ήταν τέτοιες που να εμπεριέχουν την εκάστοτε επιπολική ευθεία. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόστηκαν τεχνικές μείωσης του εύρους αναζήτησης κατά μήκος των επιπολικών ευθειών συναρτήσει της κατακόρυφης κίνησης στον άξονα Z, η οποία σχετίζεται άμεσα με το εύρος των ανομοιοτήτων βάθους.



Σχήμα 5.4 Τμήματα διορθωμένων εικόνων μία λωρίδας λήψης από την φωτομηχανή HRSC-AX. [34]

Όσον αφορά την εφαρμογή, ως εικόνα αναφοράς επιλέχθηκε η ναδιρική εικόνα. Οι πίνακες ανομοιοτήτων βάθους που προέκυψαν από την πυκνή συνταύτιση των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας και κατ' επέκταση για την σύνταξη ορθοφωτογραφιών και παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων μέσω ανακατασκευής (Σχήμα 5.5). Τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας που προέκυψαν από τη χρήση του τοπικού αλγορίθμου με τον συντελεστή συσχέτισης δεν ήταν σε όλες τις περιπτώσεις συνεπή με την πραγματικότητα και εμφάνισαν θολές τις ακμές των αντικειμένων, με αποτέλεσμα αυτή η μέθοδος να θεωρείται

λιγότερο κατάλληλη για περιοχές με δομημένο περιβάλλον. Αντίθετα, τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας που προέκυψαν από τον ημι-καθολικό αλγόριθμο περιέγραφαν καλύτερα την περιοχή ενδιαφέροντος τόσο στις περιοχές με βλάστηση όσο και στις περιοχές με κτίρια.

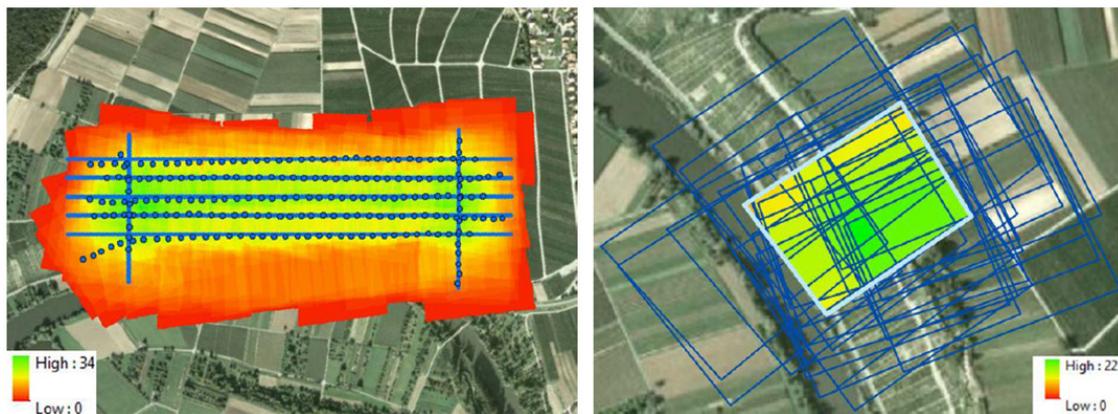


Σχήμα 5.5 (α), (β) DSM που προέκυψαν από τον ημι-καθολικό αλγόριθμο με τη μέθοδο MI και τον τοπικό αλγόριθμο με τον συντελεστή συσχέτισης αντίστοιχα (γ) Ορθοφωτογραφία της περιοχής ενδιαφέροντος (δ) Τρισδιάστατη ανακατασκευή της περιοχής ενδιαφέροντος. [34]

5.4 Εφαρμογές με εικόνες από μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV)

Το τελευταίο διάστημα χρησιμοποιούνται ευρέως για την απόκτηση αεροφωτογραφιών τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV). Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να αποτελέσουν κυρίως για μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές μία οικονομική και ταυτόχρονα αξιόπιστη λύση αντί των κλασικών μεθόδων φωτογράφισης. Η ποιότητα των αεροφωτογραφιών από αυτές τις πλατφόρμες είναι υποδεέστερη σε σχέση με αυτές από φωτομηχανές υψηλής ανάλυσης λόγω εξαρτημάτων χαμηλότερου κόστους. Ωστόσο, αυτό που μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί για πιο αξιόπιστες και ακριβείς αποδόσεις είναι οι

πολλαπλές επικαλύψεις των αεροφωτογραφιών κατά τον προγραμματισμό της πτήσης (Σχήμα 5.6). Στο [36] ο αλγόριθμος συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ημι-καθολικός αλγόριθμος με τη μέθοδο MI και οι κατά μήκος και κατά πλάτος επικαλύψεις ήταν της τάξης του 70-75%. Μία τέτοια πλεονάζουσα πληροφορία διευκολύνει και βελτιστοποιεί την πυκνή συνταύτιση σημείων αλλά και άλλες φωτογραμμετρικές διαδικασίες όπως για παράδειγμα τον αυτόματο αεροτριγωνισμό.

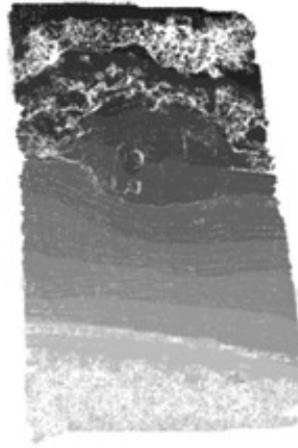


Σχήμα 5.6 Αριστερά: Λωρίδες πτήσης και σημεία λήψης των φωτογραφιών του συνολικού μπλοκ. Δεξιά: Περίπτωση μεμονωμένης εικόνας. Η έγχρωμη διαβάθμιση και στις δύο εικόνες απεικονίζει το πλήθος των φωτογραφιών στις οποίες απεικονίζεται η κάθε περιοχή. [36]

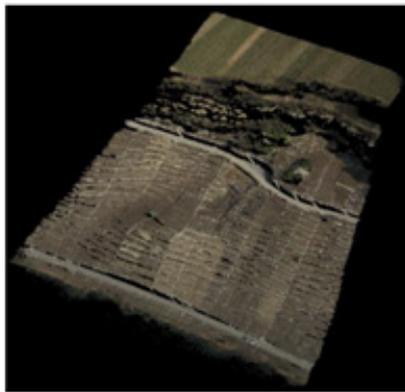
Ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους που προέκυψε από τον ημι-καθολικό αλγόριθμο ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Οι μοναδικές ασθενείς περιοχές ήταν αυτές στις οποίες υπήρξαν αναντιστοιχίες από τη δέσμευση της εκατέρωθεν συνέπειας ή άλλες με ελλειπή υφή όπως υδάτινες επιφάνειες, δρόμοι κ.λπ. (Σχήμα 5.7). Στη συνέχεια έγινε χρήση πολλών εναέριων εικόνων βάσει μίας κεντρικής εικόνας αναφοράς προκειμένου να παραχθεί ένα νέφος τρισδιάστατων σημείων όλης της περιοχής ενδιαφέροντος. Το ποσοστό των συνταυτισμένων σημείων ήταν της τάξης του 66%, το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό δεδομένου ότι υπήρξαν αρκετές περιοχές με βλάστηση και με υδάτινες επιφάνειες. Επίσης, για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων έγινε προσαρμογή ενός επιπέδου σε μία αντίστοιχη περίπου επίπεδη περιοχή του νέφους σημείων. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πήρε τιμή 10.2 cm που αντιστοιχεί σε 0.2 pixel.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.7 (α) Εικόνα στερεοζεύγους (β) Πίνακας ανομοιοτήτων βάθους που προέκυψε από τον ημι-καθολικό αλγόριθμο με τη μέθοδο MI (γ) Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος της περιοχής ενδιαφέροντος. [36]

Κεφάλαιο 6:

Εφαρμογή

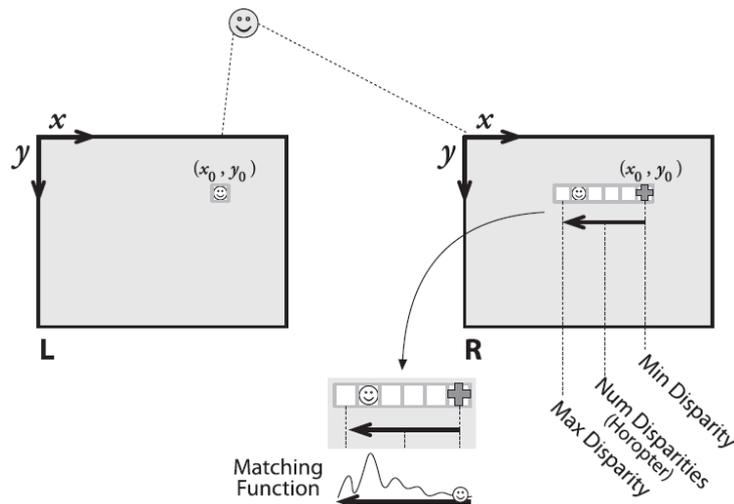
6.1 Λογισμικό

Στο παρόν κεφάλαιο εκτελείται πυκνή συνταύτιση σημείων για την εξαγωγή των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους για τις περιοχές της Αργιθέας και της Σαντορίνης. Η παρούσα εφαρμογή εκτελέστηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Visual C++ της Microsoft όπου χρησιμοποιήθηκε η ανοικτή βιβλιοθήκη OpenCV (βλ. [37], [38]). Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την στέρεο συνταύτιση των εικόνων ήταν οι StereoBM (Stereo Block Matching) και StereoSGBM (Stereo Semi Global Block Matching). Οι δύο συναρτήσεις επιλέχθηκαν μεταξύ άλλων (Cv Stereo Graph Cut State και Stereo Belief Propagation) επειδή από τη σχετική βιβλιογραφία ενδεικνύονται περισσότερο για περιπτώσεις εναέριων εικόνων αλλά και για την απλούστερη λογική τους σε σχέση με τους καθολικούς αλγόριθμους που έχουν υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Η συνάρτηση StereoBM υπολογίζει τα κόστη συσχέτισης με τη μέθοδο SAD εφαρμόζοντας τον τοπικό αλγόριθμο WTA. Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας εφαρμόζεται το φίλτρο Sobel κατά τη διεύθυνση x. Μετά την συνταύτιση των εικόνων εφαρμόζεται φίλτρο για την απαλοιφή στιγμάτων (Speckle filter), ενώ στη συνέχεια εκτελείται παρεμβολή των γειτονικών εικονοψηφίδων για την συμπλήρωση των κενών στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τη συνάρτηση αυτή είναι:

- ***min_disparity***: Ελάχιστη ανομοιοότητα βάθους η οποία έχει ως προκαθορισμένη τιμή την τιμή μηδέν (0) (βλ. Σχήμα 6.1).

- **number_of_disparities**: Εύρος των ανομοιοτήτων βάθους (διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης ανομοιοτήτας βάθους) μέσα στο οποίο αναζητείται η βέλτιστη τιμή της ανομοιοτήτας βάθους (βλ. Σχήμα 6.1). Αυτή η παράμετρος υφίσταται, ώστε η αναζήτηση των ομολογιών να μην γίνεται σε όλο το μήκος των επιπολικών ευθειών αλλά σε ένα τμήμα τους μειώνοντας έτσι τον υπολογιστικό χρόνο.



Σχήμα 6.1 Ελάχιστη και μέγιστη ανομοιοότητα βάθους. [17]

- **SAD_window_size**: Οριζόντια διάσταση του ψηφιακού παραθύρου για τον υπολογισμό του συσσωματωμένου κόστους συσχέτισης με τη μέθοδο SAD. Τα ψηφιακά παράθυρα που χρησιμοποιούνται είναι τετραγωνικά περί της κεντρικής εικονοψηφίδας ενδιαφέροντος. Συνεπώς οι τιμές εισόδου είναι 5, 7, 9, ...
- **pre_filter_cap**: Η περικοπόμενη τιμή για τις αρχικές εικόνες στο στάδιο της προ-επεξεργασίας. Ο αλγόριθμος υπολογίζει αρχικά την πρώτη παράγωγο του κάθε εικονοστοιχείου με το φίλτρο Sobel κατά τη διεύθυνση x και στη συνέχεια εντάσσει αυτή την τιμή στο κλειστό διάστημα $[-pre_FilterCap, +pre_FilterCap]$.
- **uniqueness_ratio**: Ελάχιστο ποσοστό επί τοις εκατό που απέχει το ελάχιστο (βέλτιστο) συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης από το αμέσως επόμενο. Η επιβολή αυτής της δέσμευσης βοηθά κυρίως σε περιοχές που περιέχουν επαναλαμβανόμενα αντικείμενα ή περιοχές με ελλiptή υφή ώστε το ελάχιστο συσσωματωμένο κόστος συσχέτισης να μπορεί να είναι πιο διακριτό.

- **speckle_window_size:** Οριζόντια διάσταση τετραγωνικού ψηφιακού παραθύρου μέσα στο οποίο πρόκειται να ανιχνευθεί θόρυβος (π.χ. στίγματα) ή ακραίες τιμές (peaks) στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους.
- **speckle_range:** Μέγιστη διαφορά της ανομοιοτήτας βάθους που θεωρείται ως θόρυβος και συμβαίνει εντός του ψηφιακού παραθύρου speckle_Window_Size.
- **disp12maxdiff:** Μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά (σε μονάδες pixel) μεταξύ των εικονοστοιχείων των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους που αντιστοιχούν στην εικόνα αναφοράς και στην εικόνα αναζήτησης κατά τον έλεγχο εκατέρωθεν συνέπειας.
- **texture_threshold:** Παράμετρος που περιορίζει την συνταύτιση των εικόνων σε περιοχές που έχουν ελλιπή υφή.

