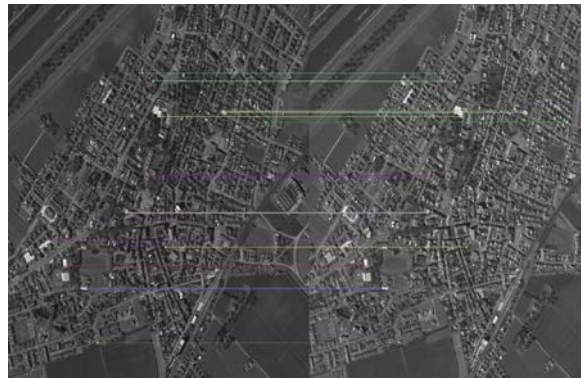
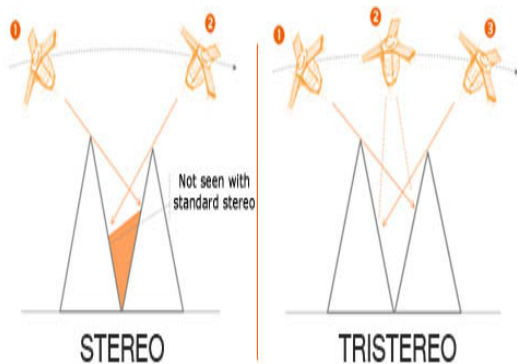
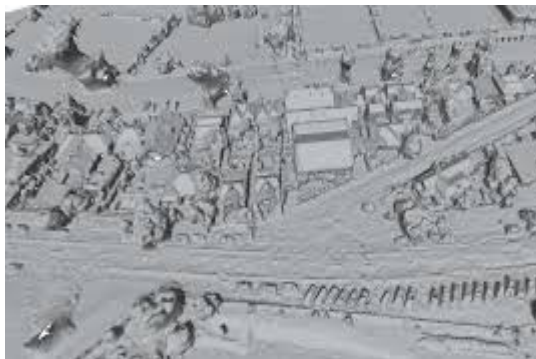




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία:

«Διερεύνηση Εκτέλεσης Αλγορίθμου Στέρεο Συνταύτισης
Semi- Global Matching σε Δορυφορικές Εικόνες»



ΓΟΥΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Ακαδημαϊκό έτος 2015-2016

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

**«Διερεύνηση Εκτελέσεως Αλγορίθμου Στέρεο Συνταύτισης Semi-
Global Matching σε Δορυφορικές Εικόνες»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Δημήτριος Γ. Γούλας

Επιβλέπων : Γεωργόπουλος Ανδρέας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Γεωργόπουλος Ανδρέας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωαννίδης Χαράλαμπος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Καράντζαλος Κωνσταντίνος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

.....
Δημήτριος Γ. Γούλας

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Γ. Γούλας, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 Πλατφόρμες Λήψεις και τεχνολογίες- Τύποι δεκτών	5
Η ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΙΚΟΝΑ	8
1.2 Ψηφιακή Καταγραφή	8
1.3 Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Εικόνων	9
2. Γεωμετρικοί Μετασχηματισμοί εικονας	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Δισδιάστατοι Μετασχηματισμοί με διατήρηση του σχήματος	11
2.2.1 Στροφή.....	11
2.2.2 Στροφή και κλίμακα.....	11
2.2.3 Στροφή και Μετάθεση	11
2.2.4 Μετασχηματισμός Ομοιότητας (Στροφή, Κλίμακα και Μετάθεση)	12
2.3 Δισδιάστατοι Μετασχηματισμοί Μεταβολής Σχήματος	12
2.3.1 Ορθογωνικός Μετασχηματισμός	12
2.3.2 Αφινικός Μετασχηματισμός	13
2.3.3 Προβολικός Μετασχηματισμός	14
2.4 Τρισδιάστατοι Μετασχηματισμοί	15
2.4.1 Μετασχηματισμός Στερεού Σώματος- Rigid Body Transformation	15
2.4.2 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Ομοιότητας	16
2.4.3 Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός- Direct Linear Transformation (DLT)	16
3. Επιπολική Επανασύσταση Εικόνων	17
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Επιπολική Επανασύσταση Επιφανειακών Αισθητήρων (Frame Cameras)	17
3.3 Επιπολική Γεωμετρία Στερεοζεύγους	17
3.4 Αλγοριθμική Περιγραφή Επιπολικής Επανασύστασης	19
3.5 Επιπολική επανασύσταση Γραμμικών Αισθητήρων (Pushbroom sensors)	20
3.5.1 Αυστήρο Μαθηματικό Μοντέλο	21
3.5.2 Διδιάστατο Αφινικό Μοντέλο	23
3.5.3 Κλασματικά Πολυώνυμα RPC.....	25
4. Μέτρα Ομοιότητας Πυκνής Συνταύτισης Σημείων (Dense Image Matching Similarity Measures)	27
4.1 Εισαγωγή- Επιβολή Δεσμεύσεων	27
4.2 Μέθοδος των Απολύτων και των Τετραγωνικών Διαφορών	27
4.3 Μέθοδος του αθροίσματος των Απολύτων και των Τετραγωνικών Διαφορών	28
4.4 Μέθοδος του Συντελεστή Συσχέτισης	29
4.5 Μέθοδος της Αμοιβαίας Πληροφορίας (MI).....	30
5. Αλγόριθμοι Υπολογισμού Κόστους Συσχετισης	31
5.1 Τοπικός Αλγόριθμος	31
5.2 Καθολικός Αλγόριθμος	31
5.3 Ημικαθολικός Αλγόριθμος.....	32
6. State of the Art	34
6.1 Εφαρμογή Αλγορίθμου SGM σε δορυφορικές εικόνες - Γενικά.....	34
6.2 Εφαρμογή του Αλγορίθμου σε Δορυφορικές Εικόνες	35
6.2.1 Εφαρμογή του Αλγορίθμου με την χρήση του λογισμικού ERDAS IMAGINE	35
6.2.1.1 Εισαγωγή.....	35
6.2.1.2 Περιοχή Μελέτης	35
6.2.1.3 Προεπεξεργασία των Εικόνων	37

6.2.1.4	Εκτέλεση του Αλγορίθμου sgm για την Παραγωγή ΨΜΕ.....	39
6.2.1.5	Αποτελέσματα	44
6.2.1.5.1	Τριγωνισμός Δορυφορικών Εικόνων.	44
6.2.1.6	Αξιολόγηση.....	47
6.2.1.6.1	Οπτική Αξιολόγηση	47
6.2.1.6.2	Αξιολόγηση με την εκτέλεση κατατομών (profile graph) με το σύνολο των δεδομένων ελέγχου	52
6.2.1.6.3	Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από Κτηματολόγιο Α.Ε.	53
6.2.1.6.4	Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα SRTM και ASTER.....	55
6.3	Εφαρμογή του Αλγόριθμου με την χρήση του αλγορίθμου S2P (Satellite Stereo Pipeline) και του συνοδευτικού διαδικτυακού εργαλείου	58
6.3.1	Μεθοδολογία εφαρμογής	58
6.3.1.1	Εισαγωγή.....	58
6.3.1.2	Στέρεο Συνταύτιση και Τριγωνισμός	62
6.3.1.3	Αλγόριθμος εύρεσης υψομέτρου.....	63
6.3.2	Μέθοδοι Εφαρμογής	64
6.3.2.1	Χρήση του διαδικτυακού εργαλείου S2p	64
6.3.2.2	Εκτέλεση του πηγαίου κώδικα S2p σε περιβάλλον OpenSuse Linux.....	67
6.3.2.3	Αποτελέσματα	71
6.3.2.4	Οπτική Αξιολόγηση	72
6.3.2.5	Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από Κτηματολόγιο Α.Ε.	75
6.3.2.6	Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από τα δεδομένα srtm	77
6.3.2.7	Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από τα δεδομένα aster	77
6.3.2.8	Αξιολόγηση Αξιολόγηση με την εκτέλεση κατατομών (profile graph) με το σύνολο των δεδομένων ελέγχου	79
6.4	Εφαρμογή του Αλγορίθμου με την χρήση του ανοιχτού λογισμικού OSSIM και του DATE plugin	81
7.	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	81
7.1	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του Tridicon SGM	81
7.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του Satellite Stereo Pipeline SGM.....	82
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	85

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και υπεύθυνο για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας τον Καθ. Ανδρέα Γεωργόπουλο για την καθοδήγησή του, τον Δρ. Μιχ Πολυχρόνη Κολοκούση για την ουσιαστική του βοήθεια στο ανοιχτό λογισμικό καθώς και την σύζυγό μου για την αμέριστη συμπαράστασή της, στις πολλές ώρες που αφιέρωσα για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου πυκνής συνταύτισης σημείων semi-global matching (sgm) σε τριάδα δορυφορικών εικόνων τύπου pleiades. Η εφαρμογή των αλγορίθμων πραγματοποιείται τόσο με την χρήση εμπορικού λογισμικού, όσο και με την χρήση αλγορίθμων ανοιχτής πλατφόρμας. Αρχικά δίδεται μια συνοπτική περιγραφή της γεωμετρίας των αισθητήρων και του τρόπου λήψης. Στην συνέχεια πραγματοποιείται αναφορά στους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς, στην διαδικασία επιπολικής επανασύστασης, στα κλασματικά πολυώνυμα RPC και στα μέτρα ομοιότητας για την εκτέλεση της πυκνής συνταύτισης. Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται παρουσίαση της αλγοριθμικής εφαρμογής και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή στην νήσο Αντίπαρο. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων. Ουσιαστικά η μεταπτυχιακή εργασία αποτελεί την προσπάθεια προσέγγισης του πολύπλοκου προβλήματος της εκτέλεσης του υπολογιστικά δαπανηρού ημι-καθολικού αλγόριθμου σε δέκτες τύπου pushbroom, με διερεύνηση των δυσχερειών που παρουσιάζονται ειδικά στο τμήμα της επιπολικής επανασύστασης

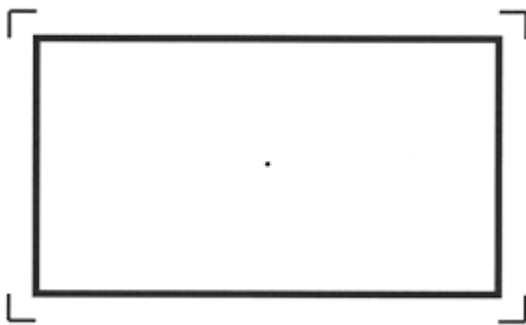
SUMMARY

The goal of this master thesis is the implementation of semi global matching algorithm in pleiades triplet satellite imagery. Application of the algorithm is channelized through commercial and open source non commercial software. Initially a brief description of sensor geometry and type is given. Afterwards a more thorough description is given of the geometric transformations, the process of epipolar rectification, the rational functions RPC and dense image matching implementation. In the second part the results are presented for Antiparos island. Furthermore the final results are presented and the conclusions are made, regarding the quality of the final products. In essence this master thesis is an effort to approach the complex issue of the computer intensive semi global matching in pushbroom sensors and the investigation of the difficulties especially in the epipolar resampling part.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πλατφόρμες Λήψεις και τεχνολογίες- Τύποι δεκτών

Στον επιστημονικό τομέα της φωτογραμμετρίας - όρασης υπολογιστών χρησιμοποιούνται παθητικού τύπου δέκτες συλλογής φωτός. Οι δέκτες αυτοί χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα του αισθητήρα. Έτσι υπάρχουν οι αισθητήρες πλαισίου (frame cameras), οι οποίοι συναντώνται κατά κύριο λόγο σε αεροφωτογραφήσεις με την χρήση συμβατικών αεροσκαφών, αλλά και σε αεροφωτογραφικές λήψεις από μη συμβατικές πλατφόρμες, όπως είναι τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, οι αετοί, τα μπαλόνια, αερόστατα, paraglider κ.ά. και οι οποίες κατά βάση είναι μη-μετρητικές και μετρητικές. Οι αισθητήρες αυτοί είναι διδιάστατοι με κανονικό σχήμα (συνήθως ορθογώνιοι), επίπεδοι και με γνωστά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