Η συνάρτηση StereoSGBM υπολογίζει τα κόστη συσχέτισης με τη μέθοδο BT/SAD ή BT/AD εφαρμόζοντας τον ημι-καθολικό αλγόριθμο. Η αναζήτηση των ομολογιών εκτελείται σε οκτώ (8) διευθύνσεις με τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού. Πριν από την συνταύτιση των εικόνων εφαρμόζεται ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM το φίλτρο Sobel κατά τη διεύθυνση x, ενώ μετά την συνταύτιση εφαρμόζεται φίλτρο για την απαλοιφή στιγμάτων (Speckle filter) και εκτελείται παρεμβολή των γειτονικών εικονοψηφίδων για τη συμπλήρωση των κενών στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Οι παράμετροι που απαιτούνται σε αυτή τη συνάρτηση είναι:

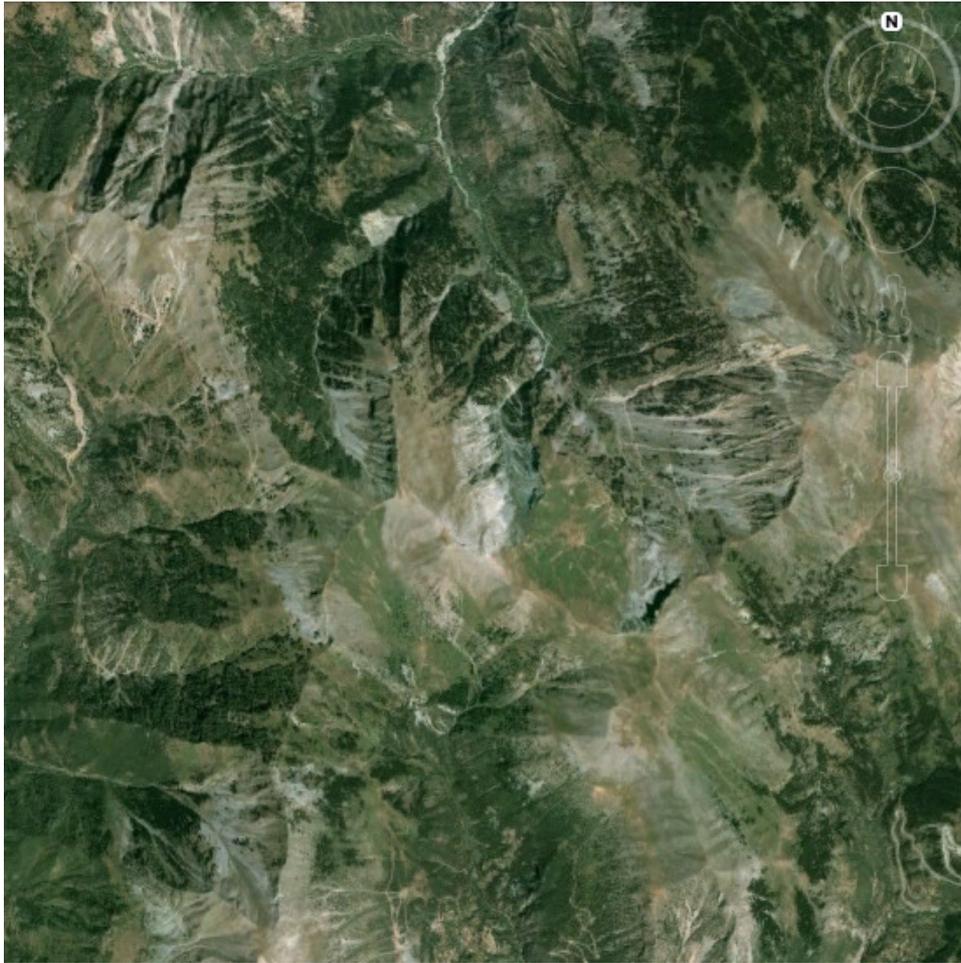
- **min_disparity:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM.
- **number_of_disparities:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM.
- **SAD_BT_window_size:** Οριζόντια διάσταση του ψηφιακού παραθύρου για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης (ή του συσσωματωμένου κόστους συσχέτισης) με τη μέθοδο BT. Η μέθοδος BT εφαρμόζεται κυρίως σε επίπεδο εικονοψηφίδων, όμως υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της μέσω τετραγωνικών ψηφιακών παραθύρων περί της κεντρικής εικονοψηφίδας ενδιαφέροντος. Επομένως, οι τιμές εισόδου για τον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης σε επίπεδο εικονοψηφίδων είναι 1 ενώ για επίπεδο ψηφιακών παραθύρων είναι 5, 7, 9, ...
- **pre_filter_cap:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM.
- **uniqueness_ratio:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM.

- **P1, P2:** Όροι που αποτελούν τις δεσμεύσεις ομαλότητας της εξίσωσης (4.8). Ο όρος P_1 αφορά ανομοιότητες βάθους των οποίων η μεταξύ τους διαφορά δεν είναι μεγαλύτερη από μία εικονοψηφίδα ενώ ο όρος P_2 αφορά ανομοιότητες βάθους των οποίων οι διαφορές είναι μεγαλύτερες από μία εικονοψηφίδα. Σημειώνεται πως όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των P_1 και P_2 τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιρροή τους κατά την εξαγωγή του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις θα πρέπει να ισχύει $P_2 > P_1$.
- **speckle_window_size:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM με την διαφορά πως δεν υπάρχει περιορισμός στην τιμή εισόδου, καθώς το χρησιμοποιούμενο ψηφιακό παράθυρο δεν είναι τετραγωνικό.
- **speckle_range:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM.
- **disp12maxdiff:** Ομοίως με τη συνάρτηση StereoBM.

6.2 Περιοχές εφαρμογής

6.2.1 Γενικά στοιχεία

Οι δύο περιοχές διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους, επειδή έχει η κάθε μία τις δικιές της ιδιαιτερότητες. Η περιοχή της Αργιθέας είναι αμιγώς ορεινή και περιλαμβάνει πετρώδη τμήματα και θαμνώδη βλάστηση αλλά και πυκνές δασικές εκτάσεις ανά τόπους. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι έντονο με μεγάλες κλίσεις εδάφους και υψομετρικές διαφορές. Το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής προσεγγιστικά είναι 1770 μέτρα ενώ το ελάχιστο είναι 700 μέτρα. Αντίθετα, η περιοχή της Σαντορίνης περιλαμβάνει ημιαστικά κομμάτια με ομαλό ανάγλυφο πλησίον του αιγιαλού. Επιπλέον, έχει περιορισμένη βλάστηση με έντονη την παρουσία χωμάτινων τμημάτων και μικρών καλλιεργειών.



Σχήμα 6.2 Απόσπασμα της περιοχής της Αργιθέας από το Google Earth [39].



Σχήμα 6.3 Απόσπασμα της περιοχής της Σαντορίνης από την Εθνικό Κτηματολόγιο & Χαρτογράφηση Α.Ε. [40]

6.2.2 Προγραμματισμός λήψης των εικόνων

Στην περίπτωση της Αργιθέας η λωρίδα λήψης των εικόνων είχε φορά από τα Βορειοδυτικά προς το Νοτιοανατολικά και έγινε λήψη 11 αεροφωτογραφιών (IMG_40 έως IMG_50). Τα στερεοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στο σύνολο τους 10 με το κάθε στερεοζεύγος να αποτελείται από δύο εικόνες όπως αυτές αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια της λήψης (IMG_40-IMG_41, IMG_41-IMG_42 κ.λπ.). Το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των εικόνων του κάθε στερεοζεύγους ήταν της τάξης του 70%, το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό δεδομένης της μορφολογίας της περιοχής καθώς συμβάλλει στη μείωση των εκτροπών λόγω αναγλύφου και κατ' επέκταση στην ελαχιστοποίηση πιθανών αποκρύψεων.



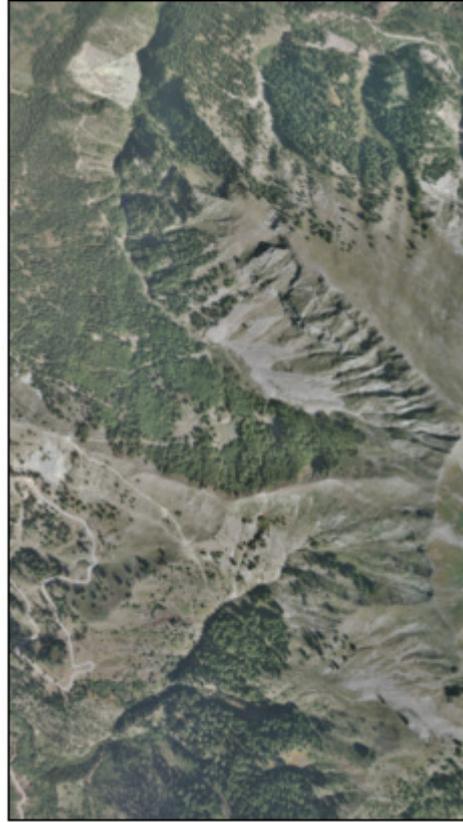
IMG 40



IMG 41



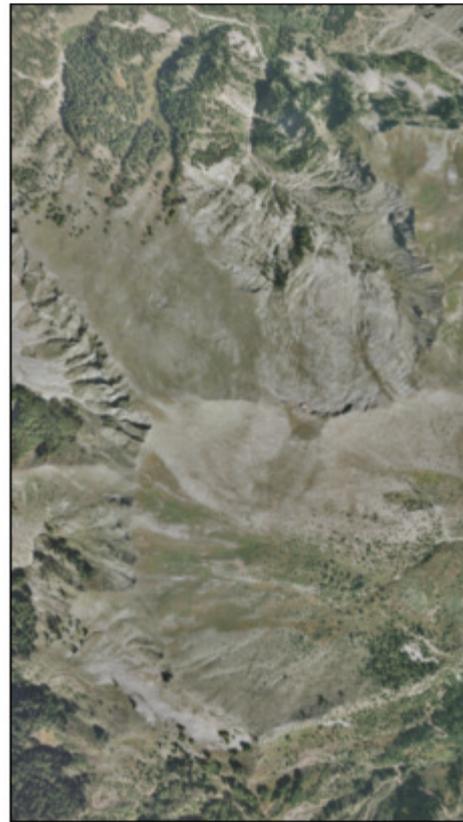
IMG 42



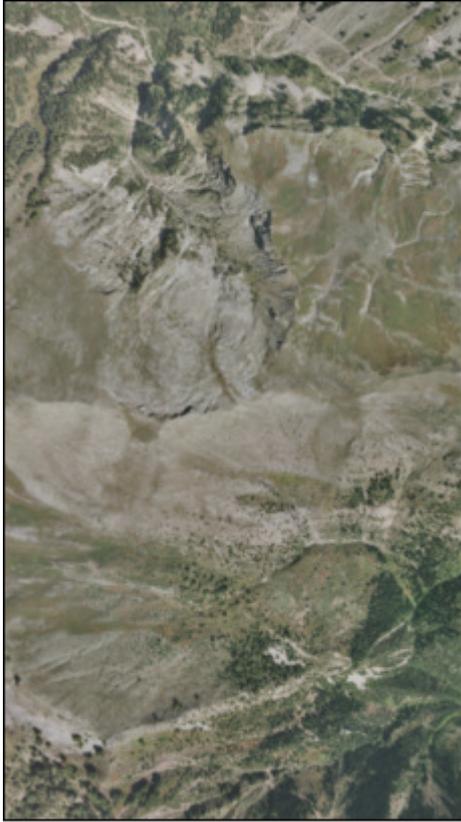
IMG 43



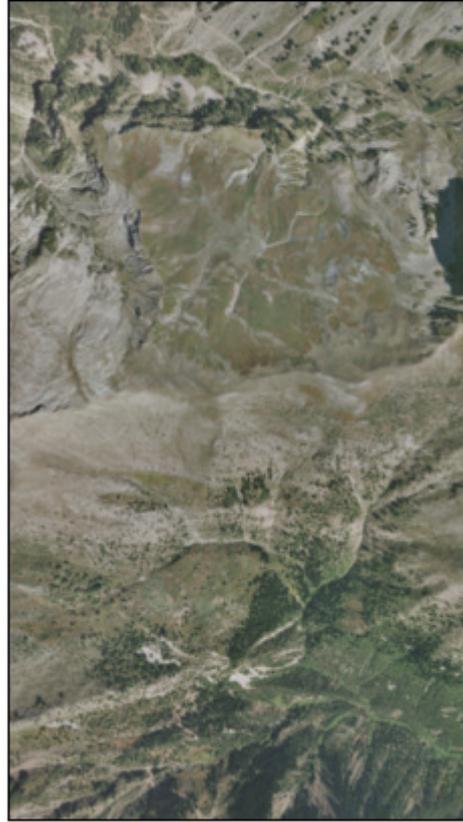
IMG 44



IMG 45



IMG 46



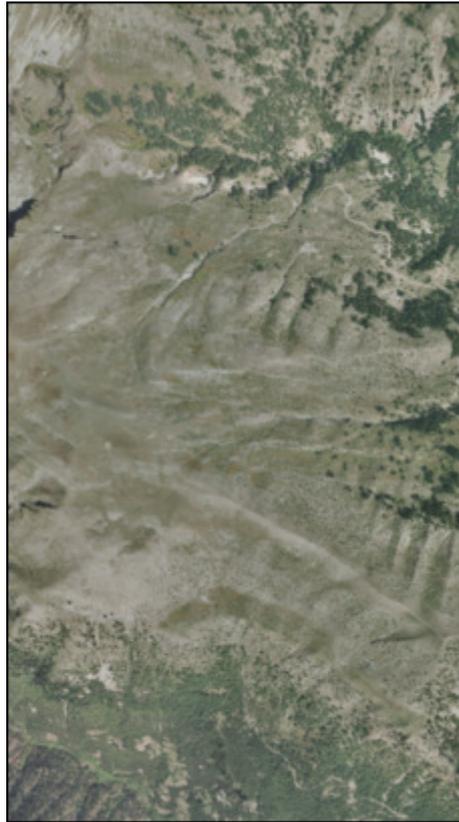
IMG 47



IMG 48



IMG 49



IMG 50

Σχήμα 6.4 Εικόνες που αποκτήθηκαν για την περιοχή της Αργιθέας.

Οι εικόνες στην περιοχή της Σαντορίνης αποκτήθηκαν από μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV). Έγινε λήψη αρκετών αεροφωτογραφιών από τις οποίες επιλέχθηκαν 6 (IMG_28, IMG_27, IMG_25, IMG_23, IMG_22 και IMG_20). Τα στερεοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συνολικά 4 (IMG_28-IMG_27, IMG_25-IMG_23, IMG_23-IMG_22 και IMG_22-IMG_20). Επειδή η συγκεκριμένη πτήση δεν είχε τα χαρακτηριστικά μίας κανονικής πτήσης, όπως στην περίπτωση της Αργιθέας, το ποσοστό επικάλυψης ποίκιλε από 60% έως και 80%. Το ποσοστό αυτό θεωρείται επίσης ικανοποιητικό καθώς το ανάγλυφο της περιοχής είναι ήπιο και η δόμηση είναι σχετικά αραιή (εξαιρουμένων κάποιων ξενοδοχειακών συγκροτημάτων) χωρίς ιδιαίτερα ψηλά κτίσματα.



IMG 28



IMG 27



IMG 23



IMG 25



IMG 20



IMG22

Σχήμα 6.5 Εικόνες που αποκτήθηκαν για την περιοχή της Σαντορίνης.

6.3 Επιπολική επανασύσταση εικόνων

Για την επιπολική επανασύσταση των εικόνων χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε περιβάλλον Matlab όπως περιγράφεται στο [9]. Τα στοιχεία εισόδου στο πρόγραμμα ήταν τα στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών των εικόνων που είχαν προσδιοριστεί από αεροτριγωνισμό (ή από αεροτριγωνισμό με

αυτοβαθμονόμηση όπως έγινε στην περίπτωση της Σαντορίνης) για τις ανάγκες άλλων εργασιών όπως και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού. Τα χρησιμοποιηθέντα στοιχεία παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες :

x_0 (mm)	y_0 (mm)	c (mm)
0.0094	-0.0014	120

Πίνακας 6.1 Στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού για την περίπτωση της Αργιθέας.

α/α	Εικόνα	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	ω (grad)	ϕ (grad)	κ (grad)
1	IMG_40	282416.109	4363774.465	3473.939	0.574	-0.406	-41.624
2	IMG_41	282821.440	4363422.825	3469.232	-0.117	0.669	-40.691
3	IMG_42	283240.839	4363065.173	3471.296	0.389	-0.328	-40.687
4	IMG_43	283642.138	4362709.201	3476.705	0.619	-0.716	-41.897
5	IMG_44	283982.620	4362408.239	3474.571	-0.152	0.461	-41.341
6	IMG_45	284324.653	4362114.682	3472.636	-0.380	0.701	-40.616
7	IMG_46	284662.101	4361826.824	3474.225	-0.185	0.290	-40.553
8	IMG_47	285009.340	4361533.476	3474.478	-0.255	0.369	-40.163
9	IMG_48	285383.501	4361221.100	3471.068	-0.085	0.390	-40.049
10	IMG_49	285739.380	4360921.909	3470.670	0.336	0.036	-40.309
11	IMG_50	286105.020	4360608.623	3469.786	0.788	-0.572	-40.958

Πίνακας 6.2 Στοιχεία εξωτερικών προσανατολισμών των εικόνων της Αργιθέας.

x_0 (mm)	y_0 (mm)	c (mm)	k_1	k_2
-0.199	0.036	28.972	-3.00638×10^{-5}	1.81244×10^{-8}

Πίνακας 6.3 Στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού για την περίπτωση της Σαντορίνης.

α/α	Εικόνα	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)	ω(grad)	φ(grad)	κ(grad)
1	IMG_20	631759.611	4023542.046	397.312	0.627	5.747	53.078
2	IMG_22	631693.310	4023587.199	398.784	-0.532	3.594	51.965
3	IMG_23	631659.963	4023610.092	398.520	-0.304	4.176	52.631
4	IMG_25	631591.060	4023657.999	400.482	-2.607	2.006	55.835
5	IMG_27	631521.844	4023706.681	400.316	-4.671	-2.316	51.337
6	IMG_28	631486.652	4023731.145	399.808	-3.959	-0.543	54.081

Πίνακας 6.4 Στοιχεία εξωτερικών προσανατολισμών των εικόνων της Σαντορίνης.

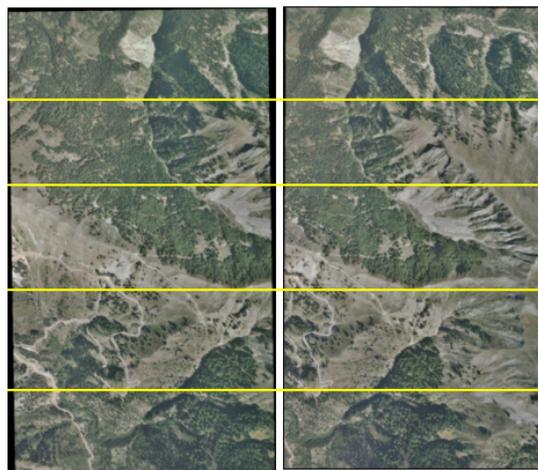
Οι επιπολικές εικόνες για κάθε στερεοζεύγος και των δύο περιοχών παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Ο έλεγχος τους έγινε με τη σχεδίαση των επιπολικών ευθειών.



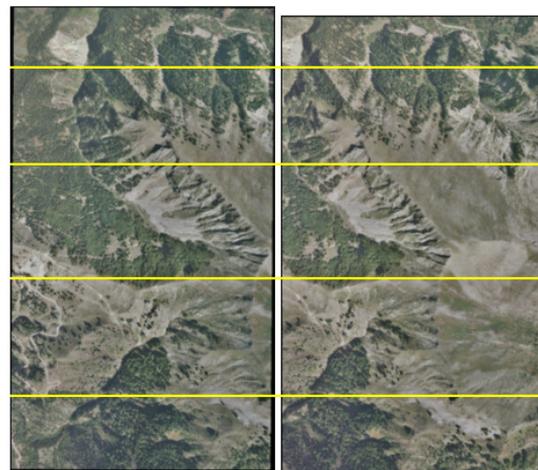
IMG_40-IMG_41



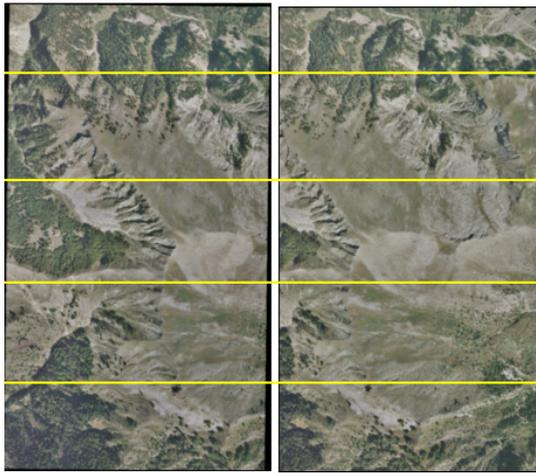
IMG_41-IMG_42



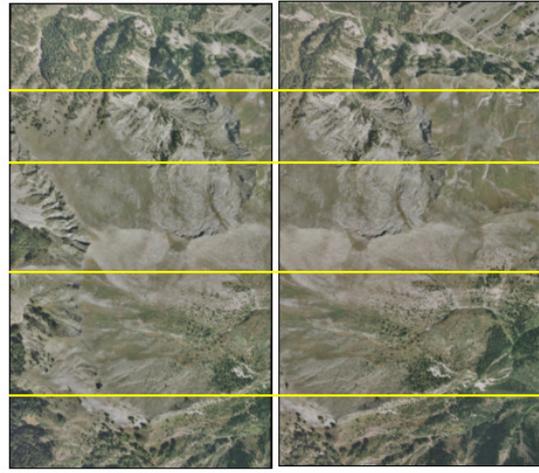
IMG_42-IMG_43



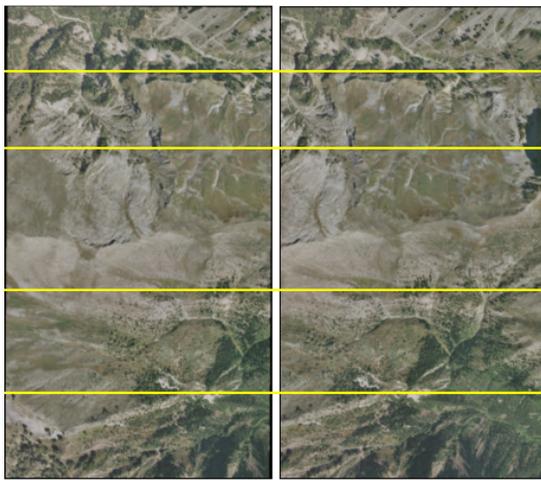
IMG_43-IMG_44



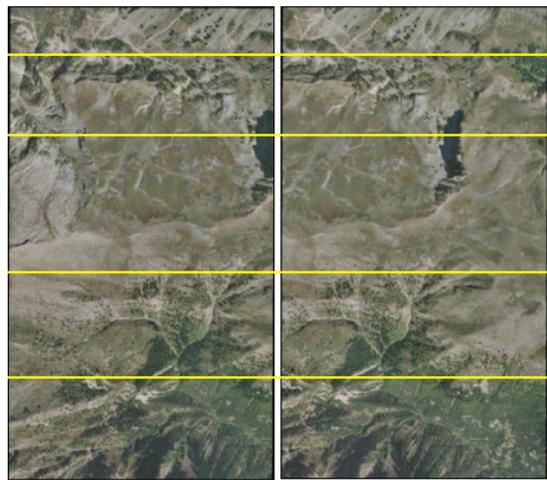
IMG_44-IMG_45



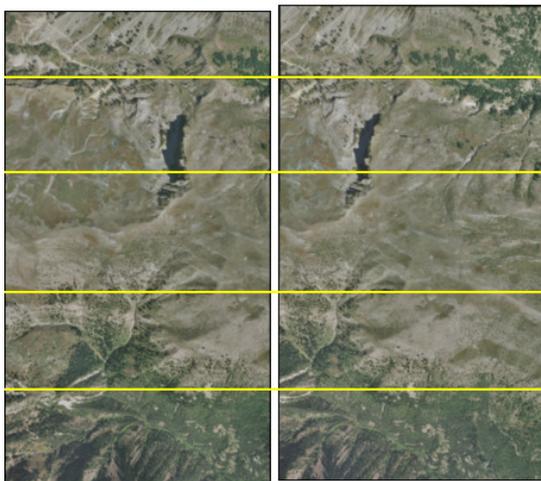
IMG_45-IMG_46



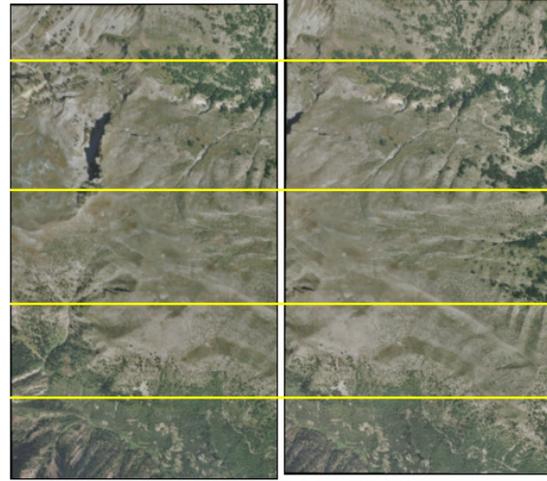
IMG_46-IMG_47



IMG_47-IMG_48

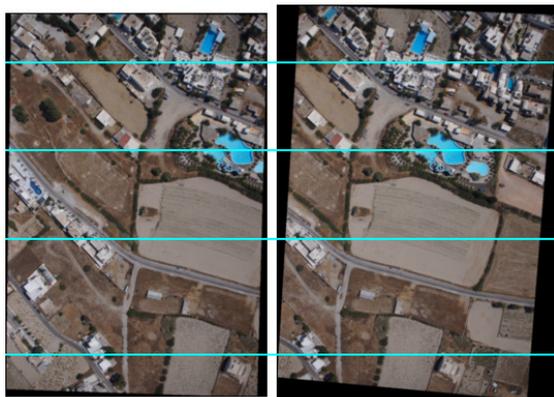


IMG_48-IMG_49

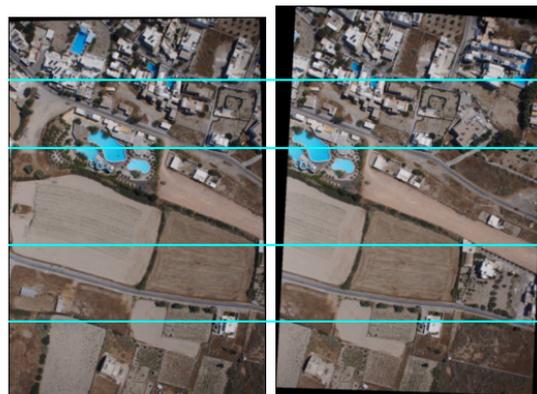


IMG_49-IMG_50

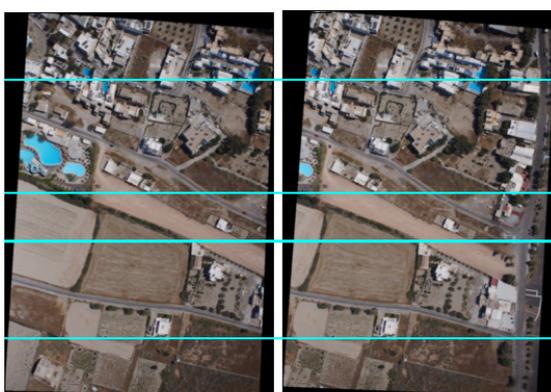
Σχήμα 6.6 Στερεοζεύγη επιτολικών εικόνων για την περιοχή της Αργιθέας.



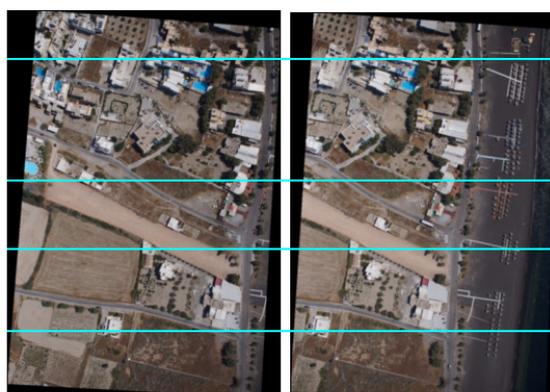
IMG_28-IMG_27



IMG_25-IMG_23



IMG_23-IMG_22



IMG_22-IMG_20

Σχήμα 6.7 Στερεοζεύγη επιπολικών εικόνων για την περιοχή της Σαντορίνης.