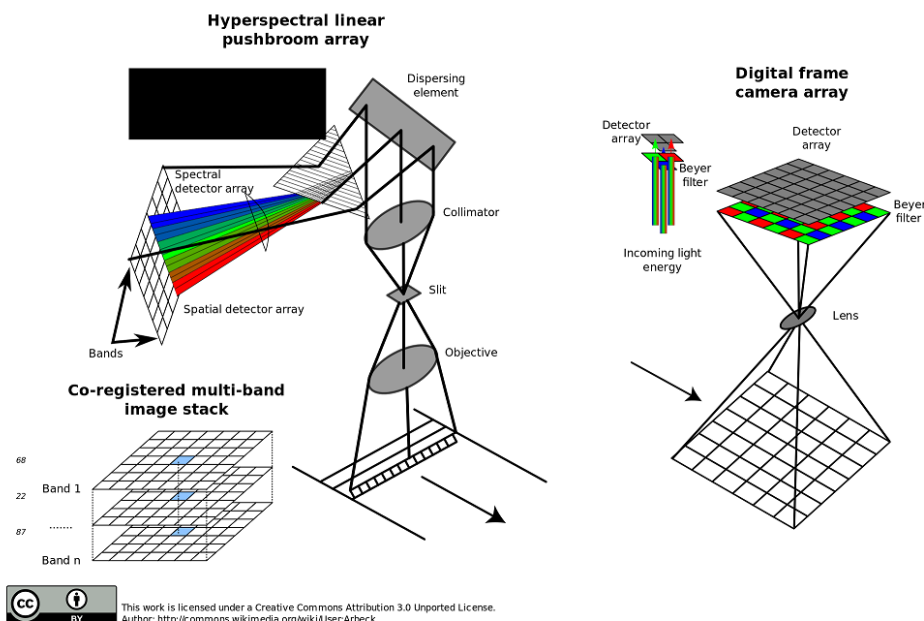


Εικόνα 1 Μορφή του Αισθητήρα



Εικόνα 2 Τυπική Ερασιτεχνική frame camera

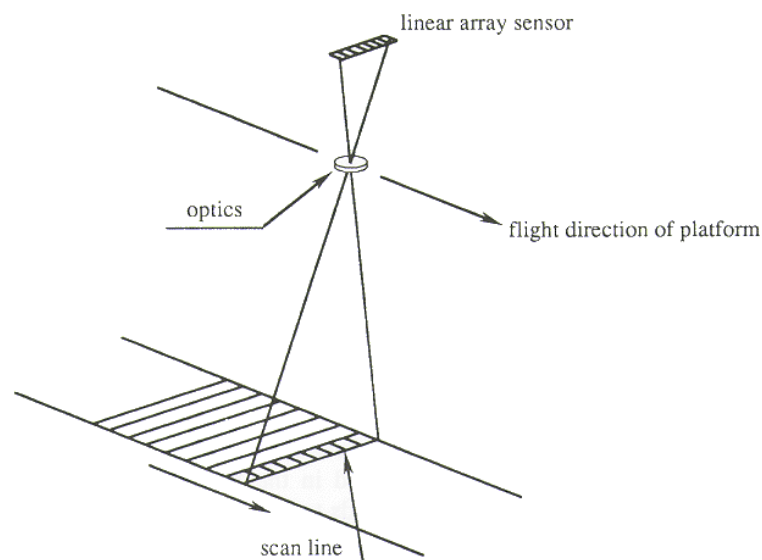
Μια απλούστερη μορφή αισθητήρων αποτελούν οι γραμμικοί αισθητήρες οι οποίοι έχουν μέγεθος χιλιάδες ρικελ κάθετα στην διεύθυνση κίνησης της πλατφόρμας και μερικά ρικελ στην διεύθυνση κίνησης. Οι τύποι αυτοί αισθητήρα χρησιμοποιούνται σε δορυφορικούς δέκτες αλλά και σε αεροφωτογραφικούς δέκτες σύγχρονης τεχνολογίας. Χαρακτηριστική οπτική σύγκριση παρουσιάζεται στην εικόνα 3..



Εικόνα 3 Οπτική Σύγκριση Γραμμικού και Επιφανειακού Αισθητήρα

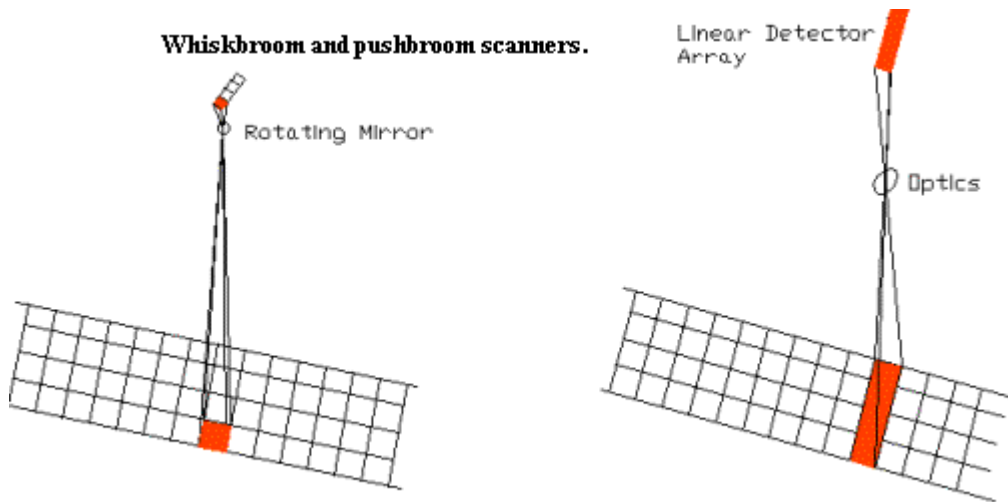
Οι γραμμικοί αισθητήρες χωρίζονται σε 3 κύριες υποκατηγορίες, σε δέκτες τύπου pushbroom, panoramic και whisklet.

Πρώτη κατηγορία αισθητήρων είναι οι τύπου Pushbroom. Εδώ η εικόνα δημιουργείται με την κίνηση του αισθητήρα κατά μήκος της τροχιάς, και έχει πλάτος όσο το πλάτος του γραμμικού σαρωτή, ενώ δεν υπάρχει κάτοπτρο. Βασικό δομικό στοιχείο της εικόνας είναι μία μονή σειρά από εικονοστοιχεία, με διεύθυνση κάθετη σε αυτή της κίνησης της πλατφόρμας, το λεγόμενο framelet. Η παράθεση μεγάλου αριθμού διαδοχικών τέτοιων framelet οδηγεί στην δημιουργία της σκηνής της εικόνας (image scene) (εικόνα 4). Στην περίπτωση των συστημάτων με διδιάστατο εστιακό επίπεδο, το framelet αποτελεί ολόκληρη την εικόνα, και τότε ονομάζεται frame image. Υπάρχουν βέβαια και παραλλαγές των αισθητήρων Pushbroom, όπως εκείνη κατά την οποία αποτυπώνονται περισσότερα του ενός framelet για μία θέση. Μία άλλη παραλλαγή υπάρχει όταν το framelet είναι ασυνεχές και αποτελείται από μία λωρίδα από εικονοστοιχεία διατεταγμένα με ακανόνιστο τρόπο (Καροπούλου, 2007).



Εικόνα 4 Τυπική Διαδικασία Λήψης Pushbroom Sensor (Πηγή: <http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp/~wataru/lecture/rsgis/rsnote/cp2/cp2-11.htm>)

Δεύτερη κατηγορία είναι οι αισθητήρες τύπου Panoramic. Οι αισθητήρες αυτοί σαρώνουν το έδαφος σε κατεύθυνση κάθετη με αυτήν της κίνησης του αισθητήρα. Οι παραμορφώσεις κάθε framelet που οφείλονται στην κίνηση της πλατφόρμας κατά την διάρκεια της σάρωσης, απαλείφονται με τη βοήθεια του FMC (Forward Motion Compensation). Η γεωμετρία της σκηνής από έναν τέτοιο αισθητήρα είναι όμοια με αυτήν του αισθητήρα Pushbroom. Συνήθως δεν υπάρχει δυνατότητα για στερεοσκοπική κάλυψη, αλλά είναι πιθανή η πολυφασματική κάλυψη. Λόγω της ανάγκης δε για ύπαρξη πολλών μεγάλων framelet, είναι αρκετά συνηθισμένα τα ασυνεχή framelet .



Εικόνα 5 Τυπική Διαδικασία Λήψης Whiskbroom Sensor

Η τρίτη κατηγορία στην ουσία αποτελεί ένα συνδυασμό των δύο παραπάνω, και ονομάζεται Whiskbroom. Η εικόνα δημιουργείται από ένα φωτοευαίσθητο στοιχείο (εικόνα 5). Το framelet εδώ είναι συνήθως πολύ μικρό σε μήκος, και σαρώνεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα σε διεύθυνση κάθετη της κίνησης της πλατφόρμας, με ή χωρίς FMC (Forward Motion Compensation). Η τελική εικόνα περιλαμβάνει framelet που μεταξύ τους δεν επικαλύπτονται. Παραδείγματα είναι οι αισθητήρες MSS και TM του LANDSAT. Για την πληρέστερη παρουσίαση των δυνατοτήτων ψηφιακής καταγραφής, οι μέθοδοι παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί.

Η Ψηφιακή καταγραφή μπορεί να γίνει

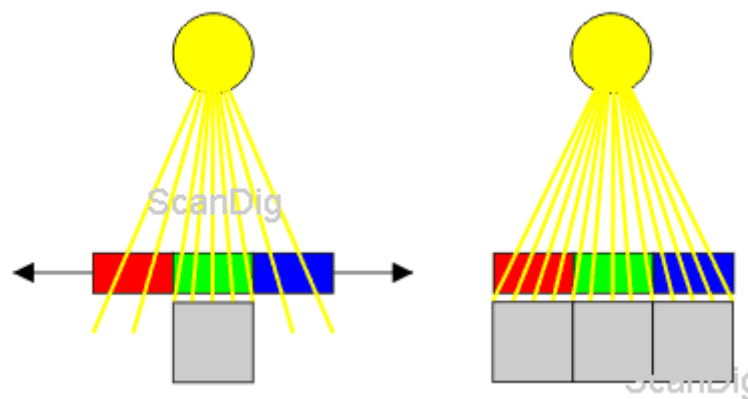
1. Με ένα Φ/Ε στοιχείο
 
2. Με μια σειρά Φ/Ε στοιχείων γραμμικός αισθητήρας
 
3. Με δισδιάστατη διάταξη Φ/Ε στοιχείων επιφανειακός αισθητήρας
 

Εικόνα 6 Τύποι Αισθητήρων (Πηγή: Διαφάνειες Μαθήματος Συλλογή Φωτ. Δεδομένων)

Η ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΙΚΟΝΑ

1.2 Ψηφιακή Καταγραφή

Η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό λέγεται ψηφιοποίηση (digitization, quantization) και είναι δυνατό να γίνει είτε εμμέσως, με σάρωση της αναλογικής εικόνας, είτε αμέσως, με απευθείας καταγραφή σε ψηφιακή μορφή. Σε κάθε περίπτωση όμως χρησιμοποιείται μια τεχνική μετατροπής του αναλογικού σήματος (φως) σε ψηφιακό (analog-to-digital, A/D, conversion). Μετά από σχετικές έρευνες και αντίστοιχη τεχνολογική πρόοδο, η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση της ιδιότητας του πυριτίου να παράγει αρνητικώς φορτισμένα ιόντα, όταν εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που στην προκειμένη περίπτωση είναι το ορατό φως. Ένα από τα προϊόντα της σύγχρονης τεχνολογικής προόδου είναι και το φωτοευαίσθητο στοιχείο (sensor element, sel) το οποίο υλοποιεί αυτήν την μετατροπή.



Εικόνα 7 Τυπική Διαδικασία Λήψης Φωτός Ενός Sensor Element

Οι σύγχρονοι ψηφιακοί δέκτες έχουν στη θέση όπου δημιουργείται το είδωλο της απεικόνισης, από τα οπτικά στοιχεία (φακούς, κάτοπτρα κ.λ.π.), ένα σύνολο από τέτοια φωτοευαίσθητα στοιχεία (sel) για την καταγραφή της ψηφιακής εικόνας. Αυτό το σύνολο φωτοευαίσθητων στοιχείων είναι προσαρμοσμένο πάνω σε μια βάση από ημιαγωγικό υλικό και έχει ουσιαστικώς τη μορφή ενός μικροεπεξεργαστή (microchip). Η διάταξη αυτή έχει επικρατήσει να λέγεται αισθητήρας (sensor).

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την λειτουργία των αισθητήρων αυτών, όπως η MOS (Metal Oxide Semiconductor, Ημιαγωγός οξειδίου του μετάλλου) ή η CID (Charge Injection Device, συσκευή έγχυσης του φορτίου) και η CCD (Charge Coupled Device, συσκευή συζευγμένου φορτίου). Η τελευταία έχει επικρατήσει σήμερα στο σύνολο σχεδόν των συστημάτων ψηφιακής καταγραφής εικόνων. Ο αισθητήρας αποτελείται συνήθως από μια ορθογωνική διάταξη (γραμμές και στήλες) μεγάλου αριθμού φωτοστοιχείων. Η πρόσπτωση του φωτός μπορεί να παρασταθεί από μια βροχή φωτονίων, τα οποία συλλέγονται από τα φωτοευαίσθητα στοιχεία. Κάθε φωτοευαίσθητο στοιχείο συλλέγει, όπως είναι φυσικό διαφορετική ποσότητα φωτονίων, δεδομένου ότι προσπίπτει σ'αυτό φως διαφορετικής έντασης. Η ποσότητα αυτή μεταφράζεται από κάθε φωτοευαίσθητο στοιχείο σε ηλεκτρικό δυναμικό (ρεύμα), το οποίο πρέπει να μετρηθεί και να καταγραφεί σε μορφή αναγνωρίσιμη από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Έτσι κάθε σειρά (ή στήλη αναλόγως του συστήματος

λειτουργίας του CCD) μεταφέρεται σε κάποιο μετρητή και καταγράφεται. Ουσιαστικώς καταγράφεται το αναλογικό σήμα (ηλεκτρικό φορτίο) που φέρει κάθε φωτοευαίσθητο στοιχείο μετά την στιγμιαία έκθεση στο φως. Η καταμέτρηση αυτή μεταφράζεται από έναν απλό μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, σε μορφή μαγνητικά αποθηκεύσιμη. Μετά το τέλος αυτής της καταμέτρησης και καταγραφής, τα φωτοευαίσθητα στοιχεία είναι ελεύθερα και έτοιμα για την καταγραφή της επόμενης εικόνας. Παρ' όλο που η καταμέτρηση και καταγραφή αυτή γίνεται σε πάρα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, διαρκεί χρόνο αρκετά σημαντικό για να μπορεί να αγνοηθεί. Υπάρχει συνεπώς - ακόμα - μια απειροελάχιστη χρονική υστέρηση μεταξύ της έκθεσης στο φως και της καταγραφής της ψηφιακής εικόνας σε μαγνητικά αποθηκεύσιμη μορφή.