6.4 Πυκνή συνταύτιση σημείων

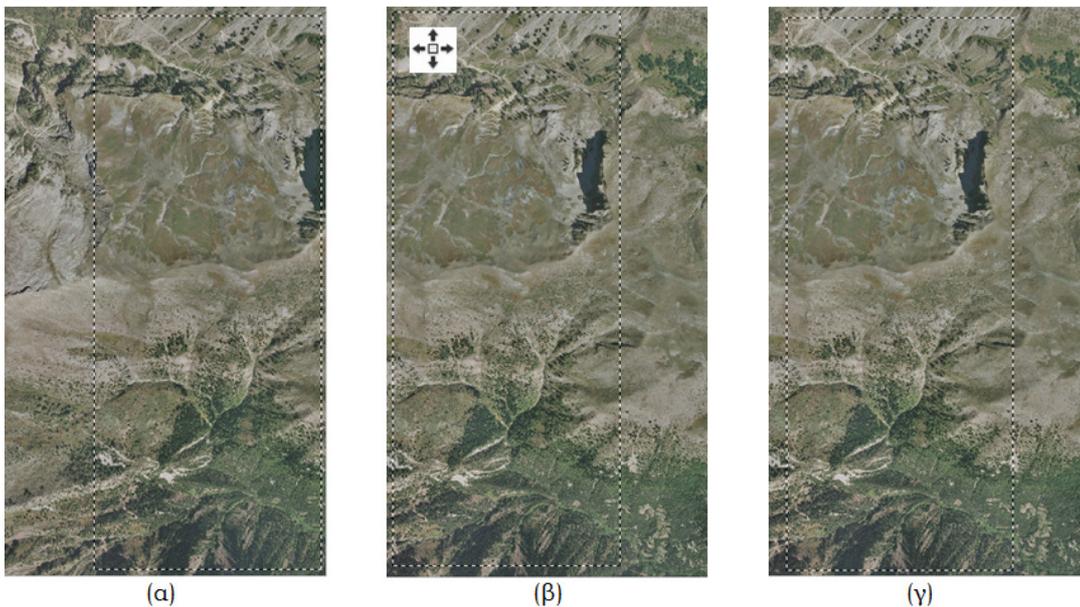
Μετά το στάδιο της επιπολικής επανασύστασης των εικόνων, ακολούθησε η πυκνή συνταύτιση σημείων μεταξύ των εικόνων του κάθε στερεοζεύγους. Το χρησιμοποιούμενο λογισμικό προκειμένου να εκτελέσει πυκνή συνταύτιση σημείων απαιτεί οι εικόνες εισόδου να έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Επειδή οι διαστάσεις αυτών των εικόνων δεν ήταν οι ίδιες μετά τη διαδικασία της επιπολικής επανασύστασης, έγινε επιλογή των επικαλυπτόμενων τμημάτων του κάθε στερεοζεύγους μέσω «μάσκας» στο λογισμικό Photoshop και χρησιμοποιήθηκαν αυτά ως εικόνες εισόδου.

6.4.1 Περίπτωση Αργιθέας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η περιοχή της Αργιθέας έχει έντονο ανάγλυφο και αποτελείται από βραχώδη και δασικά τμήματα. Τέτοιου είδους περιοχές

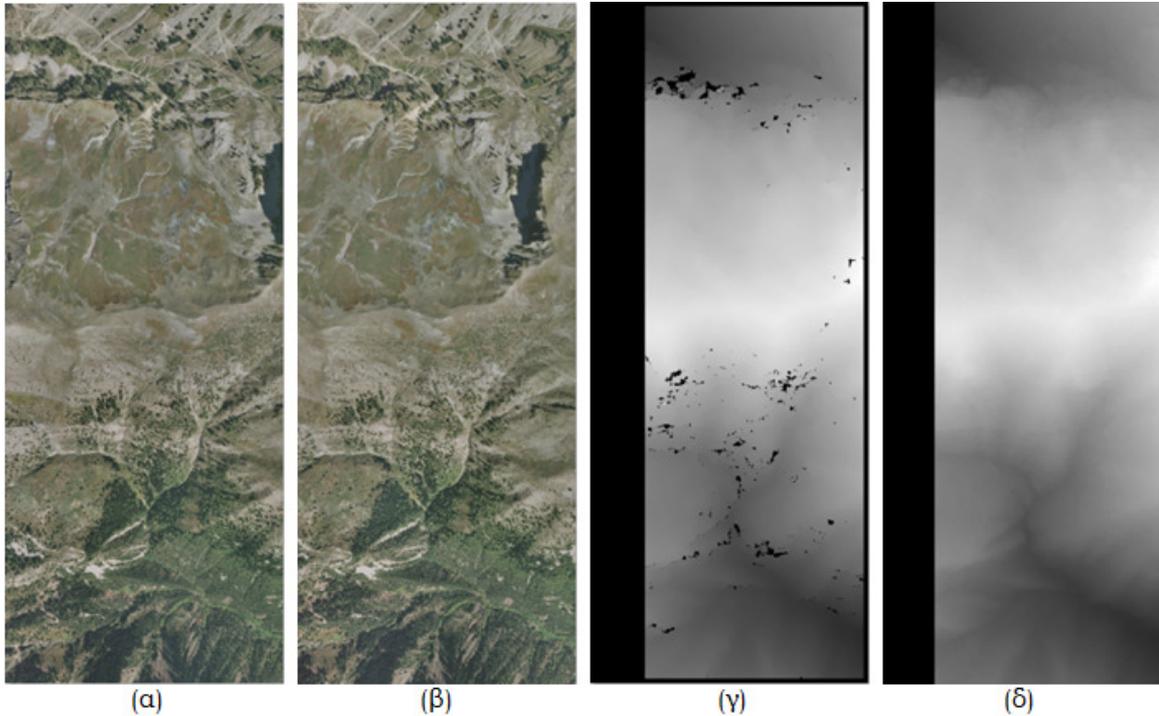
δυσχεραίνουν την συνταύτιση εικόνων καθώς παρουσιάζονται περιοχές με ελλιπή υφή ή με επαναλαμβανόμενα αντικείμενα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι εικόνες είχαν αμελητέες ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ τους ενώ παράλληλα δεν περιείχαν άλλες ραδιομετρικές παραμορφώσεις όπως θόρυβο, κινούμενα αντικείμενα κ.α. γεγονός που βοήθησε στην καλή εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων SAD και BT.

Η «ρύθμιση» των παραμέτρων του κάθε αλγορίθμου κατά την πυκνή συνταύτιση σημείων προκειμένου να αποδώσει τα βέλτιστα αποτελέσματα αποτελεί σημείο καθοριστικής σημασίας. Δεδομένου ότι στην περιοχή υπάρχουν μεγάλες υψομετρικές διαφορές πρέπει αρχικά να βρεθεί η κατάλληλη τιμή της παραμέτρου `number_of_disparities`. Η αύξηση της τιμής της ποσότητας `number_of_disparities` βοηθά στην αναζήτηση των ομολογιών ιδιαίτερα για τα πιο απομακρυσμένα σημεία. Ωστόσο, η αύξηση της τιμής της παρόλο που καλύπτει μεγαλύτερο εύρος ανομοιοτήτων βάθους αφαιρεί ένα σημαντικό τμήμα του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους που περιέχει αρκετή πληροφορία (Σχήμα 6.11). Για τον λόγο αυτό η παράμετρος `number_of_disparities` διατηρήθηκε σταθερή σε κάποια τιμή για σχεδόν όλα τα στερεοζεύγη αλλά για την περαιτέρω αξιοποίησή έγινε μετάθεση της «μάσκας» της δεξιάς εικόνας (Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.8 Στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48. (α) Επιλογή του επικαλυπτόμενου τμήματος για την αριστερή εικόνα (β) Μετάθεση της «μάσκας» για τη δεξιά εικόνα (γ) Επιλογή του επικαλυπτόμενου τμήματος για τη δεξιά εικόνα.

Στα στερεοζεύγη IMG_46-IMG_47, IMG_47-IMG_48 και IMG_48-IMG_49 οι μέγιστες υψομετρικές διαφορές που παρατηρήθηκαν δεν ήταν μεγαλύτερες από 820 μέτρα και έτσι κατά την εξαγωγή του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους δεν δημιουργήθηκαν προβλήματα (Σχήμα 6.9).



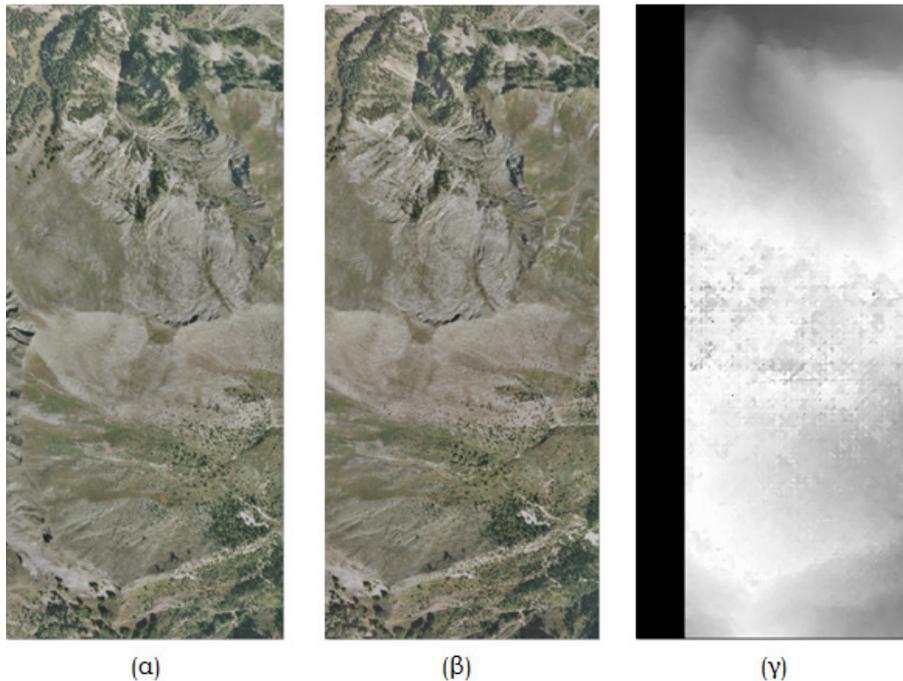
Σχήμα 6.9 Επικαλυπτόμενο τμήμα του στερεοζεύγους IMG_47-IMG_48. (α) Αριστερή εικόνα (β) Δεξιά εικόνα (γ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο BM (δ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο SGBM.

Παρόλα αυτά, σε όλα τα υπόλοιπα στερεοζεύγη που παρατηρήθηκαν υψομετρικές διαφορές μεγαλύτερες από 820 μέτρα η συνταύτιση των εικόνων για δεδομένη τιμή της παραμέτρου `number_of_disparities` και στους δύο αλγόριθμους περιοριζόταν για συγκεκριμένα εύρη ανομοιοτήτων βάθους. Λόγω αυτού του περιορισμού η απόδοση του πίνακα βάθους ολόκληρου του επικαλυπτόμενου τμήματος έγινε σε δύο φάσεις¹³. Η κάθε μία φάση περιελάμβανε ξεχωριστή ανά περίπτωση μετάθεση της «μάσκας» της δεξιάς εικόνας¹⁴ (Σχήμα 6.10). Η προσέγγιση αυτή (παρόλο που δεν αποδίδει κατ' ευθείαν έναν ενιαίο πίνακα ανομοιοτήτων βάθους αλλά δύο οι οποίοι στη συνέχεια πρέπει να ενωθούν) ενδείκνυται λόγω της αδυναμίας της πρώτης προσέγγισης που παρέχει λιγότερη πληροφορία. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι το στερεοζεύγος IMG_45-IMG_46

¹³ Σε κάποιες περιπτώσεις όπου η συνταύτιση σημείων ήταν προβληματική, η απόδοση ενός ολόκληρου επικαλυπτόμενου τμήματος έγινε σε τρεις φάσεις.

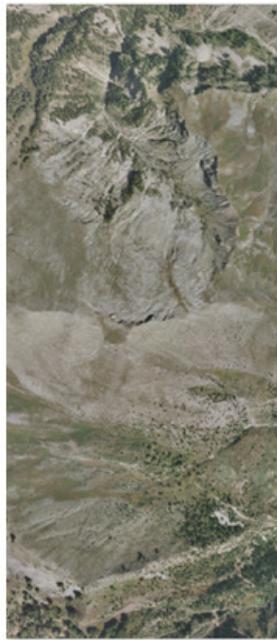
¹⁴ Η αριστερή εικόνα και στις δύο περιπτώσεις παρέμεινε σταθερή.

στο οποίο το μέγιστο υψόμετρο μετρήθηκε 1755 μέτρα ενώ το ελάχιστο υψόμετρο μετρήθηκε 861 μέτρα (προσεγγιστικές τιμές από το μοντέλο εδάφους του Google Earth). Η υψομετρική αυτή διαφορά των 894 μέτρων με δεδομένη τη βάση λήψης μεταξύ των εικόνων (περίπου 444 μέτρα) και το υψόμετρο πτήσης (περίπου 3473 μέτρα) αντιστοιχεί σε λόγους B/H από 0.26 έως και 0.17. Γενικώς η μεγάλη διαφορά μεταξύ των λόγων B/H (η οποία παρατηρήθηκε σχεδόν σε όλα τα στερεοζεύγη), δημιουργεί σημαντικά προβλήματα, καθώς προσεγγίζει τις δυσαναλογίες μεταξύ της απόστασης λήψης και του αναγλύφου του αντικειμένου που εμφανίζονται συχνά στις εφαρμογές της επίγειας Φωτογραμμετρίας.





(δ)



(ε)

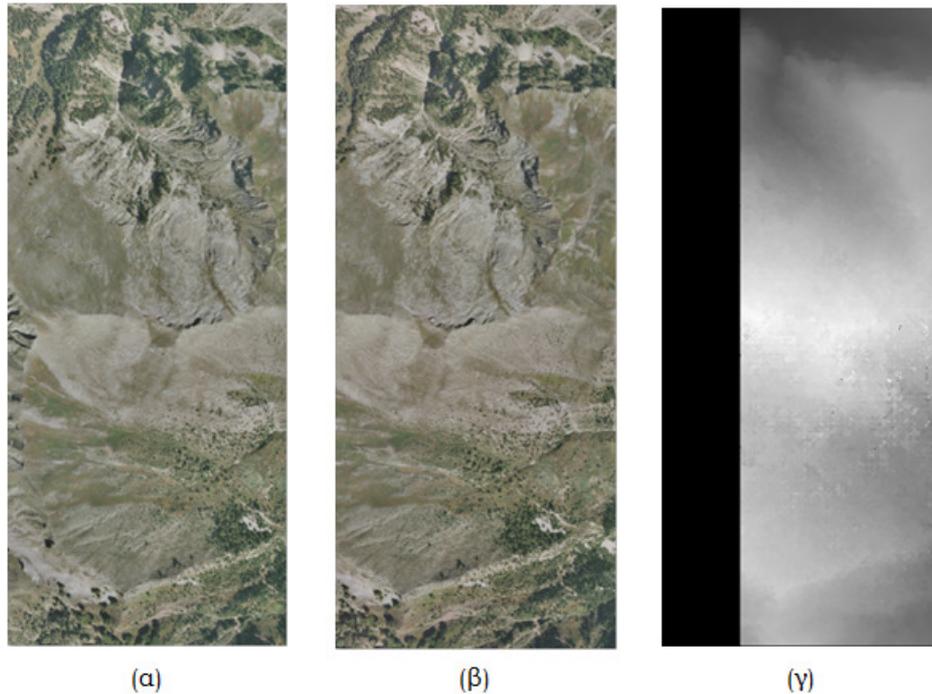


(ζ)



(θ)

Σχήμα 6.10 Εξαγωγή ενιαίου πίνακα βάθους του στερεοζεύγους IMG_45-IMG_46 σε δύο φάσεις με σταθερή την τιμή της παραμέτρου `number_of_disparities=80`. (α),(δ) Αριστερή εικόνα (β),(ε) Δεξιά εικόνα (γ),(ζ) Επιμέρους πίνακες βάθους με τον αλγόριθμο SGBM (θ) Ενιαίος πίνακας βάθους.