Συνοψίζοντας διακρίνονται τρία είδη αισθητήρων, αισθητήρες με ορθογωνική διάταξη στοιχείων, όπως αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, αισθητήρες ενός στοιχείου, που σαρώνει με ταχύτητα κατά γραμμές την εικόνα, αλλά και αισθητήρες μιας γραμμής που σαρώνουν κάθετα την εικόνα.

1.3 Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Εικόνων

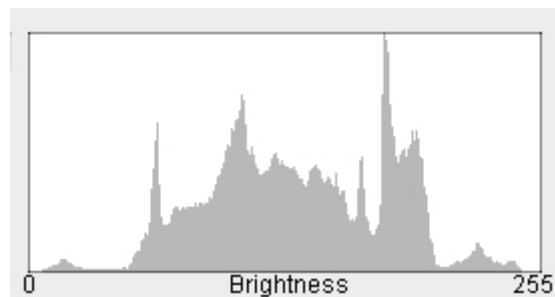
Η ψηφιακή εικόνα αποτελείται από ένα σύνολο εικονοψηφίδων, διατεταγμένων κατά γραμμές και στήλες. Κάθε εικονοψηφίδα λαμβάνει μια ψηφιακή τιμή. Η κλίμακα των ψηφιακών τιμών εξαρτάται από την ραδιομετρική ανάλυση της εικόνας. Για ανάλυση 8-bit οι δυνατές διαφορετικές τιμές (τόνοι) είναι $2^8 = 256$. Συνεπώς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

Γεωμετρική ανάλυση: Στην περίπτωση των απευθείας ψηφιακών εικόνων η ανάλυση αναφέρεται στον αριθμό των εικονοψηφίδων μιας λήψης. Για παράδειγμα, ψηφιακή μηχανή επίγειων λήψεων ανάλυσης 25 Mpixel ισοδυναμεί με εικόνα 5000 x 5000 εικονοψηφίδων (εάν είναι γνωστή η διάσταση της φωτοευαίσθητης επιφάνειας, είναι δυνατόν να υπολογιστεί το πραγματικό μέγεθος της εικονοψηφίδας). Στην περίπτωση της ψηφιοποιημένης αναλογικής εικόνας ο αριθμός των εικονοψηφίδων εξαρτάται από την ανάλυση σάρωσής της. Το ενδεικτικό μέτρο της ανάλυσης σάρωσης είναι ο αριθμός των εικονοψηφίδων ανά μία ίντσα (dpi) ή διαφορετικά ο αριθμός των εικονοψηφίδων ανά 25.4mm.

Ραδιομετρική ανάλυση: Αναφέρεται στον αριθμό των πιθανών ψηφιακών τιμών που μπορεί να έχει μια εικονοψηφίδα. Είναι σαφές ότι μεγαλύτερη ραδιομετρική ανάλυση προσφέρει περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας της εικόνας. Παρ' όλο που η σύγχρονη τεχνολογία επιτρέπει αποθήκευση των εικόνων και σε ανάλυση μεγαλύτερη των 8 bit (ή των 24 bit για τις έγχρωμες εικόνες), αυτή έχει επικρατήσει και χρησιμοποιείται πρακτικά σε όλα τα φωτογραμμετρικά συστήματα. Η βέλτιστη επιλογή ραδιομετρικής ανάλυσης εξαρτάται βέβαια από τη εφαρμογή. Έτσι, εικόνες 1 bit (δυναμικές εικόνες) είναι χρήσιμες στην εξαγωγή ακμών (edge detection) ή στην διαδικασία μετατροπής αρχείων ψηφιδωτής μορφής σε αρχεία διανυσματικής μορφής

(raster to vector). Πολύ υψηλή ανάλυση, όπως ανάλυση 12 bit, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ιατρικής ή και σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης προκειμένου να είναι δυνατή η διάκριση στοιχείων που στηρίζεται σε πολύ μικρές διαφορές ραδιομετρίας σε διάφορα κανάλια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Γενικά πάντως στις φωτογραμμετρικές εργασίες έχει επικρατήσει η ανάλυση των 8 bit (ή των 24 bit). Δύο άλλα χαρακτηριστικά των ψηφιακών εικόνων με μεγάλη σημασία για την ψηφιακή φωτογραμμετρία είναι η φωτεινότητα και η αντίθεση.

Ένας εποπτικός τρόπος για να δει κανείς τον αριθμό των εικονοψηφίδων που λαμβάνουν μια ψηφιακή τιμή είναι το ιστογράμμα της εικόνας. Παρακάτω δίδεται η μορφή του ιστογράμματος μιας εικόνας. Η μορφή του ιστογράμματος έχει ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμογές της ψηφιακής φωτογραμμετρίας, αφού δίνει μια εποπτική εικόνα της μεταβολής των τιμών φωτεινότητας και την κατανομή αυτών στο σύνολο της εικόνας.



Εικόνα 8 Τυπικό Ιστόγραμμα Εικόνας

2. Γεωμετρικοί Μετασχηματισμοί Εικόνας

2.1 Εισαγωγή

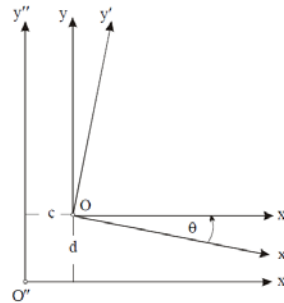
Οι γραμμικοί μετασχηματισμοί παρουσιάζουν σημαντική χρήση στο πεδίο της επιστήμης της Γεωπληροφορικής. Προσδίδουν τα αναλυτικά εργαλεία για τον μετασχηματισμό από τον χώρο της εικόνας στον τρισδιάστατο χώρο και αντίστροφα καθώς και την δυνατότητα μετασχηματισμών μεταξύ χώρων ίδιων διαστάσεων (2d->3d, 2d->2d, 3d->3d). Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία καθίσταται αναγκαία η παράθεση τους, αφού το σύνολο των αλγοριθμικών διαδικασιών που ακολουθούνται απαιτούν πλειάδα μετασχηματισμών για την δημιουργία του τελικού προϊόντος. Χαρακτηριστική είναι η κατα τμήματα εκτέλεση του αφινικού μετασχηματισμού στις δορυφορικές εικόνες κατά την εκτέλεση του satellite stereo pipeline. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων εξ αυτών.

2.2 Δισδιάστατοι Μετασχηματισμοί με διατήρηση του σχήματος

2.2.1 Στροφή

Δύο συστήματα xy , $x'y'$ με κοινή αφετηρία και κλίμακα παρουσιάζουν στροφή κατά γωνία θ , εφόσον με την εφαρμογή του πίνακα στροφής R τα δύο συστήματα συμπίπτουν. Η εξίσωση στροφής σε μορφή πινάκων καθώς και η εποπτική εκτέλεση του μετασχηματισμού παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$



Εικόνα 9 Δισδιάστατος Πίνακας Στροφής

Εικόνα 10 Γράφημα Στροφής

2.2.2 Στροφή και κλίμακα

Δύο συστήματα αναφοράς xy , $x'y'$ με κοινή αφετηρία, τα οποία εκτός από γωνία στροφής θ μεταξύ τους, παρουσιάζουν και διαφορετική κλίμακα, θεωρούνται ότι παρουσιάζουν ένα δισδιάστατο μετασχηματισμό με διατήρηση του σχήματος. Η εξίσωση μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων σε μορφή πινάκων δίδεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{με} \quad a^2 + b^2 = \lambda^2$$

Εικόνα 11 Πίνακας Στροφής και κλίμακας

2.2.3 Στροφή και Μετάθεση

Δύο συστήματα αναφοράς xy , $x'y'$ με κοινή κλίμακα, τα οποία εκτός από γωνία στροφής θ μεταξύ τους, παρουσιάζουν και μετάθεση, τότε η μετάπτωση από το ένα σύστημα αναφοράς στο άλλο πραγματοποιείται με την αρχική εφαρμογή του πίνακα στροφής και την μετέπειτα επένεργεια του διανύσματος μεταθέσης. Η εξίσωση μετασχηματισμού μεταξύ των δύο συστημάτων σε μορφή πινάκων δίδεται από την σχέση.

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}$$

Εικόνα 12 Πίνακας Στροφής και μετάθεσης

2.2.4 Μετασχηματισμός Ομοιότητας (Στροφή, Κλίμακα και Μετάθεση)

Ο μετασχηματισμός ομοιότητας αποτελεί τον συνδυασμό όλων των παραπάνω μεμονωμένων μετασχηματισμών (κλίμακα, στροφή και μετάθεση), επιτρέπει τον μετασχηματισμό μεταξύ δύο συστημάτων αναφοράς διαφορετικών στροφών, κλίμακας και χωρίς κοινή αφετηρία. Η εξίσωση σε μορφή πινάκων που περιγράφει τον παραπάνω μετασχηματισμο είναι

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad \text{με} \quad a^2 + b^2 = \lambda^2$$

Εικόνα 13 Τύποι Πίνακας Μετασχηματισμού Ομοιότητας

Ο παραπάνω μετασχηματισμός παρουσιάζει τέσσερις συντελεστές (a,b,c,d) οι οποίοι αντιστοιχούν στην κλίμακα, την στροφή (a,b) και την μετάθεση (c,d) και εφαρμόζεται για μετατροπές μεταξύ συστημάτων στα οποία δεν παρουσιάζουν γραμμικά σφάλματα.

2.3 Δισδιάστατοι Μετασχηματισμοί Μεταβολής Σχήματος

2.3.1 Ορθογωνικός Μετασχηματισμός

Έστω δύο συστήματα αναφοράς xy και $x'y'$ τα οποία παρουσιάζουν διαφορετική κλίμακα κατά x και y . Τότε η εξίσωση που περιγράφει τον μετασχηματισμό μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων δίνεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$

Εικόνα 14 Πίνακας Ορθογώνιου Μετασχηματισμού

και σε αναλυτική μορφή

$$\begin{aligned}x &= a_1x' + b_1y' + c_1 \\y &= a_2x' + b_2y' + c_2\end{aligned}$$

Εικόνα 15 Εξισώσεις Ορθογωνικού Μετασχηματισμού

Η παραπάνω μορφή αν και ομοιάζει με το αφινικό μετασχηματισμό, υπόκειται στην δέσμευση ότι:

$$a_1b_1 + a_2b_2 = 0 \quad (1)$$

Άρα οι παράμετροι του μετασχηματισμού είναι πέντε και η δέσμευση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μη γραμμικότητα των σχέσεων ως προς τις πέντε παραμέτρους και την αναγκαιότητα της γραμμικοποίησης για την εύρεση των παραμέτρων αυτών (Καρράς, 1998)

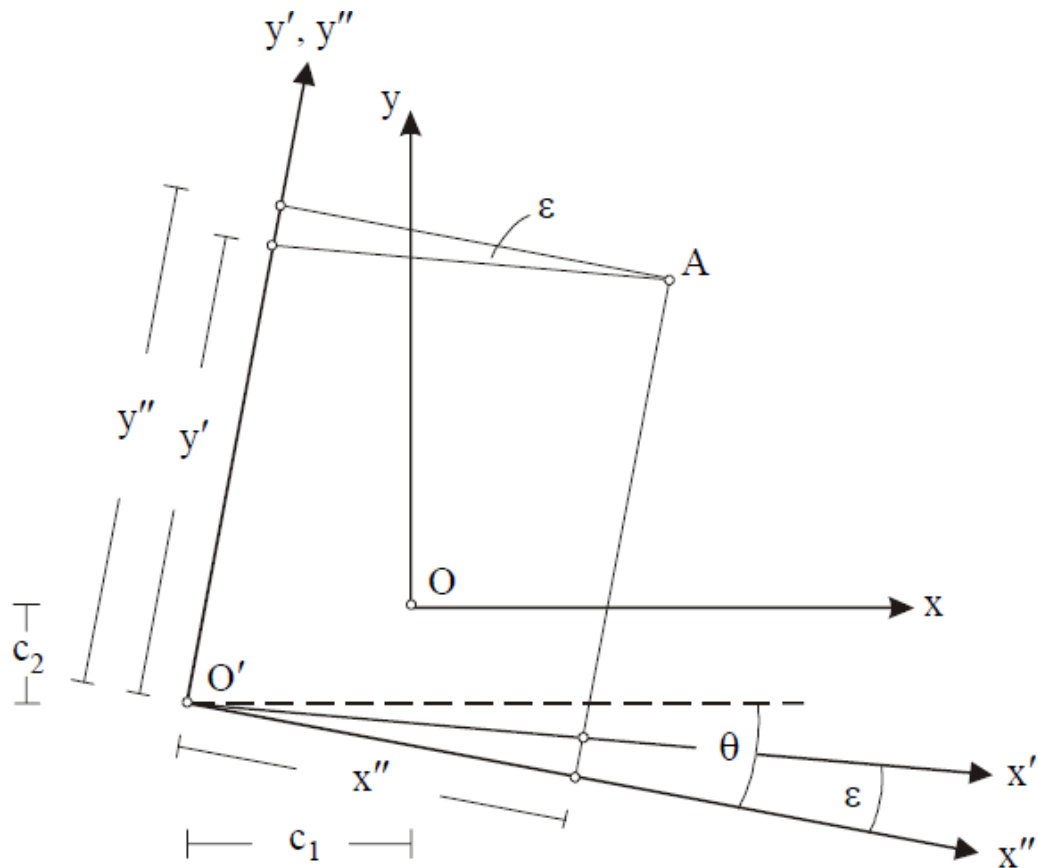
2.3.2 Αφινικός Μετασχηματισμός

Ο μετασχηματισμός αυτός αποτελεί την γενικότερη μορφή δισδιάστατου γραμμικού μετασχηματισμού, ο οποίος περιλαμβάνει εκτός από τις προαναφερθείσες μετατροπές και την μη ορθογωνικότητα μεταξύ των αξόνων. Η εξίσωση σε μορφή πινάκων που περιγράφει τον αφινικό μετασχηματισμό δίνεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}$$

Εικόνα 16 Πίνακας Αφινικού Μετασχηματισμού

Η σχέση αυτή σε αντίθεση με την εξίσωση που περιγράφει τον ορθογωνικό μετασχηματισμό δεν παρουσιάζει πέντε αλλά έξι παραμέτρους, αφού δεν υπόκειται στην δέσμευση όπως αυτή περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο, αλλά συμπεριλαμβάνει την γενικότερη μορφή της μη ορθογωνικότητας μεταξύ των αξόνων, εισάγοντας έτσι επιπλέον παραμέτρους.



Εικόνα 17 Γράφημα Αφινικού Μετασχηματισμού

Η γραμμικότητα των σχέσεων με τις οποίες περιγράφεται ο αφινικός μετασχηματισμός επιτρέπει την άμεση χρήση τους για τον προσδιορισμό των παραμέτρων εφόσον είναι γνωστά τουλάχιστον τρία σημεία και στα δύο συστήματα συντεταγμένων. Κλασική διαδικασία αφινικού μετασχηματισμού αποτελεί η σκόπευση των εικονοσημάτων (4 ή 8 αντίστοιχα) στις αναλογικές αεροφωτογραφικές μηχανές, με σκοπό την εξάλειψη των σφαλμάτων κατά τηνεκτέλεση του εσωτερικού προσανατολισμού..

2.3.3 Προβολικός Μετασχηματισμός

Αποτελεί τον σημαντικότερο μετασχηματισμό στην φωτογραμμετρία στον χώρο των δύο διαστάσεων αφού επιτρέπει τον μετασχηματισμό μεταξύ δύο διαφορετικών προβολικών επιπέδων, δίνοντας έτσι την δυνατότητα εκτέλεσης μετρήσεων σε επίπεδα αντικείμενα με την χρήση του παραπάνω μετασχηματισμού. Ο προβολικός μετασχηματισμός δεν συνδέει των χώρο των τρισδιάστατων απεικονίσεων, αλλά ένα επίπεδο αντικείμενο του τρισδιάστατου χώρου με τον χώρο των 2d απεικονίσεων και διέπεται απο τις εξισώσεις.

$$x = \frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1} \quad y = \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}}{a_{31}X + a_{32}Y + 1}$$

Εικόνα 18 Εξισώσεις Προβολικού Μετασχηματισμού

όπου με X,Y συμβολίζονται οι συντεταγμένες του επίπεδου αντικειμένου στον 3d χώρο και x,y οι συντεταγμένες στην απεικόνιση (π.χ. εικονοσυντεταγμένες). Ο μετασχηματισμός αυτός είναι αμφιμονοσήμαντος, δηλαδή με την γνώση των οκτώ

παραμέτρων του μετασχηματισμού (τουλάχιστον 4 σημεία) είναι δυνατή η μετάβαση από τον 3d χώρο στην απεικόνιση και αντίστροφα.

Στα πλεονεκτήματα του προβολικού μετασχηματισμού συγκαταλέγονται επίσης:

α. Η γενικότητα του μετασχηματισμού, η οποία είναι ευρύτερη της συνθήκης συγγραμμικότητας με αποτέλεσμα να είναι δυνατή και η χρήση του μετασχηματισμού αυτού και σε μηχανές μη γνωστής εσωτερικής γεωμετρίας (π.χ. ερασιτεχνικές)

β. Η δυνατότητα απορρόφησης των γραμμικών σφάλματων. Έτσι δεν είναι αναγκαία η χρήση ενός αφινικού μετασχηματισμού αλλά ο προβολικός μετασχηματισμός ως γενικότερος αυτών απορροφά τα σφάλματα αυτά.

2.4 Τρισδιάστατοι Μετασχηματισμοί

2.4.1 Μετασχηματισμός Στερεού Σώματος- Rigid Body Transformation

Ως στερεό σώμα γεωμετρικά ορίζεται ένα τρισδιάστατο σημειοσύνολο XYZ το οποίο μετασχηματιζόμενο δεν μεταβάλλεται ως προς το σχήμα και μέγεθος.

Ο υπόψη μετασχηματισμός παρουσιάζει έξι βαθμούς ελευθερίας:

α. Τρεις βαθμούς ελευθερίας για τις στροφες Ω, Φ, κ περί των τριών αξόνων.

β. Τρεις βαθμούς ελευθερίας για την μετάθεση X, Y, Z του σώματος στον τρισδιάστατο χώρο.

Οι εξισώσεις που διέπουν τον μετασχηματισμό αυτό είναι:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} b_{11}^2 + b_{21}^2 + b_{31}^2 &= 1 & b_{11}b_{12} + b_{21}b_{22} + b_{31}b_{32} &= 0 \\ b_{12}^2 + b_{22}^2 + b_{32}^2 &= 1 & b_{11}b_{13} + b_{21}b_{23} + b_{31}b_{33} &= 0 \\ b_{13}^2 + b_{23}^2 + b_{33}^2 &= 1 & b_{12}b_{13} + b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33} &= 0 \end{aligned}$$

Εικόνα 19 Μετασχηματισμός Rigid Body

Εικόνα 20 Δεσμεύσεις Εξισώσεων

Οι 12 παράμετροι του γενικότερου τρισδιάστατου μετασχηματισμού, μειώνονται σε έξι με τις έξι εξισώσεις να αποτελούν τις δεσμεύσεις που προκύπτουν από την ορθογωνικότητα του πίνακα στροφής.

Ο παραπάνω μετασχηματισμός παρουσιάζει εξαιρετική χρησιμότητα κατά την φωτογραμμετρική οπισθοτομία, σε μια δέσμη στην οποία έχει αποκατασταθεί ο εσωτερικός προσανατολισμός. Στην διαδικασία αυτή αναζητούνται οι συντεταγμένες του σημείου λήψης ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$) με γνωστές τις γεωδαιτικές συντεταγμένες κάποιων σημείων (Φωτοσταθερών).

2.4.2 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Ομοιότητας

Ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας δεν έχει μόνο ως αποτέλεσμα την μεταβολή της θέσης και του προσανατολισμού του στερεού του αλλά και την ενιαία μεταβολή κλίμακας προς τις τρεις διευθύνσεις (ενιαία μεγέθυνση, ενιαία σμίκρυνση).

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_0 \\ Y'_0 \\ Z'_0 \end{bmatrix}$$

Εικόνα 21 Τρισδιάστατος Μετασχηματισμός Ομοιότητας

Η βασική εφαρμογή του μετασχηματισμού αυτού είναι για την εκτέλεση του "απολύτου" προσανατολισμού των εικόνων και την δημιουργία στερεομοντέλου με αυθαίρετη θέση, προσανατολισμό και κλίμακα.

Ο γενικός τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας, όπως αναπτύχθηκε σε προηγούμενη ενότητα, εδώ παρουσιάζει πέντε δεσμεύσεις, συμπεριλαμβανομένου των τριών μηδενικών αθροισμάτων γινομένων και την ισότητα με λ^2 των αθροισμάτων των τετραγώνων (Ισα δηλαδή με την άγνωστη ενιαία κλίμακα).

$$b_{11}b_{12} + b_{21}b_{22} + b_{31}b_{32} = 0$$

$$b_{11}b_{13} + b_{21}b_{23} + b_{31}b_{33} = 0$$

$$b_{12}b_{13} + b_{22}b_{23} + b_{32}b_{33} = 0$$

$$b_{f1}^2 + b_{s1}^2 + b_{z1}^2 = b_{f2}^2 + b_{s2}^2 + b_{z2}^2 = b_{f3}^2 + b_{s3}^2 + b_{z3}^2$$

Εικόνα 22 Εξισώσεις δεσμεύσεων Τρισδιάστατου Μετασχηματισμός Ομοιότητας

2.4.3 Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός- Direct Linear Transformation (DLT)

Ο άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός ουσιαστικά δεν αποτελεί τρισδιάστατο μετασχηματισμό, αφού συνδέει ένα σημειοσύνολο του 3δ χώρου με την απεικόνιση του στον 2δ χώρο. Οι εξισώσεις που διέπουν τον παραπάνω μετασχηματισμό είναι

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

Εικόνα 23 Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός

Όπως καθίσταται αντιληπτό οι σχέσεις αυτές παρουσιάζουν δύο κύρια χαρακτηριστικά. Πρώτον είναι γενικότερες από τον προβολικό μετασχηματισμό αφού συσχετίζουν τρισδιάστατα σημειοσύνολα σε σημειοσύνολα του δισδιάστατου χώρου. Επίσης ο μετασχηματισμός αυτός δεν είναι αντιστρεπτός σε αντίθεση με τον προβολικό μετασχηματισμό, ο οποίος συνδέει αμφιμονοσήμαντα τα μετασχηματιζόμενα σημειοσύνολα.

Ο άμεσος γραμμικός μετασχηματισμός παρουσιάζει έντεκα παραμέτρους, οι οποίες μπορούν να μειωθούν σε εννέα και να μεταπέσει ο μετασχηματισμός στο γεωμετρικό μοντέλο της κεντρικής προβολής (συνθήκη συγγραμμικότητας), έφ'όσον υφίστανται οι δεσμεύσεις του μηδενισμού των αφινικών παραμορφώσεων κλίμακας και μηδενισμού της απόκλισης της ορθογωνικότητας των αξόνων.

Ο DLT δύναται να χρησιμοποιηθεί ως εξής: Αρχικά με την χρήση της οπισθοτομίας και αρκετών φωτοσταθερών είναι δυνατός ο προσδιορισμός των 11 παραμέτρων του μετασχηματισμού για κάθε εικόνα και στην συνέχεια, με γνωστό τον γεωμετρικό μετασχηματισμό από κάθε εικόνα στον χώρο, με χρήση της εμπροσθοτομίας την εύρεση όλων των συντεταγμένων του 3d αντικειμένου. Με την χαρακτηριστική διαφορά ότι απαιτεί πολύ περισσότερα φωτοσταθερά σε σχέση με την εκτέλεση της συνήθους ροής φωτογραμμετρικών εργασιών (εσωτερικός, σχετικός και απόλυτος προσανατολισμός)

3. Επιπολική Επανασύσταση Εικόνων

3.1 Εισαγωγή

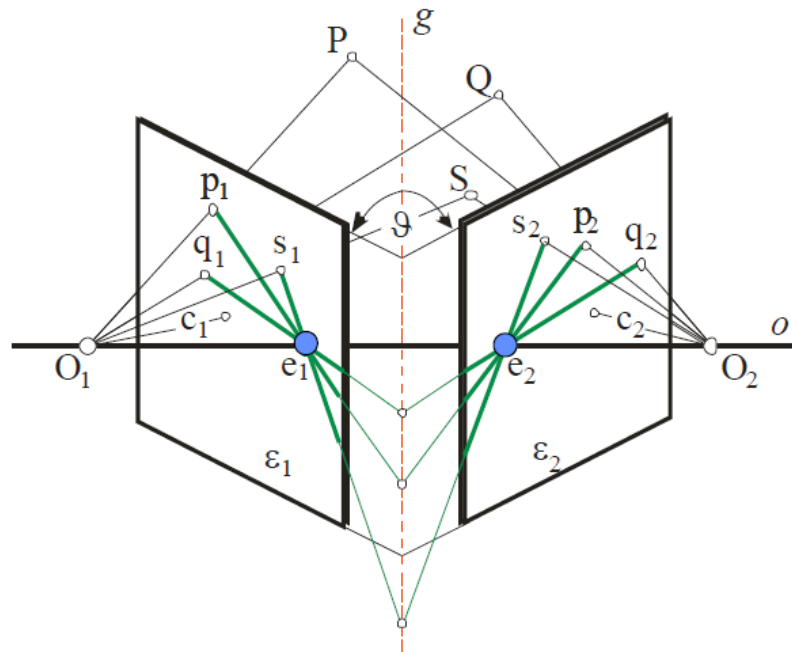
Μετα την αναλυτική περιγραφή των κυριότερων δισδιάστατων και τρισδιάστατων μετασχηματισμών, είναι απαραίτητη η αναφορά στην επιπολική επανασύσταση των εικόνων. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το ουσιαστικότερο βήμα πριν την εφαρμογή των αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης σημείων, αφού μετά τον κατάλληλο προβολικό μετασχηματισμό επιτρέπει την μετατροπή της διαδικασίας εύρεσης ομόλογων σημείων από δισδιάστατο πρόβλημα σε μονοδιάστατο, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα εκτέλεσης των υπολογισμών και περάτωσης του αλγορίθμου.