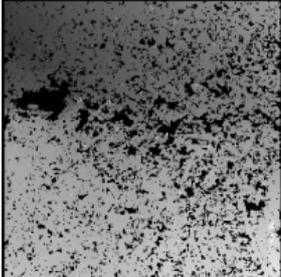
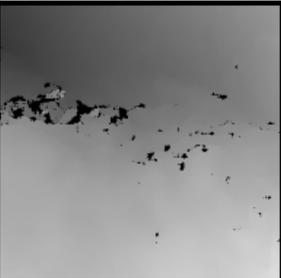
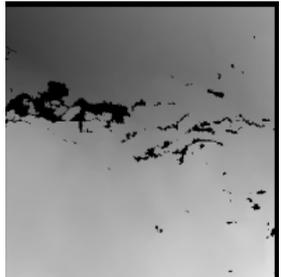
Σχήμα 6.11 Εξαγωγή ενιαίου πίνακα βάθους του στερεοζεύγους IMG_45-IMG_46 σε μία φάση με αύξηση της τιμής της παραμέτρου `number_of_disparities=128`. (α) Αριστερή εικόνα (β) Δεξιά εικόνα (γ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο SGBM.

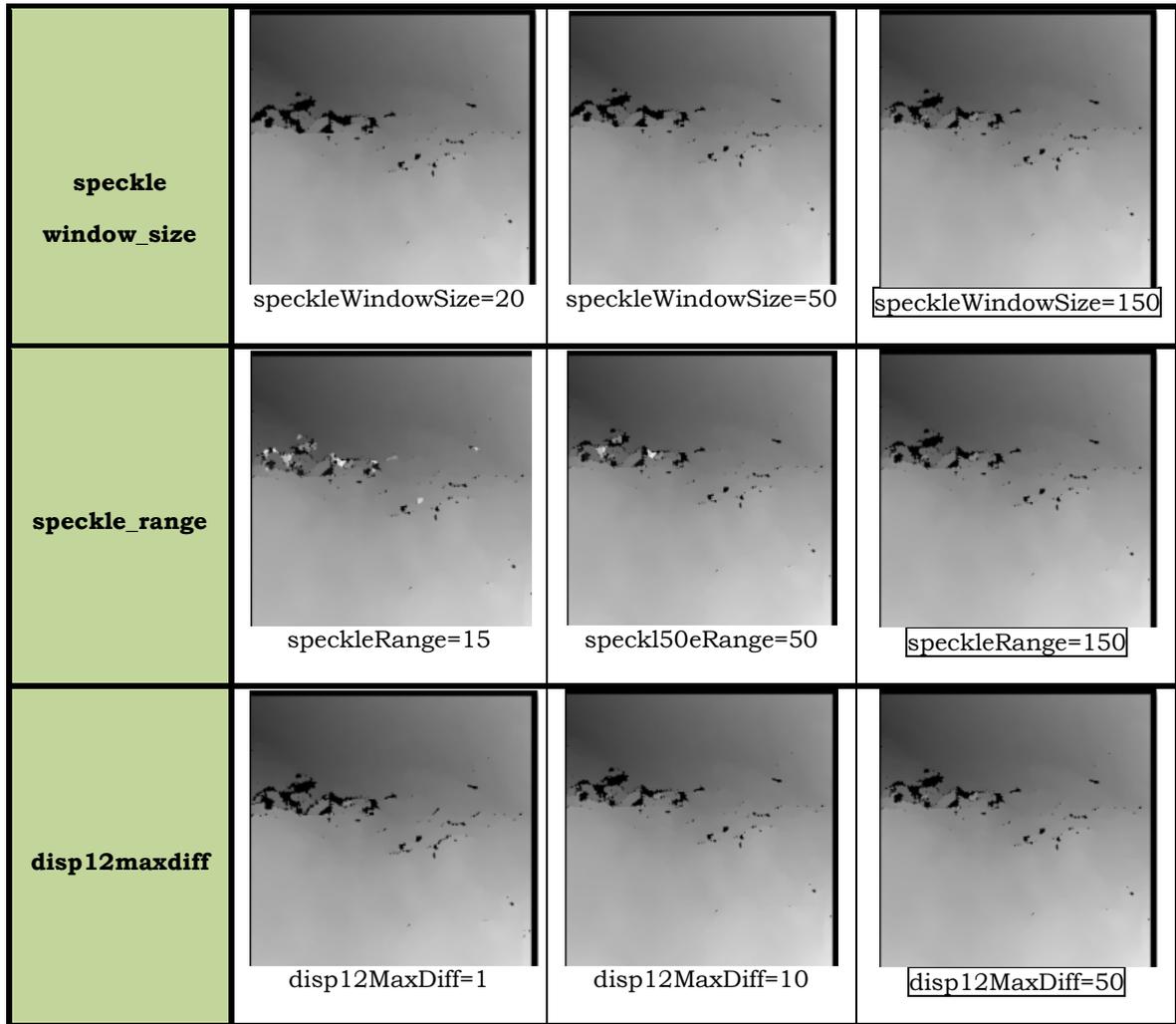
Στο Σχήμα 6.11 μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως ο πίνακας ανομοιοτήτων βάθους έχει έλλειψη πληροφορίας κατά τη διεύθυνση της γραμμής λήψης των εικόνων σε σχέση με αυτόν που προέκυψε από τις δύο φάσεις ενώ παράλληλα σε κάποιες περιοχές εμφανίζεται θόρυβος. Η έλλειψη αυτής της πληροφορίας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη σύνθεση περισσότερων πινάκων ανομοιοτήτων βάθους (για την απόδοση ενός ενιαίου πίνακα της ευρύτερης περιοχής) από άλλα στερεοζεύγη, καθώς απαιτείται ικανό ποσοστό επικαλυπτόμενου τμήματος μεταξύ τους. Από την άλλη μεριά ο θόρυβος που εμφανίζεται έχει πιθανώς σχέση με εναπομείναντα σφάλματα της παράλλαξης y κατά την επιπολική επανασύσταση των εικόνων. Όπως φάνηκε από την συγκεκριμένη εφαρμογή, η επιρροή αυτών των εναπομεινάντων σφαλμάτων ελαττώνεται κατά τη δεύτερη προσέγγιση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί πως η ένωση των επιμέρους τμημάτων των δύο πινάκων ανομοιοτήτων βάθους έγινε στο λογισμικό Photoshop με οπτικό τρόπο με τη βοήθεια των αντίστοιχων εργαλείων. Επίσης, στις «ραφές» όπου έγιναν οι ενώσεις των τμημάτων έγινε ραδιομετρική επεξεργασία. Η διαδικασία της ένωσης τέτοιων επικαλυπτόμενων τμημάτων μπορεί να γίνει και με πιο αποτελεσματικές μεθόδους όπως αυτές που εκτελούν κάποιο μετασχηματισμό (π.χ. ομοιότητας ή αφινικό) ή αυτές που κάνουν χρήση γραμμικών στοιχείων ενώ παράλληλα

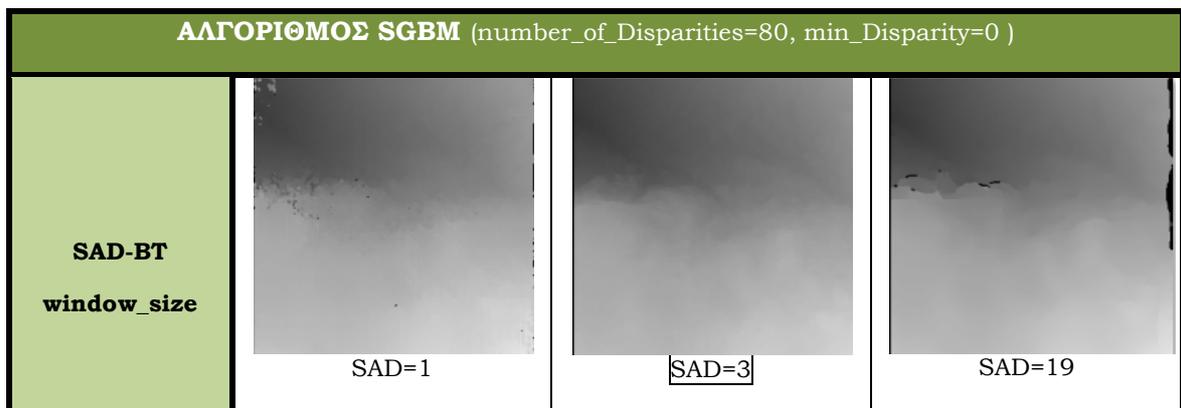
συνδέουν ραδιομετρικά τις εικόνες με τη βοήθεια των ιστογραμμάτων τους. Παρόλα αυτά, δεν έγινε χρήση αυτών των μεθόδων λόγω της υψηλής αβεβαιότητας κατά την εύρεση χαρακτηριστικών σημείων ή τον καθορισμό γραμμικών στοιχείων.

Οι υπόλοιπες παράμετροι και για τους δύο αλγόριθμους ρυθμίστηκαν μετά από δοκιμές στο κάθε στερεοζεύγος. Στην περισσότερες των περιπτώσεων οι τιμές των παραμέτρων παρέμειναν ίδιες καθώς η γεωμετρία της σκηνής αλλά και η ίδια η περιοχή ενδιαφέροντος είχαν περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά από στερεοζεύγος σε στερεοζεύγος. Η επίδραση των παραμέτρων στο στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48 και για τους δύο αλγόριθμους απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα :

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ BM (number_of_Disparities=80, min_Disparity=0)			
SAD window_size	 SAD=5	 SAD=15	 SAD=21
pre_filter_cap	 pre_FilterCap=10	 pre_FilterCap=30	 pre_FilterCap=63
uniqueness ratio	 uniqueness_Ratio =1	 uniqueness_Ratio =10	 uniqueness_Ratio =20



Σχήμα 6.12 Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου BM στο στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγθείσες τιμές.



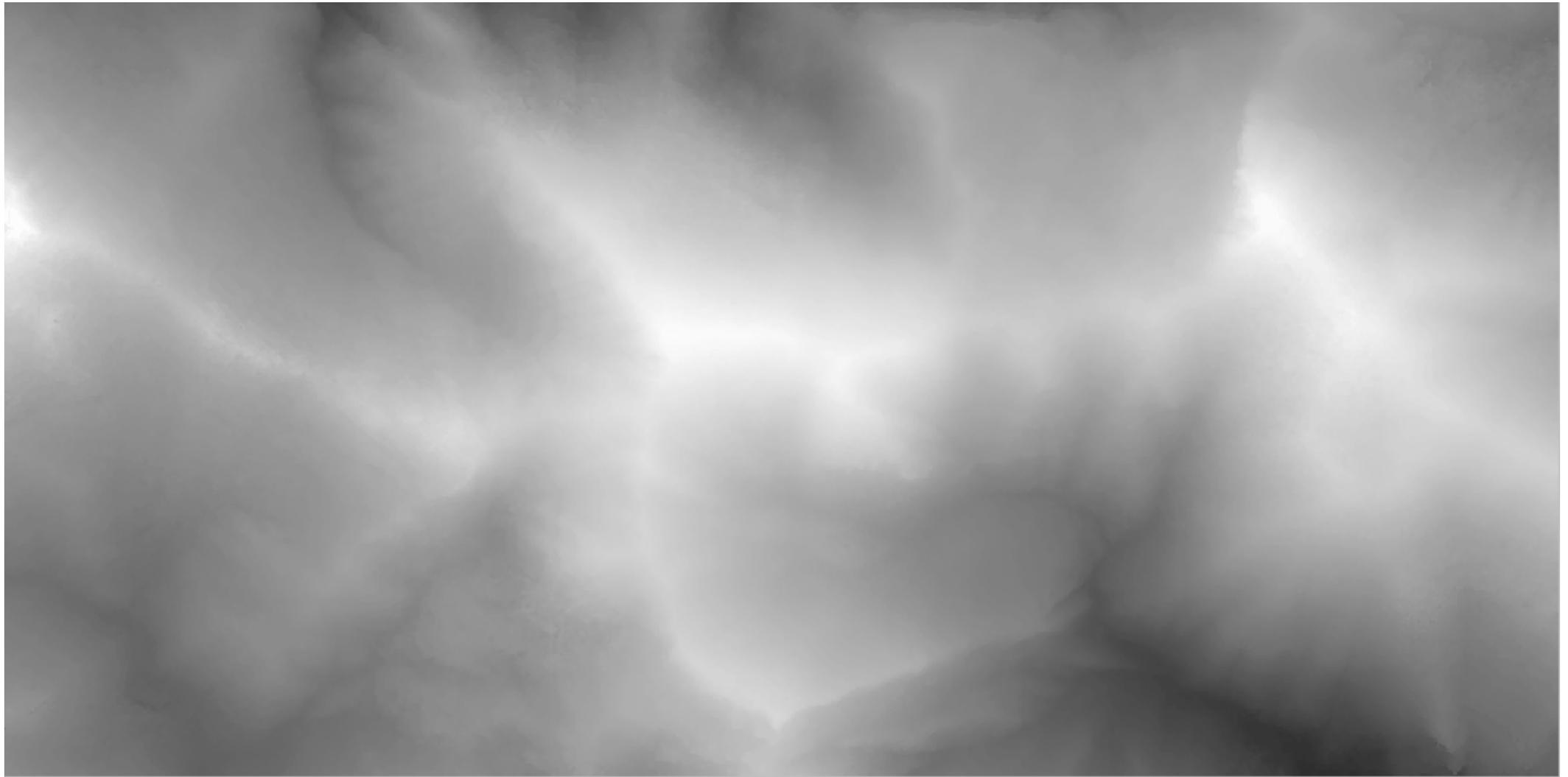
pre_filter_cap	 pre_FilterCap=10	 pre_FilterCap=100	 pre_FilterCap=500
uniqueness ratio	 uniqueness_Ratio =1	 uniqueness_Ratio =10	 uniqueness_Ratio =20
P₁, P₂	 P ₁ =10, P ₂ =50	 P ₁ =100, P ₂ =1620	 P ₁ =500, P ₂ =3000
disp12maxdiff	 disp12MaxDiff=1	 disp12MaxDiff=10	 disp12MaxDiff=50

Σχήμα 6.13 Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου SGBM στο στερεοζεύγος IMG_47-IMG_48. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγείσες τιμές.

Σημειώνεται πως η παράμετρος `texture_threshold` στον αλγόριθμο BM δεν χρησιμοποιήθηκε, καθώς δεν φάνηκε να προσφέρει κάτι επιπλέον κατά την εξαγωγή του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Αντίστοιχα οι παράμετροι `speckle_window_size` και `speckle_range` στην περίπτωση του αλγορίθμου SGBM δεν χρησιμοποιήθηκαν, καθώς δεν εμφανίστηκαν προβλήματα θορύβου (π.χ.