3.2 Επιπολική Επανασύσταση Επιφανειακών Αισθητήρων (Frame Cameras)

3.3 Επιπολική Γεωμετρία Στερεοζεύγους

Η επιπολική γεωμετρία στερεοζεύγους μπορεί να οριστεί ως εξής:

Κάθε σημείο X του αντικειμένου ορίζει μέσω των προβολικών κέντρων των εικόνων O και O' δύο οπτικές ακτίνες, οι οποίες τέμνουν τα επίπεδα των εικόνων στα αντίστοιχα εικονοσημεία. Η ευθεία της βάσης OO' του στερεοζεύγους, η οποία ορίζεται από τα δύο κέντρα προβολής, τέμνει επίσης τις εικόνες στους πόλους e και e' του ζεύγους. Κάθε μια από τις ομόλογες οπτικές ακτίνες ορίζει, μαζί με την βάση, το *επιπολικό επίπεδο*, το οποίο τέμνει τα επίπεδα των εικόνων στις δύο ομόλογες *επιπολικές ευθείες*. 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. Οι δέσμες αυτές είναι προβολικές, δεδομένου λοιπόν ότι ορίζονται από τομές με αξονική δέσμη επιπέδων (Καλησπεράκης, 2010).

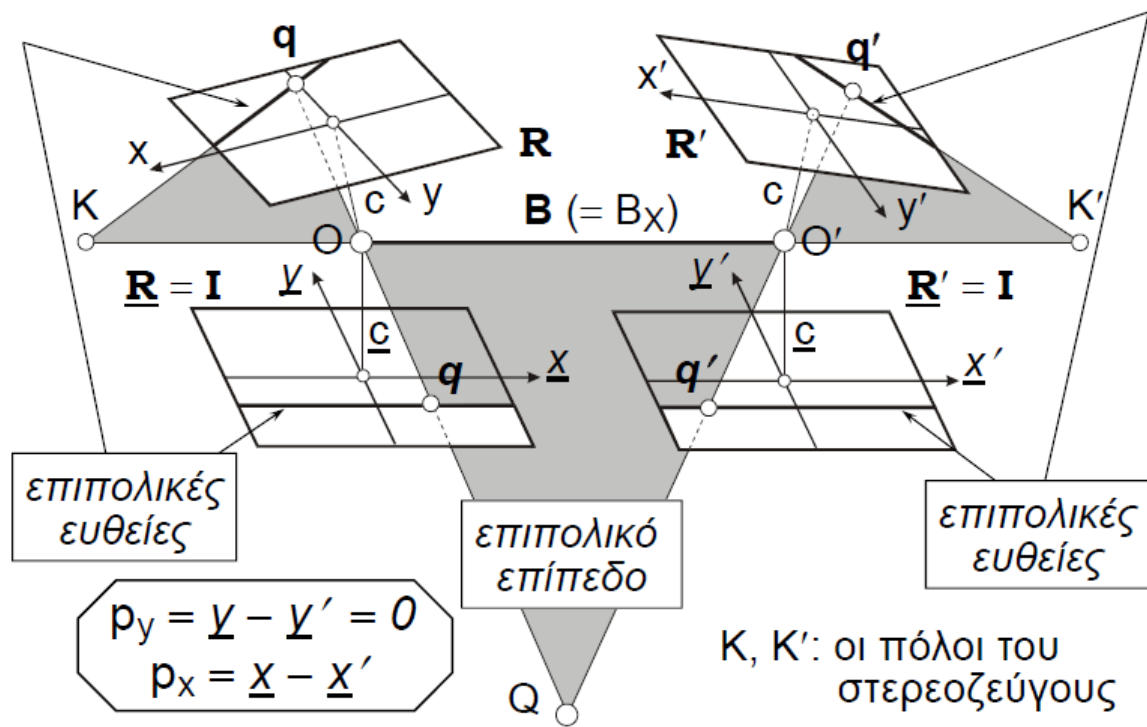


Εικόνα 24 Επιπολική Γεωμετρία Στερεοζεύγους

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση και με βάση την παρουσιαζόμενη γεωμετρία, παρουσιάζονται τα παρακάτω κρίσιμα σημεία:

Επιπολικό επίπεδο e του σημείου P ορίζεται το επίπεδο που περιέχει το P την βάση και τα δύο ομόλογα εικονοσημεία, ενώ επιπολικές ευθείες είναι οι τομές του επιπολικού επιπέδου e με τα επίπεδα των εικόνων. Χαρακτηριστικό της γεωμετρίας είναι ότι το ομόλογο εικονοσημείου κείται επί της επιπολικής ευθείας της άλλης εικόνας. Ανάλογα με την διεύθυνση και στροφή του στερεομοντέλου οι επιπολικές ευθείες μπορούν να έχουν οποιαδήποτε θέση και διεύθυνση στο επίπεδο των εικόνων.

Η επιπολική επανασύσταση είναι η διαδικασία κατά την οποία, μέσω ενός προβολικού μετασχηματισμού, μεταπίπτει το στερεοζεύγος από την τυχαία θέση λήψης, στην κανονική περίπτωση λήψης στερεοζεύγους, δηλαδή $R=I$ και $\Delta Y=\Delta Z=0$ στο σύστημα της βάσης.



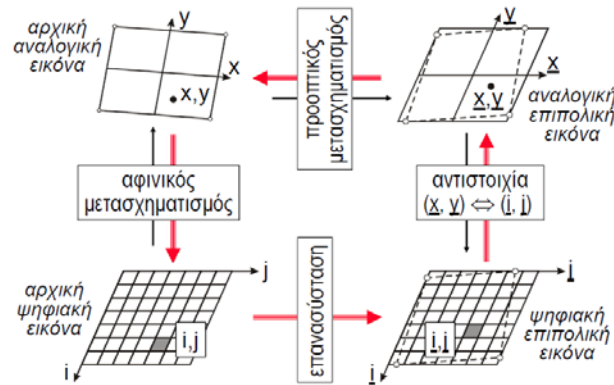
Εικόνα 25 Επιπολική Γεωμετρία Στερεοζεύγους- Κανονικοποίηση(Πηγή: Διαφάνειες Μαθήματος Φωτογραμμετρία ΙΙΙ)

Όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται και στην παραπάνω εικόνα η επιπολική επανασύσταση οδηγεί στην δημιουργία δύο νέων εικόνων με τις επιπολικές τους ευθείες παράλληλες μεταξύ τους και στην βάση λήψης. Αποτέλεσμα αυτής της επανασύστασης είναι τα ομόλογα σημεία του στερεομοντέλου να μπορούν να αναζητηθούν επί ευθείας (1-2 γραμμές pixel), με την χρήση κατάλληλων στατιστικών επεξεργασιών και αλγορίθμων εύρεσης ομολογιών.

3.4 Αλγοριθμική Περιγραφή Επιπολικής Επανασύστασης

Για την πληρέστερη κατανόηση της επιπολικής επανασύστασης σε μηχανές με επιφανειακούς αισθητήρες, δίνεται η παρακάτω αλγοριθμική προσέγγιση. Η επιπολική επανασύσταση επαναλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- α. Κάθε εικόνα μετατρέπεται σε αυστηρά κατακόρυφη με την εφαρμογή του ανάστροφου του πίνακα στροφής για κάθε εικόνα R_1^T, R_2^T .
- β. Οι εικόνες ανάγονται στο σύστημα της βάσης μέσω της κοινής στροφής των εικόνων κατα $R_B = R_0 R_\phi R_K$.
- γ. Η τελική εικόνα προκύπτει μετά απο την εφαρμογή του προβολικού μετασχηματισμού και λήψη τιμών του γκρι (ή του χρώματος) από την αρχική εικόνα, ώστε να προκύψει η διαφορετικού μεγέθους "κανονικοποιημένη" τελική εικόνα.

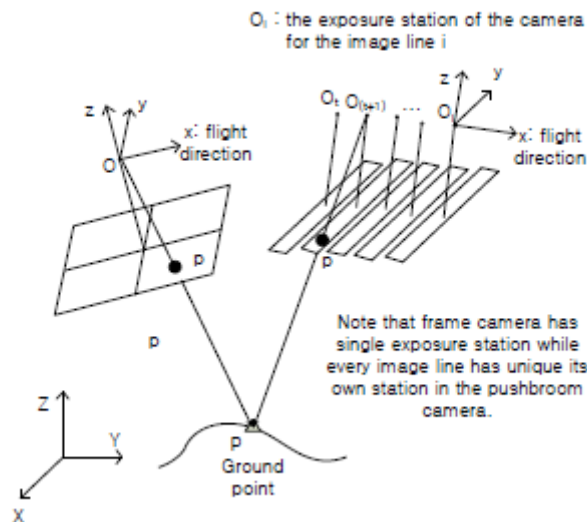


Εικόνα 26 Αλγοριθμική Ανάλυση Επιπολικής επανασύστασης (Πηγή: Διαφάνειες Μαθήματος Φωτογραμμετρία III)

3.5 Επιπολική επανασύσταση Γραμμικών Αισθητήρων (Pushbroom sensors)

Σε αντίθεση με τους επιφανειακούς (frame) αισθητήρες οι οποίοι διαθέτουν δισδιάστατα CCD, οι αισθητήρες pushbroom διαθέτουν λίγες σειρές pixel στον αισθητήρα και η τελική εικόνα προκύπτει από τη συρράφη των μικρότερων εικόνων που δημιουργήθηκαν από διαφορετικές θέσεις λήψης. Αυτή είναι και η κυριότερη διαφορά αφού οι επιφανειακοί αισθητήρες διαθέτουν ένα σημείο λήψης, ενώ η συρραμμένη εικόνα του δορυφορικού αισθητήρα, πολλαπλά σημεία λήψης. Η ιδιομορφία αυτή δημιουργεί πολλαπλά προβλήματα κατά την επιπολική επανασύσταση της τελικής εικόνας, αφού δεν πρόκειται για εφαρμογή της προβολικής γεωμετρίας σε όλο τον αισθητήρα, αλλά είναι απαραίτητη η τμηματική επιπολική επανασύσταση της δορυφορικής εικόνας.

Τα τρία κυριότερα μοντέλα επιπολικής επανασύστασης για αισθητήρες τύπου pushbroom είναι α. το αυστηρό μαθηματικό μοντέλο (rigorous model) β. Το μοντέλο του δισδιάστατου αφινικού μετασχηματισμού (2D Affine) και γ. Το μοντέλο των κλασματικών πολυωνύμων RPC. Και τα τρία αυτά μοντέλα προσπαθούν αναλυτικά να υπολογίσουν την εξίσωση της επιπολικής καμπύλης ώστε να καταστεί δυνατό ο μετασχηματισμός της εικόνας με βάση την επιπολική γεωμετρία.



Εικόνα 27 Επιτολική Γεωμετρία Frame vs Pushbroom

3.5.1 Αυστήρο Μαθηματικό Μοντέλο

Στο αυστηρό μαθηματικό μοντέλο η εξίσωση συγγραμμικότητας παρουσιάζει παρόμοια δομή με αυτήν του επιφανειακού αισθητήρα με την διαφορά ότι στην θέση του x έχει τοποθετηθεί το μηδέν αφού πρόκειται για μονοδιάστατο CCD.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_i M_i \begin{bmatrix} X - X_{L_i} \\ Y - Y_{L_i} \\ Z - Z_{L_i} \end{bmatrix}$$

Εικόνα 28 Συνθήκη Συγγραμμικότητας Pushbroom Sensor

όπου y Η εικονοσυντεταγμένη y κάθετα στην διεύθυνση κίνησης

f Η εστιακή απόσταση

M ο πίνακας στροφής για κάθε σημείο λήψης

λ Το διάνυσμα της κλίμακας

X, Y, Z Οι συντεταγμένες στο έδαφος του σημείου

X_L, Y_L, Z_L Οι συντεταγμένες του σημείου λήψης

Όπως καθίσταται κατανοητό οι παράμετροι λήψης για μια ολόκληρη σκηνή είναι πάρα πολύ για να υπολογιστούν, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση της κίνησης του αισθητήρα. Για τις δορυφορικές σκηνές μπορεί να θεωρηθεί μια ομαλή μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών θέσεων λήψης, η οποία παρουσιάζει μια σχετική σταθερότητα και μπορεί να μοντελοποιηθεί με την χρήση πολυωνύμων. Οι δύο πιο γνωστές μέθοδοι είναι των Guptcha and Hartley(1994) και των Oran and Natarajan(1997).