στιγμάτα λόγω ακραίων τιμών) σε κανέναν πίνακα βάθους. Αντίθετα με τον αλγόριθμο BM οι παραπάνω παράμετροι βελτίωσαν ελαφρώς τα αποτελέσματά του. Από τα Σχήματα 6.9, 6.12 και 6.13 μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως ο αλγόριθμος SGBM αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αλγόριθμο BM, γεγονός που παρατηρήθηκε σε όλα τα στερεοζεύγη. Με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου $disp12maxdiff$, τα πιθανά κενά στον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους από αναντιστοιχίες ή αποκρύψεις συμπληρώνονται μέσω παρεμβολής. Έτσι, τα αποτελέσματα υπό την έννοια αυτή βελτιώνονται καθώς τα επιτρεπόμενα όρια κατά την εφαρμογή του ελέγχου εκατέρωθεν συνέπειας είναι πιο ελαστικά. Στην περίπτωση της Αργιθέας η βελτίωση αυτή φαίνεται αμυδρά, ωστόσο στο παρακάτω κεφάλαιο στην περίπτωση της Σαντορίνης όπου υπάρχουν αρκετές αποκρύψεις είναι μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά επισημαίνεται πως η συμπλήρωση των κενών στους πίνακες ανομοιοτήτων βάθους είναι επιθυμητό να γίνεται με τη χρήση περισσότερων εικόνων με πολλαπλές επικαλύψεις. Σημαντική ήταν η επιρροή της παραμέτρου $uniqueness_ratio$, καθώς η αύξηση της τιμής της σήμαινε ταυτόχρονα και την αύξηση των κενών στον πίνακα βάθους. Παρόλο που στην περιοχή εμφανίζονται τμήματα με ελλιπή υφή και επαναλαμβανόμενα αντικείμενα, οι δύο αλγόριθμοι απέδωσαν τέτοια αποτελέσματα που η τιμή της παραμέτρου $uniqueness_ratio$ δεν λειτούργησε ως βοηθητικό στοιχείο για τη διάκριση μεταξύ των ελάχιστων συσσωματωμένων κοστών συσχέτισης αλλά ως ανοχή κατά την σύγκρισή τους. Η παράμετρος pre_filter_cap ήταν πιο αποδοτική σε χαμηλότερες τιμές κάνοντας τον πίνακα βάθους περισσότερο ομαλό αλλά γενικά η επιρροή της δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλη ειδικά με τον αλγόριθμο BM. Επίσης, σημαντική ήταν η επιρροή των παραμέτρων SAD_window_size και $SAD_BT_window_size$, καθώς η μεταβολή της τιμής τους επηρέαζε την εκτέλεση των μεθόδων κόστους συσχέτισης SAD και BT αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος BT εξάγει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο SAD παρόλο που είναι και οι δύο εξίσου ευαίσθητες σε περιοχές με ελλιπή υφή ή με ραδιομετρικές παραμορφώσεις. Στην περίπτωση της Αργιθέας δεν συναντήθηκαν τέτοια προβλήματα σε μεγάλο βαθμό και για αυτό το λόγο μπορεί να πει κανείς πως τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά ιδιαίτερα με την εφαρμογή του αλγορίθμου SGBM. Τέλος, οι παράμετροι P_1 και P_2 πήραν τέτοιες τιμές, ώστε ο πίνακας βάθους να είναι συγχρόνως ομαλός αλλά και να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά εκεί όπου υπάρχουν ασυνέχειες βάθους καλύπτοντας έτσι τις αδυναμίες της μεθόδου BT/SAD σε τέτοιες περιοχές.

Δεδομένης της καλύτερης επίδοσης του αλγορίθμου SGBM κρίθηκε σκόπιμη η σύνθεση των πινάκων βάθους που προέκυψαν από τα στερεοζεύγη για να προκύψει ένας ενιαίος πίνακας βάθους της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 6.14). Συνολικά έγινε ένωση 19 επιμέρους τμημάτων για τη σύνθεση των πινάκων βάθους των στερεοζευγών και στη συνέχεια έγιναν 10 ενώσεις των πινάκων βάθους όλων των στερεοζευγών. Όλες οι ενώσεις των εικόνων έγιναν με οπτικό τρόπο στο λογισμικό Photoshop. Παράλληλα, σημειώνεται πως η κλίμακα των τόνων του γκρι κατά την εξαγωγή του κάθε πίνακα βάθους εξαρτήθηκε από τις ελάχιστες και μέγιστες ανομοιότητες βάθους για την συγκεκριμένη εικόνα όπου εκτελέστηκε ο αλγόριθμος. Για τον λόγο αυτό κατά την ένωση των εικόνων έγινε παράλληλα και η ραδιομετρική επεξεργασία τους.



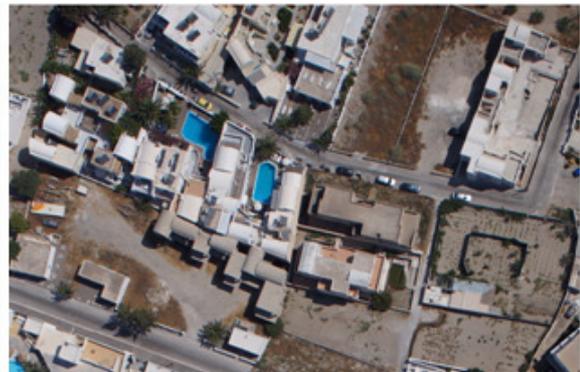
Σχήμα 6.14 Ενιαίος πίνακας ανομοιοτήτων βάθους της ευρύτερης περιοχής.

6.4.2 Περίπτωση Σαντορίνης

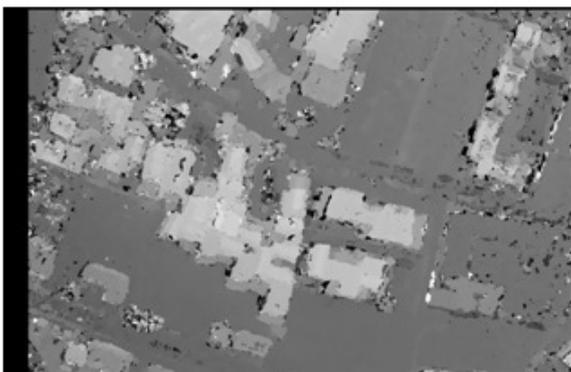
Η μεθοδολογία για την εξαγωγή του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους στην περίπτωση της Σαντορίνης ήταν η ίδια με αυτή της Αργιθέας, δηλαδή η τιμή της παράμετρου `number_of_disparities` παρέμεινε σταθερή για όλα τα στερεοζεύγη αλλά για την περαιτέρω αξιοποίησή της γινόταν μετάθεση της «μάσκας» της δεξιάς εικόνας. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση δεν επιτεύχθηκε η απόδοση ενός ενιαίου πίνακα βάθους για το κάθε στερεοζεύγος κατ' ευθείαν λόγω περιορισμού του λογισμικού ως προς τις διαστάσεις των εικόνων εισόδου. Στην περιοχή της Αργιθέας το πρόβλημα αυτό δεν παρουσιάστηκε, καθώς οι διαστάσεις των εικόνων μετά την επιπολική επανασύστασή τους ήταν μικρότερες (περίπου 630x1100) από αυτών της Σαντορίνης (περίπου 3600x5130). Για τον λόγο αυτό έγινε κατάτμηση του κάθε επικαλυπτόμενου τμήματος μεταξύ των στερεοζευγών σε 4 επιμέρους τμήματα και για το κάθε επιμέρους τμήμα έγινε εξαγωγή του πίνακα βάθους (Σχήμα 6.15). Τα τμήματα αυτά είχαν επικαλύψεις μεταξύ τους για να μπορέσει να γίνει στη συνέχεια η ένωσή τους με όμοιο τρόπο όπως αυτών της Αργιθέας.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

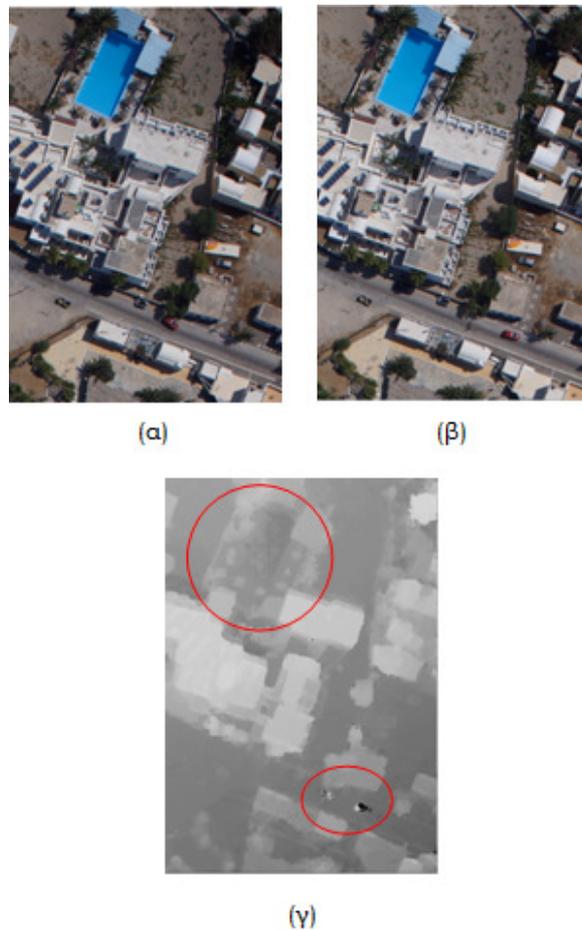


(ε)

Σχήμα 6.15 (α) Αριστερό επιμέρους τμήμα του στερεοζεύγους IMG_25-IMG_23 (β) Δεξί επιμέρους τμήμα του στερεοζεύγους IMG_25-IMG_23 (γ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο BM (δ) Πίνακας βάθους με τον αλγόριθμο SGBM (ε) Ενιαίος πίνακας βάθους με το αλγόριθμο SGBM από τη σύνθεση των τεσσάρων επιμέρους τμημάτων.

Στο Σχήμα 6.15 είναι εμφανής η καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου SGBM σε σχέση με τον αλγόριθμο BM, γεγονός που παρατηρήθηκε σε όλα τα στερεοζεύγη. Οι πίνακες βάθους που προέκυψαν παρουσίασαν κυρίως προβλήματα κοντά στα όρια των αντικειμένων λόγω της χρήσης των παραμετρικών μεθόδων που αποτελεί χαρακτηριστική αδυναμία τους. Επιπλέον, λόγω της απόκτησης των εικόνων από μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV) οι εικόνες είχαν μεγαλύτερες στροφές ω, φ και κ μεταξύ τους σε σχέση με αυτές της Αργιθέας, ενώ παράλληλα περιείχαν εντονότερες ραδιομετρικές διαφορές και παραμορφώσεις. Οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις ραδιομετρικών παραμορφώσεων που συναντήθηκαν και δημιούργησαν προβλήματα κατά την εξαγωγή των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους ήταν οι ανακλάσεις από μεταλλικές επιφάνειες και οι σκιές. Επίσης, προβλήματα παρουσιάστηκαν σε περιοχές όπου εμφανίστηκαν κινούμενα αντικείμενα και σε

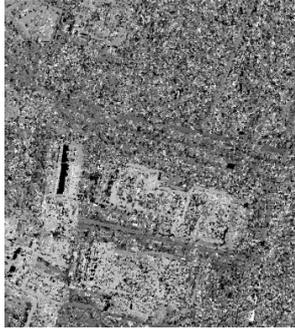
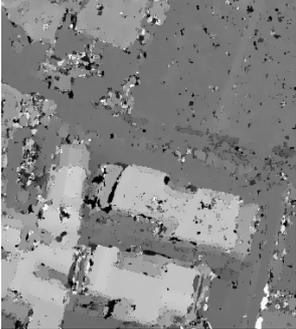
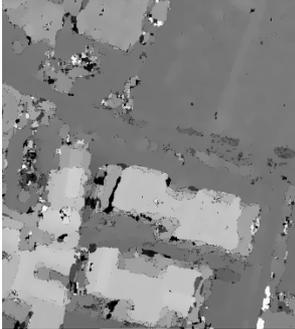
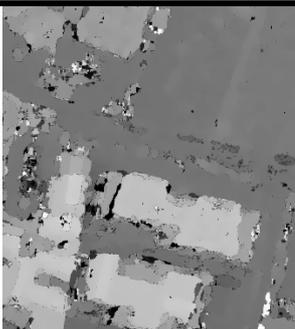
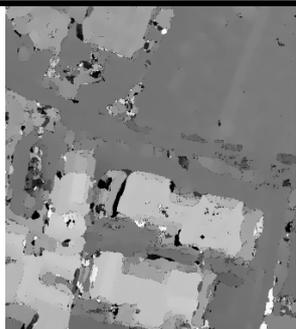
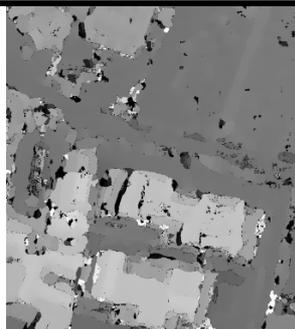
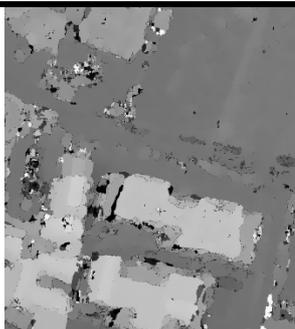
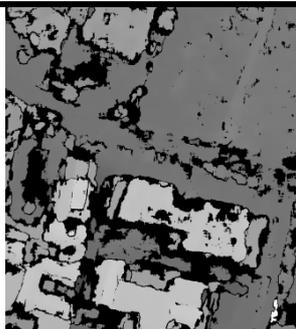
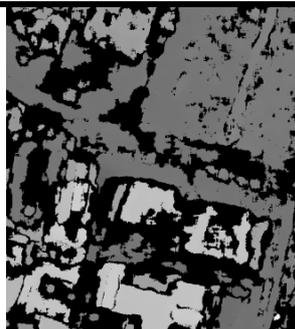
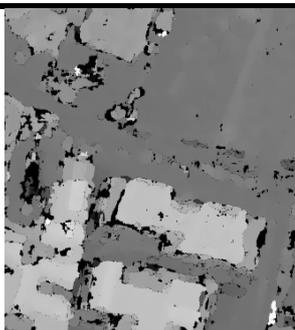
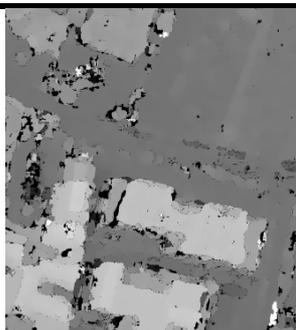
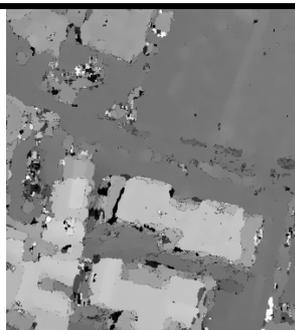
τιμήματα με ελλειπή υφή, όπως για παράδειγμα οι υδάτινες επιφάνειες (Σχήμα 6.16). Παρόλο που το ανάγλυφο της περιοχής είναι ομαλό, η παρουσία των κτισμάτων ή των ξενοδοχειακών συγκροτημάτων συνέβαλε στη μείωση των συνταυτισμένων εικονοψηφίδων στον πίνακα βάθους, καθώς υπήρξαν περισσότερες αποκρύψεις.