Στην πρώτη μοντελοποίηση θεωρείται ότι η πλατφόρμα λήψης κινείται σε ευθεία γραμμή με σταθερή ταχύτητα σε σταθερό υψόμετρο και διέπεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$X_{L_i} = X_{L_0} + i\Delta X_{L_1}$$

$$Y_{L_i} = Y_{L_0} + i\Delta Y_{L_1}$$

$$Z_{L_i} = Z_{L_0} + i\Delta Z_{L_1}$$

$$\omega_i = \omega_0$$

$$\phi_i = \phi_0$$

$$\kappa_i = \kappa_0$$

Εικόνα 29 Μοντελοποίηση Πλατφόρμας Λήψης

όπου i η σειρά της εικόνας

X_L, Y_L, Z_L Η θέση της πλατφόρμας λήψης κατα την στιγμή λήψης της γραμμής i

$\omega_i, \phi_i, \kappa_i$ Η γωνίες στροφής της γραμμής i

$X_{L_0}, Y_{L_0}, Z_{L_0}$ Η θέση της πλατφόρμας λήψης κατα την στιγμή λήψης της πρώτης γραμμής

$\omega_0, \phi_0, \kappa_0$ Η γωνίες στροφής της πρώτης γραμμής

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ Η γραμμική μεταβολή της θέσης της πλατφόρμας λήψης

Οι Gurpcha and Hartley (XXXX) απέδειξαν ότι η επιπολικές γραμμές δεν είναι ευθείες αλλά υπερβολικές, από τον υπολογισμό του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα (Fundamental Matrix), επίσης καθόρισαν ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός του πίνακα αυτού από έντεκα ομόλογα σημεία.

Η μοντελοποίηση που πρότειναν οι Uran and Natarajan (1994XXXX) πρότεινε η θέση της πλατφόρμας λήψης καθώς και η γωνία κ (γ_{aw}) να θεωρηθούν πολυώνυμα β' βαθμού, ενώ οι υπόλοιπες στροφές να θεωρηθούν σταθερές.

$$X_{L_i} = X_{L_0} + i\Delta X_{L_1} + i^2\Delta X_{L_2}$$

$$Y_{L_i} = Y_{L_0} + i\Delta Y_{L_1} + i^2\Delta Y_{L_2}$$

$$Z_{L_i} = Z_{L_0} + i\Delta Z_{L_1} + i^2\Delta Z_{L_2}$$

$$\omega_i = \omega_0$$

$$\phi_i = \phi_0$$

$$\kappa_i = \kappa_0 + i\Delta\kappa_1 + i^2\Delta\kappa_2$$

Εικόνα 30 Μοντελοποίηση Πλατφόρμας Λήψης κατα Uran και Natarajan

όπου i η σειρά της εικόνας

X_L, Y_L, Z_L Η θέση της πλατφόρμας λήψης κατα την στιγμή λήψης της γραμμής i

$\omega_i, \phi_i, \kappa_i$ Η γωνίες στροφής της γραμμής i

$X_{L_0}, Y_{L_0}, Z_{L_0}$ Η θέση της πλατφόρμας λήψης κατα την στιγμή λήψης της πρώτης γραμμής

$\omega_0, \phi_0, \kappa_0$ Η γωνίες στροφής της πρώτης γραμμής

$\Delta X_{L1}, \Delta Y_{L1}, \Delta Z_{L1}$ Η γραμμική μεταβολή της θέσης της πλατφόρμας λήψης

$\Delta X_{L2}, \Delta Y_{L2}, \Delta Z_{L2}$ Η δευτεροβάθμια μεταβολή της θέσης της πλατφόρμας λήψης

$\Delta\kappa_1, \Delta\kappa_2$ Ο γραμμικός και ο δευτεροβάθμιος όρος της γωνίας κ

Η μέθοδος αυτή, αν και υπολογιστικά πιο απαιτητική, δίδει καλύτερα αποτελέσματα στην κίνηση της δορυφορικής πλατφόρμας.

Σύμφωνα με τον Kim (Kim et al, 2000) η εξίσωση που περιγράφει την επιπολική καμπύλη δίνεται από τον τύπο, με την χρήση του παραπάνω αυστηρού μαθηματικού μοντέλου είναι:

$$y_r = \frac{A_1 x_l + A_2 y_l + A_3}{(A_4 x_l + A_5 y_l + A_6) \sin Q(x_r) + (A_7 x_l + A_8 y_l + A_9) \cos Q(x_r)}$$

Εικόνα 31 Εξίσωση Επιπολικής Καμπύλης

όπου i η σειρά της εικόνας

X_r, y_r Η εικονοσυντεταγμένη στην δεξιά εικόνα

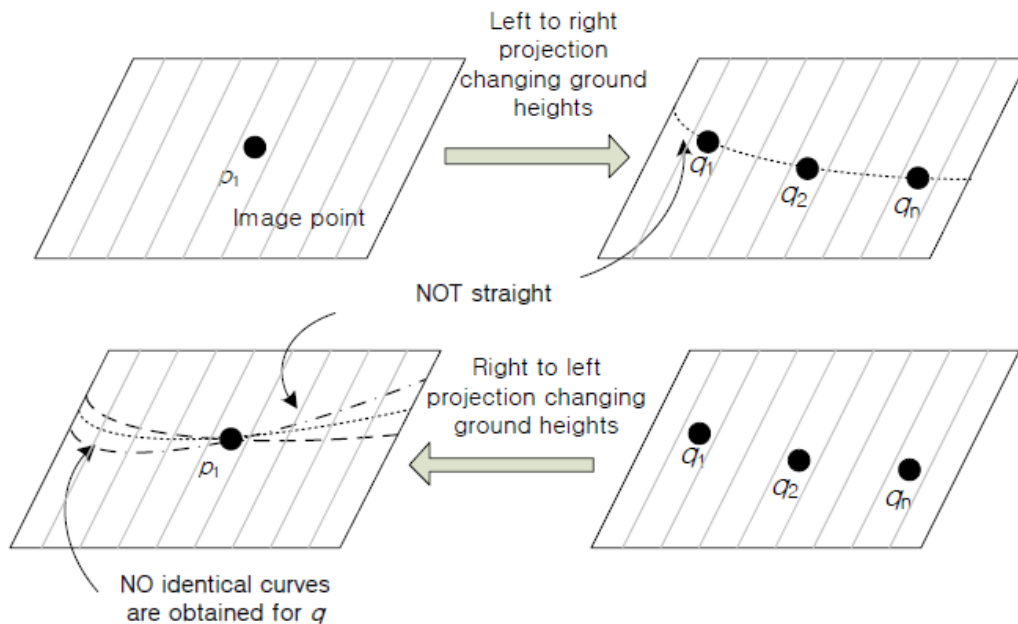
X_l, y_l Η εικονοσυντεταγμένη στην αριστερή εικόνα

A_i Σταθερά για συγκεκριμένη εικονοσυντεταγμένη

$Q(X_r)$ Δευτεροβάθμια εξίσωση του X_r

Από το μοντέλο αυτό και την εξαγόμενη υπερβολική εξίσωση της επιπολικής γραμμής προκύπτει ότι σε αντίθεση με την εξαγόμενη επιπολική γραμμή των Gurtcha and Hartley, αυτή δεν μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση ομόλογων σημείων. Επίσης δεν είναι δυνατή η εύρεση της επιπολικής γραμμής για το σύνολο της σκηνής με αποτέλεσμα να καθίσταται η επιπολική επανασύσταση της εικόνας ιδιαίτερα δυσχερής.

Στην απεικόνιση που ακολουθεί παρουσιάζεται η "επιπολική γραμμή" που αντιστοιχεί στο σημείο της αριστερής εικόνας και η πολλαπλότητα των λύσεων όταν ακολουθείται η ανάστροφη πορεία. Με αποτέλεσμα την αδυναμία εύρεσης της επιπολικής γραμμής.



Εικόνα 32 Επιπολικές Καμπύλες Pushbroom Sensor

3.5.2 Δισδιάστατο Αφινικό Μοντέλο

Για την εφαρμογή του διδιάστατου αφινικού μετασχηματισμού απαιτείται να γίνουν οι παραδοχές της παράλληλης προβολής, της γραμμικής τροχιάς και του σταθερού υψομέτρου. Το μοντέλο της παράλληλης προβολής μπορεί να θεωρηθεί ότι

προσεγγίζει ικανοποιητικά τον δορυφορικό αισθητήρα, αφού παρουσιάζει εύρος πεδίου (FOV) λίγων μοιρών και απόσταση από το αντικείμενο της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων.

Η εξίσωση συγγραμμικότητας με την εφαρμογή των παραδοχών αυτών δίδει τις παρακάτω εξισώσεις:

$$0 = a_{11}(X - X_{L_i}) + a_{12}(Y - Y_{L_i}) + a_{13}(Z - Z_{L_i})$$

$$y = a_{21}(X - X_{L_i}) + a_{22}(Y - Y_{L_i}) + a_{23}(Z - Z_{L_i})$$

$$\lambda_i M_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Εικόνα 33 Εξισώσεις Αφινικού Μοντέλου Επιτολικής Επανασύστασης

όπου

M_i Ο πίνακας στροφής από το σύστημα αναφοράς στο σύστημα της πλατφόρμας λήψης

X, Y, Z Οι επίγειες συντεταγμένες

$X_{L_i}, Y_{L_i}, Z_{L_i}$ Η θέση της πλατφόρμας λήψης κατά την λήψη της γραμμής i

i Ο αριθμός της γραμμής σάρωσης

λ_i Το διάνυσμα της κλίμακας

Χρησιμοποιώντας την πρώτη εξίσωση και το μοντέλο των Guptcha and Hartley και λύνοντας ως προς τον αριθμό της γραμμής i προκύπτει

$$i = \frac{a_{11}(X - X_{L_0}) + a_{12}(Y - Y_{L_0}) + a_{13}(Z - Z_{L_0})}{a_{11}\Delta X_{L_i} + a_{12}\Delta Y_{L_i} + a_{13}\Delta Z_{L_i}}$$

Εικόνα 34 Εξίσωση Μοντέλου Guptcha Hartley

και αντικαθιστώντας την γραμμή του αισθητήρα i με x προκύπτει το τελικό αφινικό μοντέλο σύμφωνα με την σχέση:

$$x = A_1X + A_2Y + A_3Z$$

$$y = A_4X + A_5Y + A_6Z$$

Από το αφινικό αυτό μοντέλο ο Ono (Ono et al. 1999) εξήγαγε την εξίσωση της επιτολικής γραμμής, η οποία υπολογίζει τις επιτολικές γραμμές ως ευθείες και μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση ομόλογων σημείων

$$y_r = C_1X_r + C_2Y_r + C_3Y_l + C_4$$

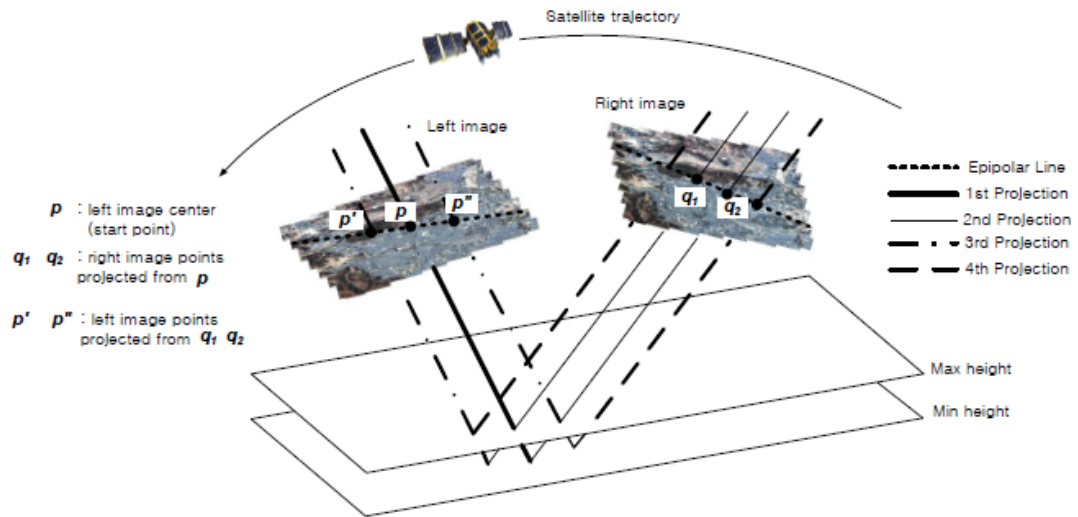
Οφείλεται να τονιστεί ότι, το μοντέλο του δισδιάστατου αφινικού μετασχηματισμού δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις δορυφορικών πλατφορμών που παρουσιάζουν είτε χαμηλό υψόμετρο πτήσης, είτε μεγάλο εύρος σάρωσης. Με αποτέλεσμα η χρήση του να συνιστάται κατόπιν διερεύνησης των χαρακτηριστικών της πλατφόρμας λήψης και επιβεβαίωσης ότι πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις.

3.5.3 Κλασματικά Πολυώνυμα RPC

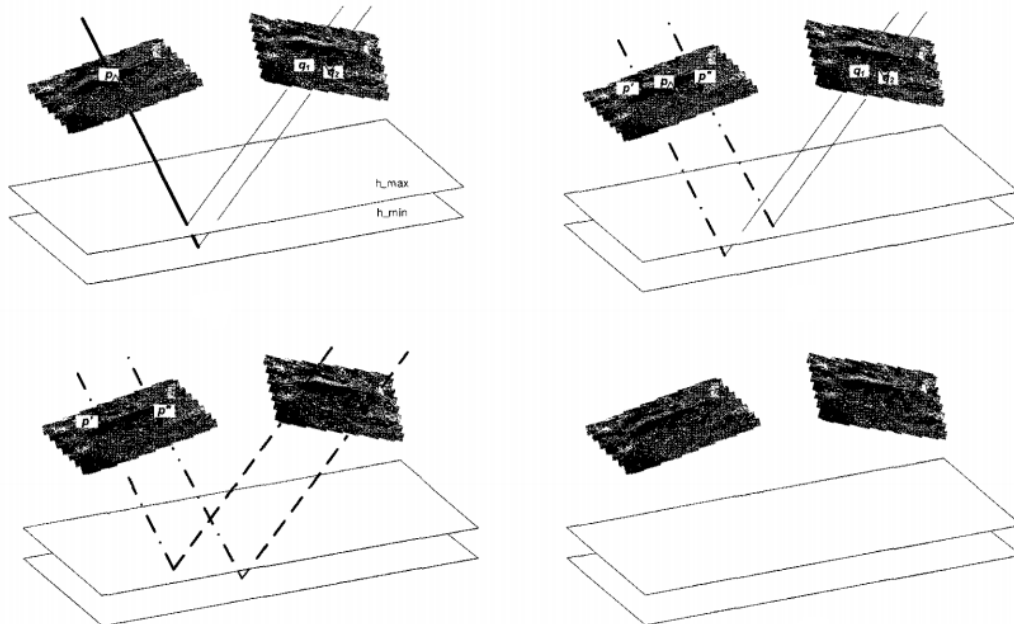
Για την μοντελοποίηση του προσανατολισμού των δορυφορικών εικόνων συχνά αντί του αυστηρού μαθηματικού μοντέλου (rigorous model) χρησιμοποιείται το μοντέλο των κλασματικών πολυωνύμων, το οποίο προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική κατάσταση. Κατα τα γνωστά, τα πολυώνυμα RPC αποτελούν έναν μετασχηματισμό μεταξύ του χώρου της εικόνας και του τρισδιάστατου πραγματικού χώρου, τα οποία είναι εξαιρετικά χρήσιμα και προοδευτικά συχνότερα χρησιμοποιούμενα, αφού οι πάροχοι των δορυφορικών εικόνων τα χορηγούν αντί του αυστηρού μαθηματικού μοντέλου.

Η κλασματική μορφή των πολυωνύμων RPC συναντάται συνήθως με την αντίστοιχη των γεωδαιτικών συντεταγμένων στις εικονοσυντεταγμένες. Το αντίστροφο πρόβλημα (δηλαδή απο τις γεωδαιτικές συν/νες στις εικονοσυντεταγμένες) μπορεί να επιλυθεί εφόσον είναι γνωστό το υψόμετρο των σημείων (Grodecki et al. 2004). Για την επίτευξη του σκοπού αυτού είναι απαραίτητη η γραμμικοποίηση των σχέσεων με την χρήση των πολυωνύμων Taylor.

Η δυνατότητα χρήσης των πολυωνύμων RPC τόσο στον ευθύ όσο και στον αντίστροφο μετασχηματισμό είναι απαραίτητη για την περιγραφή της διαδικασίας σχηματισμού των επιπολικών γραμμών. Σύμφωνα με τον Oh (Oh et al. 2010) για την εύρεση των επιπολικών γραμμών λαμβάνεται το κεντρικό σημείο p της αριστερής εικόνας και βρίσκονται με την χρήση των πολυωνύμων RPC και για το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος της σκηνής, τα αντίστοιχα σημεία στην δεξιά εικόνα q_1 και q_2 . Στην συνέχεια τα δύο αυτά σημεία επαναπροβάλλονται στην αριστερή εικόνα και προκύπτουν τα p' και p'' . Έτσι αντιστοιχίζεται η επιπολική γραμμή $p'p''$ με την q_1q_2 της δεξιάς εικόνας. Η ίδια διαδικασία λειτουργεί επαναληπτικά μέχρι να προκύψει ένα σημειοσύνολο το οποίο αποτελεί την επιπολική καμπύλη, σύμφωνα με όσα απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Αν επιλεγεί να δημιουργηθεί η αντίστοιχη επιπολική γραμμή για μικρά τμήματα της εικόνας, τότε παρατηρείται ουσιαστικά η ευθυγραμμία της, για το δωθέν εύρος της υψομετρικής διαφοράς. Επομένως είναι δυνατή η ένωση των τμημάτων αυτών για την δημιουργία της τελικής καμπύλης. Στην συνέχεια αφού δημιουργηθούν οι αντίστοιχες επιπολικές καμπύλες με την εφαρμογή ενός δευτεροβάθμιου πολυωνυμικού μετασχηματισμού (Oh et al. 2011) προκύπτει η τελική εικόνα με την ορθή επιπολική επανασύσταση.



Εικόνα 35 Εύρεση Ομολογιών σε pushbroom sensors



Εικόνα 36 Επιτολικές Γραμμές σε pushbroom sensors

4. Μέτρα Ομοιότητας Πυκνής Συνταύτισης Σημείων (Dense Image Matching Similarity Measures)

Με την επιπολική επανασύσταση της δορυφορικής σκηνής έχει επιτευχθεί η κατάλληλη γεωμετρία για την εφαρμογή αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης σημείων, δηλαδή η δυνατότητα μονοδιάστατης αναζήτησης των ομόλογων σημείων. (1d matching).

4.1 Εισαγωγή- Επιβολή Δεσμεύσεων

Για την επίτευξη της πυκνής συνταύτισης σημείων είναι απαραίτητη κατά την εφαρμογή των αλγορίθμων η ύπαρξη δεσμεύσεων, οι οποίες διευκολύνουν την εκτέλεση των αλγοριθμικών υπολογισμών. Αρχικά η επιπολική δέσμευση η οποία αναλύθηκε προηγουμένως αποτελεί το απαραίτητο βήμα για την εκτέλεση του συνόλου των αλγορίθμων που θα αναλυθούν μετέπειτα. Επίσης η αριστερή-δεξιά συνέπεια (right-left consistency) (Stentoumis et al, 2012) η οποία υποδεικνύει ότι το δημιουργούμενο dsm (χάρτης βάθους), που θα σχηματιστεί από την αριστερή εικόνα ως εικόνα αναφοράς δεν θα διαφέρει σημαντικά από αυτό που θα δημιουργηθεί από την δεξιά εικόνα, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση. Η δέσμευση αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τον εντοπισμό αποκρύψεων λόγω αναγλύφου.

$$D_{map}^{base}(p) = D_{map}^{match} \left(p - \left[D_{map}^{base}(p), 0 \right] \right)$$

Εικόνα 37 Εξίσωση Δεσμεύσεων

Με την δέσμευση διάταξης (ordering constraint), εξασφαλίζεται ότι η σειρά με την οποία τα σημεία προβάλλονται πάνω στην επιπολική ευθεία, είναι ίδια και για τις δύο εικόνες, υπό την προϋπόθεση ότι τα αντικείμενα δεν παρουσιάζουν ασυνέχειες. Επίσης με την χρήση της δέσμευσης ομοιότητας εξασφαλίζεται ότι τα ομόλογα σημεία παρουσιάζουν ίδιες τιμές φωτεινότητας, γεγονός που μπορεί να μην είναι πάντα ακριβές αφού οι συνθήκες λήψης των εικόνων μπορεί να διαφέρουν. Τέλος εξαιρετικά σημαντική είναι η δέσμευση ομαλότητας (smoothness constraint), σύμφωνα με την οποία οι τιμές φωτεινότητας των αντικειμένων μεταβάλλονται σταδιακά και ομαλά, με αποτέλεσμα γειτονικά εικονοστοιχεία να παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές φωτεινότητας. Στην συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση των κυριότερων μεθόδων πυκνής συνταύτισης.

4.2 Μέθοδος των Απολύτων και των Τετραγωνικών Διαφορών

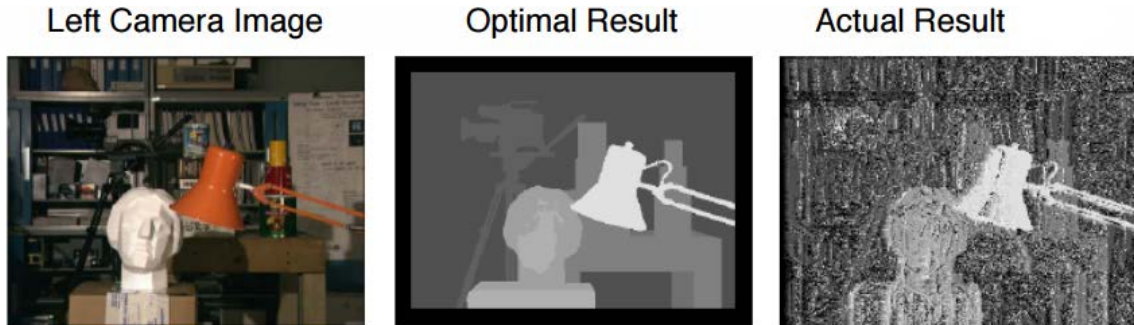
Αποτελεί την απλούστερη μέθοδο εύρεσης συσχέτισης (matching), σύμφωνα με την οποία αναζητείται στην δεξιά εικόνα εκείνο το εικονοστοιχείο με την μικρότερη παράλλαξη (disparity). Το εικονοστοιχείο που θα επιλεγεί είναι εκείνο με την μικρότερη διαφορά έντασης είτε ως απόλυτη διαφορά είτε ως τετράγωνο της προκύπτουσας διαφοράς.

$$|I_L(x, y) - I_R(x, y)|$$

$$(I_L(x, y) - I_R(x, y))^2$$

Εικόνα 38 Εξίσωση Απολύτων Διαφορών

Το αποτέλεσμα που προκύπτει με την χρήση των πρότυπων δεδομένων του πανεπιστημίου του Middlebury έχει την παρακάτω μορφή.



Εικόνα 39 Αποτελέσματα Υπολογισμών

Όπως παρατηρείται, το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα κακό και θορυβώδες, με αποτέλεσμα την αναζήτηση αποτελεσματικότερων μεθόδων συνταύτισης.

4.3 Μέθοδος του αθροίσματος των Απολύτων και των Τετραγωνικών Διαφορών.

Αντί της επιλογής σύγκρισης των τιμών φωτεινότητας εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο, είναι αποτελεσματικότερη η χρήση ενός παραθύρου αναφοράς και ενός παραθύρου αναζήτησης. Με δεδομένη την υπόθεση ότι τα ομόλογα σημεία (pixel), διαθέτουν όμοιες τιμές έντασης, αναζητείται εκείνο το παράθυρο στην δεξιά εικόνα, το οποίο παρουσιάζει το μικρότερο κόστος συσχέτισης εντός του συγκεκριμένου παραθύρου αναφοράς, σύμφωνα με τις σχέσεις.

$$\sum_{(x,y) \in W} |I_R(x, y) - I_L(x + d, y)|$$

$$\sum_{(x,y) \in W} (I_R(x, y) - I_L(x + d, y))^2$$

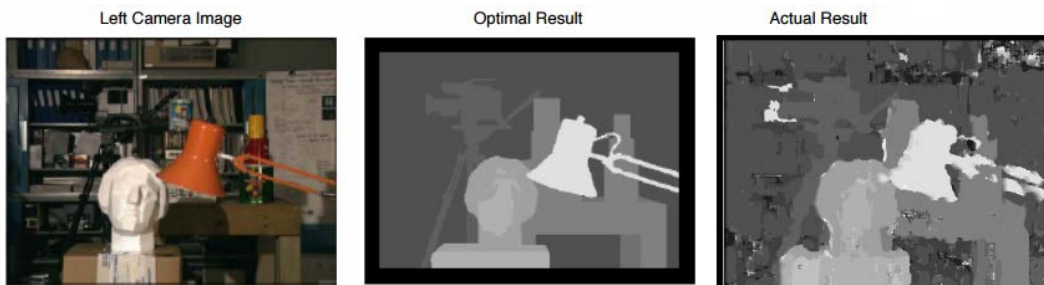
Εικόνα 40 Εξισώσεις Αθροίσματος Διαφορών

Η επιλογή του μεγέθους του παραθύρου αναφοράς αποτελεί κρίσιμο παράγοντα κατά την διαδικασία συνταύτισης. Αν επιλεγεί μικρό παράθυρο τότε κατά την συνταύτιση παρουσιάζεται μεγαλύτερος βαθμός λεπτομέρειας αλλά ταυτόχρονα και περισσότερος θόρυβος, αντίθετα με την επιλογή ενός μεγαλύτερου παραθύρου επιτυγχάνεται

λιγότερος θόρυβος αλλά και απώλεια ενός αρκετά μεγάλου βαθμού λεπτομέρειας. Επιπλέον στα προβλήματα της τεχνικής αυτής θα πρέπει να προστεθεί:

- Η υπόθεση σταθερού βάθους σε όλο το παράθυρο, γεγονός που παραβιάζεται σε περιοχές με ασυνέχειες βάθους,
- Οι περιοχές με επαναλαμβανόμενη δομή και με ομοιόμορφη δομή, οι οποίες δίδουν πολλαπλές λύσεις.
- Οι μορφές εντός των εικόνων που έχουν μέγεθος μικρότερο από το παράθυρο αναζήτησης, και οι οποίες εξαφανίζονται απο τον χάρτη βάθους.