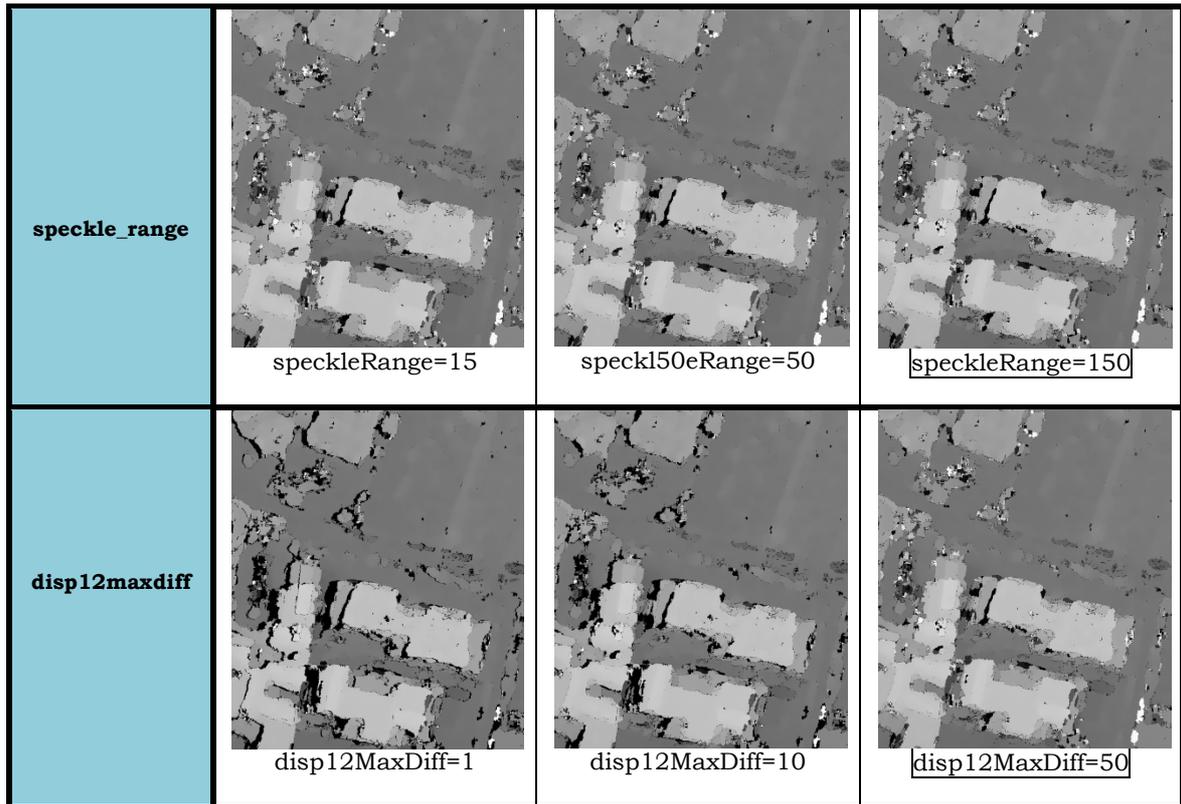


Σχήμα 6.16 (α) Αριστερή εικόνα (β) Δεξιά εικόνα (γ) Επίδραση περιοχών με έλλειψη υφής και κινούμενων αντικειμένων κατά την εξαγωγή του πίνακα βάθους.

Όμοια με την περιοχή της Αργιθέας, οι παράμετροι και για τους δύο αλγόριθμους ρυθμίστηκαν μετά από δοκιμές στο κάθε στερεοζεύγος. Σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των παραμέτρων παρέμειναν ίδιες και η επίδρασή τους στο στερεοζεύγος IMG_25-IMG_23 και για τους δύο αλγόριθμους απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα :

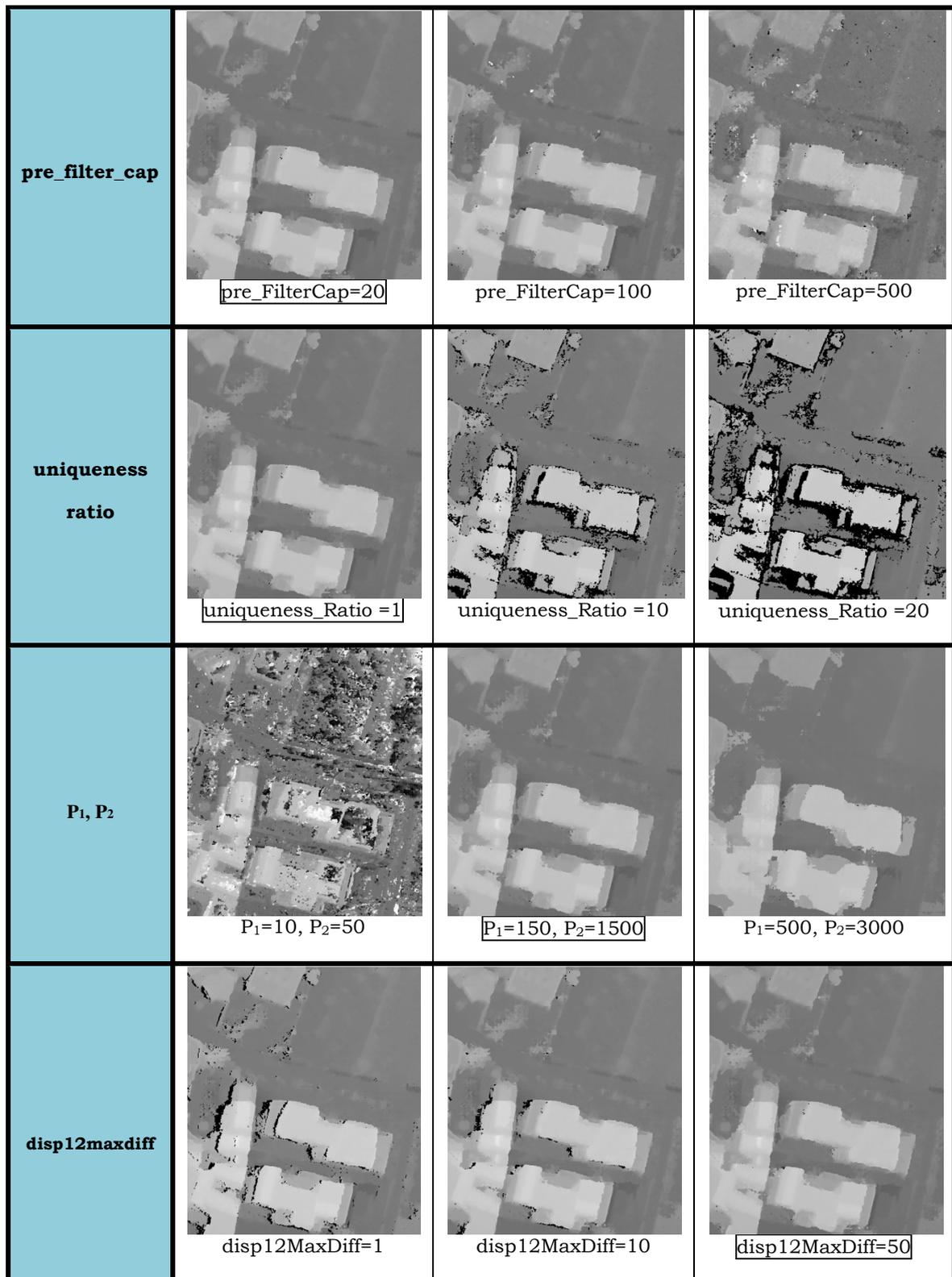
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ BM (number_of_Disparities=80, min_Disparity=0)

<p>SAD window_size</p>	 <p>SAD=5</p>	 <p>SAD=15</p>	 <p>SAD=21</p>
<p>pre_filter_cap</p>	 <p>pre_FilterCap=10</p>	 <p>pre_FilterCap=30</p>	 <p>pre_FilterCap=63</p>
<p>uniqueness ratio</p>	 <p>uniqueness_Ratio =1</p>	 <p>uniqueness_Ratio =10</p>	 <p>uniqueness_Ratio =20</p>
<p>speckle window_size</p>	 <p>speckleWindowSize=20</p>	 <p>speckleWindowSize=150</p>	 <p>speckleWindowSize=500</p>



Σχήμα 6.17 Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου BM στο στερεοζεύγος IMG_25-IMG_23. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεχθείσες τιμές.





Σχήμα 6.18 Επίδραση των παραμέτρων του αλγορίθμου SGBM στο στερεοζεύγος IMG_25-IMG_23. Οι τιμές των παραμέτρων εντός των πλαισίων αποτελούν τις τελικές επιλεγθείσες τιμές.

Από τα παραπάνω σχήματα μπορεί να διακρίνει κανείς ότι ο αλγόριθμος SGBM και σε αυτή την περίπτωση είναι ισχυρότερος από τον αλγόριθμο BM. Ομοίως με την περιοχή της Αργιθέας, η παράμετρος `texture_threshold` στον αλγόριθμο BM δεν χρησιμοποιήθηκε όπως και οι παράμετροι `speckle_window_size` και `speckle_range` με τον αλγόριθμο SGBM. Στον αλγόριθμο BM οι παράμετροι `speckle_window_size` και `speckle_range` βελτίωσαν σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα μειώνοντας τον θόρυβο από τον πίνακα ανομοιοτήτων βάθους. Οι παράμετροι `disp12maxdiff` και `uniqueness_ratio` και σε αυτή την περίπτωση έπαιξαν καθοριστικό ρόλο. Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου `disp12maxdiff` συνέβαλε στην καλύτερη εικόνα του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους από προβλήματα που οφείλονταν σε αποκρύψεις ή από αναντιστοιχίες κατά τη συσχέτιση των εικόνων. Επιπλέον, η αύξηση της τιμής της βελτίωσε τα αποτελέσματα από προβλήματα κατά την εφαρμογή των μεθόδων κόστους συσχέτισης που, όπως φάνηκε, ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητες κοντά στα όρια των αντικειμένων. Επίσης, η παράμετρος `pre_filter_cap` και στους δύο αλγορίθμους πήρε χαμηλές τιμές, για να διατηρηθεί ο θόρυβος σε χαμηλά επίπεδα. Οι διαστάσεις των παραθύρων `SAD_window_size` και `SAD_window_size` πήραν τέτοιες τιμές, ώστε οι αντίστοιχοι πίνακες ανομοιοτήτων βάθους να είναι συγχρόνως ομαλοί αλλά και ακριβείς. Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων P_1 και P_2 με τον αλγόριθμο SGBM συνετέλεσαν στην ομαλότητα του πίνακα βάθους αλλά και στην καλύτερη απόδοση στις περιοχές όπου παρουσιάζονταν ασυνέχειες βάθους όπως για παράδειγμα στα περιγράμματα των κτιρίων.

Όπως και στην περίπτωση της Αργιθέας, λόγω της καλύτερης επίδοσης του αλγορίθμου SGBM έγινε η σύνθεση των πινάκων βάθους που προέκυψαν από τα στερεοζεύγη με σκοπό να προκύψει ένας ενιαίος πίνακας βάθους της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 6.19). Τα επιμέρους τμήματα που συνολικά ενώθηκαν ήταν 16 για τη σύνθεση των πινάκων βάθους των στερεοζευγών ενώ στη συνέχεια έγιναν 4 ενώσεις των πινάκων βάθους όλων των στερεοζευγών. Οι ενώσεις των εικόνων έγιναν στο λογισμικό Photoshop ενώ παράλληλα έγινε και η ραδιομετρική επεξεργασία τους.



Σχήμα 6.19 Ενιαίος πίνακας ανομοιοτήτων βάθους της ευρύτερης περιοχής.

6.5 Έλεγχος των πινάκων ανομοιοτήτων βάθους

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.2.1 η αξιολόγηση του πίνακα ανομοιοτήτων βάθους που έχει προκύψει από κάποιο αλγόριθμο συσχέτισης μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους όπως για παράδειγμα με τη χρήση δεικτών, με οπτικό έλεγχο ή πιο πρακτικά με ανακατασκευή του αντικειμένου ή με σύγκριση με κάποιο ήδη υπάρχον ψηφιακό μοντέλο αναφοράς του αντικειμένου. Όσον αφορά την τελευταία μεθοδολογία στην εφαρμογή της παρούσης διπλωματικής εργασίας αυτό δεν κατέστη δυνατό σε καμία από τις δύο περιοχές. Αυτό οφείλεται στο ότι τα διατιθέμενα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας των δύο περιοχών που είχαν προκύψει από κλασικές στερεοσκοπικές μεθόδους σε φωτογραμμετρικό σταθμό (δηλαδή από αυτόματη εξαγωγή ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας το οποίο στη συνέχεια υπόκειται σε διορθώσεις από τον χρήστη), ήταν στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (Ε.Γ.Σ.Α.'87). Οι δύο πίνακες βάθους που προέκυψαν από την πυκνή συνταύτιση σημείων αποτελούν στην ουσία τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας των δύο περιοχών στο σύστημα της βάσης λήψης των εικόνων τα οποία σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στο Ε.Γ.Σ.Α.'87 έχουν διαφορές στην κλίμακα, στον προσανατολισμό και στην θέση. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως για να γίνει η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων πρέπει τα μοντέλα που βρίσκονται στο σύστημα της βάσης λήψης των εικόνων να μετασχηματιστούν στο Ε.Γ.Σ.Α.'87 (ή το αντίστροφο) με έναν 7-παραμετρικό μετασχηματισμό ο οποίος περιλαμβάνει τρεις (3) μεταθέσεις, τρεις (3) στροφές και μία (1) κλίμακα. Στη συνέχεια, γίνεται επανασύσταση της εικόνας με αναδειγματοληψία για να μπορούν τα συγκρινόμενα μοντέλα να είναι διαχειρίσιμα από διάφορα λογισμικά (π.χ. ArcGIS) και να εξαχθούν τα ανάλογα αποτελέσματα. Τέτοιες διαδικασίες σύγκρισης περιλαμβάνουν την αφαίρεση μεταξύ των εικόνων των δύο μοντέλων επιφάνειας ή την σύγκριση κάποιων χαρακτηριστικών γραμμών των εικόνων των μοντέλων των οποίων η κλίμακα των τόνων του γκρι έχει μεταφραστεί σε απόλυτα υψόμετρα συγκρίνοντας τελικά τις αντίστοιχες μηκοτομές. Ένα τέτοιο εγχείρημα για τον προσδιορισμό των επτά (7) παραμέτρων απαιτεί την εύρεση τουλάχιστον τριών (3) κοινών σημείων στα δύο συστήματα αναφοράς. Ωστόσο, λόγω της υψηλής αβεβαιότητας του προσδιορισμού ομόλογων σημείων στους πίνακες βάθους της Αργιθέας και της Σαντορίνης (ακόμα και με τον αλγόριθμο SGBM που απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα) ο μετασχηματισμός αυτός αδυνατεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά θα μπορούσε κανείς να εφαρμόσει μεθοδολογίες που δεν απαιτούν την εύρεση μεμονωμένων σημείων για την εκτέλεση κάποιου μετασχηματισμού αλλά απαιτούν τη χρήση γραμμικών στοιχείων που στην

περίπτωση της παραπάνω εφαρμογής θα υπήρχε η δυνατότητα να εφαρμοστούν με ενδεχομένως μικρότερη αβεβαιότητα κατά τον προσδιορισμό τους. Χαρακτηριστικά γραμμικά στοιχεία για την περιοχή της Αργιθέας θα μπορούσαν να αποτελέσουν κάποιες μισγάγγειες ενώ αντίστοιχα στην περιοχή της Σαντορίνης θα μπορούσαν να αποτελέσουν κάποια περιγράμματα κτισμάτων.

Έτσι, ο έλεγχος των πινάκων βάθους των δύο περιοχών δεν επιτεύχθηκε και δεν βρέθηκε μία ποσοτικοποιημένη απόκλιση από κάποιο άλλο μοντέλο επιφάνειας που προέκυψε από πιο αξιόπιστη μεθοδολογία. Επομένως έγινε ποιοτικά με οπτικό τρόπο παρατηρώντας το ποσοστό των συνταυτισμένων σημείων και των αποκρύψεων αλλά και την πιστότητα του πίνακα βάθους ως προς τα φωτογραφιζόμενα αντικείμενα της αριστερής εικόνας του κάθε στερεοζεύγους. Ειδικά με τον αλγόριθμο SGBM τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά και για τις δύο περιοχές. Στην περίπτωση της Αργιθέας ο πίνακας βάθους περιέγραφε με αρκετά καλή πιστότητα το ανάγλυφο της περιοχής. Ομοίως, στην περίπτωση της Σαντορίνης περιέγραφε με σαφήνεια τα κτίρια, τα όρια των ιδιοκτησιών ακόμα και τις περιοχές με βλάστηση. Επίσης, το ποσοστό των αποκρύψεων διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα.

Κεφάλαιο 7:

Συμπεράσματα-Προοπτικές

Βάσει των αποτελεσμάτων του Κεφ.6 μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως η πυκνή συνταύτιση σημείων με τη συνάρτηση SGBM αποδίδει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη συνάρτηση BM τόσο στην περίπτωση της Αργιθέας όσο και στην περίπτωση της Σαντορίνης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η συνάρτηση SGBM συνδυάζει τη μέθοδο BM/SAD και τον ημι-καθολικό αλγόριθμο σε αντίθεση με τη συνάρτηση BM που χρησιμοποιεί τη μέθοδο SAD και τον τοπικό αλγόριθμο. Η μέθοδος BT/SAD είναι πιο αποτελεσματική από τη μέθοδο SAD στις περιοχές με υψηλές συχνότητες αλλά και γενικότερα εκεί όπου παρουσιάζονται ασυνέχειες βάθους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι η περιοχή της Σαντορίνης όπου τα περιγράμματα των αντικειμένων και τα όρια των ιδιοκτησιών στον πίνακα βάθους που προέκυψε από τη συνάρτηση SGBM είναι σαφή και η περιοχή αποτυπώνεται με καλή ακρίβεια και πιστότητα. Αντίθετα, με τη συνάρτηση BM παρατηρήθηκαν ασάφειες στις ακμές των κτιρίων αλλά και μειωμένο ποσοστό συνταυτισμένων σημείων γενικότερα στις περιοχές με ασυνέχειες βάθους. Αξίζει να σημειωθεί πως παρόλο που και οι δύο παραμετρικές μέθοδοι είναι ευαίσθητες σε περιοχές με ελλιπή υφή ή με επαναλαμβανόμενα αντικείμενα, η συνταύτιση των εικόνων και στις δύο περιοχές εκτελέστηκε σε ικανοποιητικό βαθμό πλην κάποιων περιπτώσεων όπου εμφανίστηκαν στις εικόνες ραδιομετρικές παραμορφώσεις.

Επιπλέον, τα μεγάλα ποσοστά επικάλυψης κατά τον προγραμματισμό λήψης των εικόνων και στις δύο περιπτώσεις μείωσαν δραστικά τις όποιες αποκρύψεις και πέτυχαν ταυτόχρονα μικρές ραδιομετρικές διαφορές μεταξύ των εικόνων. Ο

έλεγχος των πινάκων βάθους έγινε με ποιοτικά κριτήρια και όχι ποσοτικοποιημένα και λόγω αυτού δεν μπόρεσε να καταγραφεί ο βαθμός επιρροής αυτών των δυσμενών γεωμετριών στην υπομετρική ακρίβεια των σημείων. Στην ιδανική περίπτωση ο έλεγχος θα μπορούσε να γίνει με μία ανακατασκευή των ευρύτερων περιοχών, ωστόσο αυτή η διαδικασία ξεπερνούσε τους στόχους της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Επίσης, βάσει των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τον έλεγχο των πινάκων βάθους, η εργασία αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για την εφαρμογή ή ανάπτυξη νέων πιο αποτελεσματικών μεθόδων σε ότι αφορά την ένωση των επιμέρους τμημάτων των πινάκων βάθους.

Όσον αφορά τον υπολογιστικό χρόνο για την εξαγωγή των πινάκων βάθους στην περιοχή της Αργιθέας, σε επίπεδο ενός ολόκληρου επικαλυπτόμενου τμήματος ο χρόνος για τη συνάρτηση BM ήταν 3 sec ενώ για τη συνάρτηση SGBM ήταν 5 sec. Αντίστοιχα για την περιοχή της Σαντορίνης η εξαγωγή των πινάκων βάθους σε επίπεδο ενός επιμέρους τμήματος εκτελέστηκε με τη συνάρτηση BM σε 5 sec ενώ με τη συνάρτηση SGBM εκτελέστηκε σε 30 sec. Είναι προφανές πως στις περιπτώσεις όπου οι χρησιμοποιούμενες εικόνες έχουν υψηλή ανάλυση ο αλγόριθμος SGBM υστερεί σε ταχύτητα παρόλα αυτά αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα. Συμπληρωματικά αναφέρεται πως στη συνάρτηση SGBM η μέθοδος BT/SAD επιβαρύνει (έστω και λίγο) σε σχέση με την απλή περίπτωση της SAD τον χρόνο εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Με αυτά τα δεδομένα επιβεβαιώνεται πως οι τοπικοί αλγόριθμοι υστερούν σε ακρίβεια, όμως είναι αρκετά ευέλικτοι σε εικόνες με υψηλή ανάλυση και θεωρούνται επικρατέστεροι για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί πως το κριτήριο της ακρίβειας του βάθους του κάθε σημείου το καθορίζει η ίδια η εφαρμογή. Αυτό σημαίνει πως παρόλο που οι τοπικοί αλγόριθμοι αποδίδουν συνήθως χαμηλότερης ακρίβειας αποτελέσματα, είναι οι ιδανικοί για εφαρμογές όπως στη ρομποτική που οι απαιτήσεις (τουλάχιστον μέχρι τώρα) δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Από την άλλη μεριά δεν ενδείκνυνται για περιπτώσεις που ο σκοπός είναι η εξαγωγή ενός σχετικά ακριβούς ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας όπως αυτά που παράγονται με τον ημι-καθολικό και τον καθολικό αλγόριθμο. Συνεπώς, ο απώτερος σκοπός είναι η βέλτιστη ταχύτητα, ακρίβεια και οικονομία ανάλογα με την εφαρμογή.

Η πυκνή συνταύτιση σημείων γενικότερα ως διαδικασία φαίνεται να εξελίσσεται με αλματώδεις ρυθμούς προς αυτή την κατεύθυνση στοχεύοντας στην πλήρη αυτοματοποίηση των διαδικασιών κατά την εφαρμογή των αλγορίθμων συσχέτισης.

Αυτή τη στιγμή τα αποτελέσματα είναι αρκετά εντυπωσιακά. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση καθώς καλείται να δώσει ακόμα πιο αποτελεσματικές λύσεις μέσω των μεθόδων υπολογισμού του κόστους συσχέτισης στα τυπικά προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την συνταύτιση των εικόνων. Με την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αλλά και με τη σύνταξη νέων αλγορίθμων συσχέτισης ή με τη βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων (λιγότερο παραμετροποιημένων), η πυκνή συνταύτιση σημείων θα μπορεί στο μέλλον να αντικαταστήσει τα συστήματα LIDAR ή τους επίγειους σαρωτές που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή για την απόκτηση πυκνών και ταυτόχρονα ποιοτικών ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας. Στο πλαίσιο αυτό μπορεί να ανοίξει νέους ορίζοντες και να χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλές εφαρμογές όπως το Κτηματολόγιο, οι αποτυπώσεις μνημείων, κ.α. προσφέροντας ακόμα καλύτερες ακρίβειες.

Βιβλιογραφία

- [1] Γεωργόπουλος, Α., 1998. *Ψηφιακή Φωτογραμμετρία*. Σπουδαστικές σημειώσεις, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- [2] Myron Z. Brown, Darius Burschka, Gregory D. Hager, 2003. Advances in Computational Stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.25, No.8.
- [3] Πέτσα,Ε., 2000. *Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*. Σπουδαστικές σημειώσεις, Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ Αθήνας.
- [4] Πατιάς, Π., 1991. *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- [5] Πρόκος, Α., 2012. *Δημιουργία Φωτογραμμετρικού Σαρωτή Laser με Χρήση Πρόσθετων Γεωμετρικών Δεσμεύσεων*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- [6] Scharstein, D., Szeliski, R., 2002. A taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1), pp.7-42.
- [7] <http://vision.middlebury.edu/stereo/>
- [8] <http://www.isprs.org>
- [9] Αδάμ, Κ., 2011. *Γεωμετρία του Στερεοζεύγους από Βαθμονομημένες και από μη Βαθμονομημένες Μηχανές*. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- [10] Καλησπεράκης, Η., 2010. *Η Επιπολική Γεωμετρία στον Προβολικό και του Ευκλείδειο Χώρο*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
- [11] Stentoumis, C., Grammatikopoulos, L., Kalisperakis, I., Karras, G., 2012. Implementing an Adaptive Approach for Dense Stereo Matching. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII, Part 5, pp. 309-314.
- [12] Hirschmüller, H., 2008. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), pp. 328-41.
- [13] Sebastian Dröppelmann, Moos Hueting, Sander Latour, Martijn van der Veen, 2010. *Stereo Vision Using the OpenCV Library*.

- [14] Collins, R., 2007. *Computer Vision I*, Lecture Notes, CSE Department, Penn State University.
- [15] Αληφραγκής, Μ., 2010. *Εικονική Ανακατασκευή και Ταυτοποίηση Αντικειμένων στο Χώρο με Τεχνικές Υπολογιστικής Όρασης και Τρισδιάστατα γραφικά*. Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [16] Hirschmüller, H., Scharstein, D., 2009. Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(9), pp.1582-1599.
- [17] Bradski, G., Kaehler, A., 2008. *Learning OpenCV*. O' Reilly Media.
- [18] Hirschmüller, H., 2006. Stereo Vision in Structured Environments by Consistent Semi-Global Matching. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, New York, NY, USA.
- [19] Bleye, M., Chambon, S., 2002. Does Color Really Help in Dense Stereo Matching?
- [20] Birchfield, S., Tomasi, C., 1998. A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.20, no.4, pp.401-406.
- [21] Ke Zhu, Pablo d'Angelo, Matthias Butenuth, 2012. Evaluation of Stereo Matching Costs on Close Range, Aerial and Satellite Images. *ICPRAM*, pp. 379-385.
- [22] Szeliski, R., 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer.
- [23] Gassaway, J., 2011. *Local Bundling of Disparity Maps for improved Dense 3D Visual Reconstruction*. MSc Thesis, Polytechnic Institute and State University.
- [24] Wenxian Hong, 2010. *A Study of Fast, Robust Stereo-Matching Algorithms*. MSc Thesis, MIT.
- [25] Chun-Jen Tsai, Aggelos K. Katsaggelos, 1999. Dense Disparity Estimation with a Divide and Conquer Disparity Space Image Technique. *IEEE Transactions on Multimedia*, vol.1, no.1, pp. 18-29.
- [26] Stephen S. Intille, Aaron F. Bobick, 1994. *Disparity-Space Images and Large Occlusions Stereo*. Media Lab, Technical Report, MIT.

- [27]Haala, N., 2011. Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching. pp. 185-195.
- [28]Hirschmüller, H., 2000. Semi-Global Matching-Motivation, Developments and Applications. pp.173-184.
- [29]<http://www.microsoft.com/ultracam>
- [30]Krauss, K., 2003. *Φωτογραμμευρία Τόμος 1*. Εκδόσεις ΤΕΕ.
- [31]Gerke, M., 2009. Dense Matching in High Resolution Oblique Airborne Images. CMRT09, IAPRS, vol. XXXVIII, Part 3/W4, pp. 77-82.
- [32]<http://www.flimap.com/site>
- [33]<http://www.pictometry.com>
- [34]Hirschmüller, H., Scholten, F., Hirzinger, G., 2005. Stereo Vision Based Reconstruction of Huge Urban Areas from an Airborne Pushbroom Camera (HRSC). DAGM.
- [35]http://www.dlr.de/pf/en/desktopdefault.aspx/tabid-331/1198_read-2260/
- [36]Haala, N., Rothermel, M., 2012. Dense Multiple Stereo Matching of Highly Overlapping UAV Imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIX-B1, pp.387-392.
- [37]<http://opencv.willowgarage.com/documentation/cpp/index.html>
- [38] *The OpenCV Reference Manual 2.1*, 2010.
- [39]<https://maps.google.gr/>
- [40]<http://www.ktimatologio.gr/Pages/Default.aspx>