Τα αποτελέσματα που βασίζονται στις μεθόδους επιφανειακής συνταύτισης παρουσιάζουν σχετικά καλά αποτελέσματα και το μικρό τους υπολογιστικό κόστος τα κάνει κατάλληλα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, οι οποίες δεν παρουσιάζουν μεγάλες απαιτήσεις σε ακρίβεια και ορθότητα.



Εικόνα 41 Αποτελέσματα Αλγορίθμου

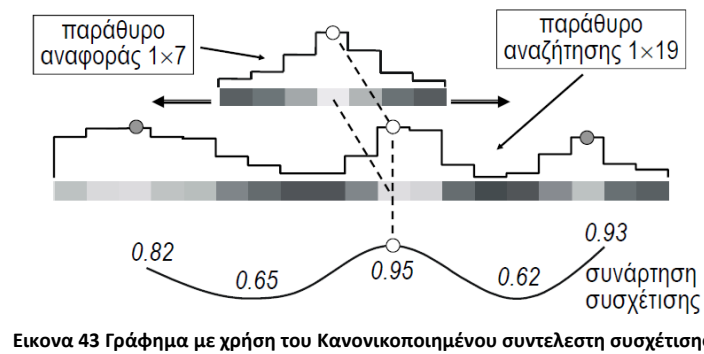
4.4 Μέθοδος του Συντελεστή Συσχέτισης

Στην μέθοδο αυτή γίνεται χρήση του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης (Normalized Cross Correlation-NCC), ο οποίος αποτελεί την κανονικοποιημένη έκφραση της συμμεταβλητότητας (αφαίρεση μέσου όρου και αναγωγή στις τυπικές αποκλίσεις). Μια μαθηματική έκφραση του τύπου δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{\sum_{j=1}^N (g_1(i) - \bar{g}_1)(g_2(i) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (g_1(i) - \bar{g}_1)^2 \sum_{j=1}^N (g_2(i) - \bar{g}_2)^2}}$$

Εικόνα 42 Εξίσωση Κανονικοποιημένου συντελεστη συσχέτισης

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές απο 0 εως 1 και η απόλυτη συνταύτιση μεταξύ δύο εικόνων θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί εφόσον ο συντελεστής λάβει τιμή 1 (μέγιστη συσχέτιση). Μετά την εφαρμογή της επιπολικής επανασύστασης στις εικόνες, η συσχέτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί ταχύτερα, όπως εποπτικά παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 43 Γράφημα με χρήση του Κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης

4.5 Μέθοδος της Αμοιβαίας Πληροφορίας (MI)

Η μέθοδος της αμοιβαίας πληροφορίας εξαρτάται από την εντροπία και την αμοιβαία εντροπία των τυχαίων μεταβλητών, δηλαδή των εικονοστοιχείων που αποτελούν την εικόνα. Αν υποθεθεί ότι οι τιμές έντασης των εικονοστοιχείων X είναι διακριτές τυχαίες μεταβλητές με διακριτή πυκνότητα P , τότε η εντροπία ορίζεται ως:

$$H(X) \triangleq -E_X[\log(P(X))]$$

Εικόνα 44 Εξίσωση Εντροπίας Μεθόδου Αμοιβαίας Πληροφορίας

Μια χαμηλή τιμή εντροπίας σημαίνει ότι η μέση πιθανότητα για ένα συγκεκριμένο σετ τυχαίων μεταβλητών (περιοχή) είναι χαμηλή, χαρακτηριστική είναι η περίπτωση ομοιογενών σε υφή περιοχών, οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλή εντροπία.

Αντίστοιχα η αμοιβαία εντροπία των τυχαίων μεταβλητών X, Y ορίζεται ως το μέτρο της ευθυγράμμισης ή ομοιότητας, το οποίο περιγράφει τον "κυματισμό" (crispness) της συνάρτησης πιθανότητας. Δύο ευθυγραμμισμένες περιοχές, όπως και δύο ομοιογενείς περιοχές θα έχουν χαμηλή τιμή εντροπίας. Για την αποφυγή μη χρήσιμων συσχετισμών είναι αναγκαίος ο ορισμός του μέτρου της αμοιβαίας πληροφορίας, σύμφωνα με την σχέση.

$$\begin{aligned} MI(X, Y) &\triangleq E_{X, Y} \left[\log \left(\frac{P(X, Y)}{P(X)P(Y)} \right) \right] \\ &\triangleq H(X) + H(Y) - H(X, Y) \end{aligned}$$

Εικόνα 45 Εξίσωση Ορισμού Μέτρου Αμοιβαίας Πληροφορίας

Η αμοιβαία πληροφορία των X, Y παίρνει τιμές μεταξύ του μηδενός και της ελάχιστης των $MI(X, X)$ και $MI(Y, Y)$. Όταν λαμβάνει την μηδενική τιμή, οι συσχετιζόμενες περιοχές είναι τελείως ανεξάρτητες (no matching), ενώ όταν λαμβάνει την μέγιστη τιμή οι περιοχές είναι πανομοιότυπες και υφίσταται μια ένα προς ένα αντιστοιχία μεταξύ των διακριτών τυχαίων μεταβλητών (pixels).

Για να υπολογιστεί η αμοιβαία πληροφορία MI για τις δύο εικόνες, πρέπει να υπολογιστεί η συνάρτηση πιθανότητας και για τις δύο εικόνες, με την χρήση του ιστογράμματος κάθε εικόνας. Με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής σε έναν κλασικό αλγόριθμο στέρεο-συσχέτισης, μετράται εντός της περιοχής αναφοράς το μέτρο του MI και με διαδοχικές μετακινήσεις επιτυγχάνεται η συνταύτιση των περιοχών στις οποίες το μέτρο παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή.

Επειδή η διαδικασία υπολογισμού του MI είναι υπολογιστικά αρκετά ακριβή, η χρήση αλγορίθμων με μεγάλα παράθυρα αναζήτησης δεν ενδείκνυται, αφού όχι μόνο κοστίζει υπολογιστικά, αλλά εξομαλύνει και περιοχές με ασυνέχειες ανομοιότητας βάθους.

5. Αλγόριθμοι Υπολογισμού Κόστους Συσχετισης

5.1 Τοπικός Αλγόριθμος

Στην μέθοδο αυτή δίδεται έμφαση στον υπολογισμό του κόστους συσχέτισης και της ακολουθίας ενεργειών για την εύρεση του συνολικού κόστους συσσωμάτωσης. Σημαντική διαφορά του παραπάνω αλγορίθμου είναι ότι η μοναδικότητα του σημείου εξασφαλίζεται στην εικόνα αναφοράς, ενώ στην εικόνα αναζήτησης μπορεί να υπάρξουν πολλαπλά σημεία, με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται στην χρήση των παραθύρων αναζήτησης και αναφοράς αντίστοιχα.

Υπολογίζονται τα κόστη συσχέτισης για όλα τα εικονοστοιχεία που συμμετέχουν στο παράθυρο αναζήτησης και αυτό με την μικρότερη τιμή λαμβάνει και την τελική τιμή στον χάρτη βάθους (disparity map). Η επιλογή του μεγέθους του παραθύρου αναζήτησης έχει διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά στον θόρυβο και στην αντιμετώπιση των ασυνεχειών βάθους και των αποκρύψεων στην εικόνα, όπως αναλυτικά αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο.

5.2 Καθολικός Αλγόριθμος

Οι καθολικοί αλγόριθμοι εκτελούν βελτιστοποίηση με την χρήση επαναληπτικών βημάτων, με σκοπό όχι την εύρεση παραλλάξεων με βάση τα εικονοστοιχεία στο παράθυρο αναζήτησης, αλλά με την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους σε όλη την εικόνα, σύμφωνα με την σχέση:

$$E(d) = E_d(d) + \lambda E_s(d).$$

Εικόνα 46 Εξίσωση Συνάρτησης Κόστους

όπου ο όρος $E_d(d)$ μετρά πόσο καλά η συνάρτηση ανομοιότητας βάθους (παραλλάξης) συμφωνεί με το ζευγάρι των εικόνων. Ο όρος ομαλότητας $E_s(d)$ ενσωματώνει την υπόθεση ομαλότητας κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου του, η οποία διατυπώνεται σε μορφή σχέσης με την ενσωμάτωση μόνο των γειτονικών εικονοστοιχείων ως εξής:

$$E_s(d) = \sum_{(x,y)} \rho(d(x,y) - d(x+1,y)) + \rho(d(x,y) - d(x,y+1)),$$

Εικόνα 47 Εξίσωση Όρου Ομαλότητας

Στη σχέση αυτή το ρ είναι η μονοτονικά αυξανόμενη συνάρτηση της διαφοράς ανομοιότητας βάθους.

Αν χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες περιοχές τότε τα ορία των περιοχών αποτυπώνονται καλύτερα. Αν το ρ περιγραφεί με την μορφή δευτεροβάθμιας εξίσωσης, τότε η

ανομοιότητα βάθους γίνεται παντού ομαλή και οδηγεί σε μη αποδεκτά αποτελέσματα. Οι συναρτήσεις ενέργειας που δεν παρουσιάζουν αυτή την μορφή των προβλημάτων καλούνται "Συναρτήσεις διατήρησης ασυνεχειών".

Ο όρος Esmooth (E_s) μπορεί επίσης να εξαρτάται από τις διαφορές έντασης σύμφωνα με την σχέση.

$$\rho_d(d(x, y) - d(x+1, y)) \cdot \rho_I(\|I(x, y) - I(x+1, y)\|)$$

Εικόνα 48 Εξίσωση Συνάρτησης Ομαλότητας

όπου ρ_1 είναι μια γνησίως φθίνουσα συνάρτηση διαφορών έντασης, η οποία μειώνει τα κόστη ομαλότητας σε παραγώγους υψηλής έντασης. Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει την ύπαρξη ασυνεχειών σε περιοχές με χρωματικές ακμές, δίνοντας έτσι καλή απόδοση στους καθολικούς αλγορίθμους.

5.3 Ημικαθολικός Αλγόριθμος

Ο ημικαθολικός αλγόριθμος προσπαθεί να συνδυάσει την ικανότητα των τοπικών αλγορίθμων για ικανοποιητικό υπολογισμό των ορίων των αντικειμένων, με μια συνάρτηση ελαχιστοποίησης ενέργειας για την βελτίωση των αποτελεσμάτων και την αποφυγή του θορύβου των τοπικών μεθόδων. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε ζευγάρια εικόνων με γνωστό εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό και μετά από επιπολική επανασύσταση, με την επενέργεια μιας καθολικής δέσμησης, η οποία συνδυάζει κόστη συσχέτισης μεταξύ γραμμών σε διάφορες διευθύνσεις στην εικόνα.

Οι πρώτες τεχνικές για χρήση των συναρτήσεων ελαχιστοποίησης κόστους κατά την γραμμική σάρωση ήταν ιδιαίτερα επιρρεπείς σε λάθη, και επειδή το βέλτιστο κατά γραμμή δεν είχε συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων γραμμών σάρωσης, τα αποτελέσματα δεν ήταν τα επιθυμητά. Με την χρήση όμως των συμμετρικών γραμμών σάρωσης σε περισσότερες από μια διευθύνσεις τα αποτελέσματα βελτιώνονται αισθητά.

Με γνωστή την ανομοιότητα βάθους, το κόστος για κάθε διεύθυνση αθροίζεται και η τιμή αυτή υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο. Τελικά ο αλγόριθμος επιλέγει το συνταυτισμένο εικονοστοιχείο με το μικρότερο κόστος, συνήθως με την χρήση δυναμικού προγραμματισμού.

Το κόστος μπορεί να περιγραφεί με την χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$\begin{aligned} L_r'(p, d) = & C(p, d) + \min(L_r(p-r, d), \\ & L_r(p-r, d-1) + P1 \\ & L_r(p-r, d+1) + P2 \\ & L_r(p-r, d-1) + P2 \\ & \min_i L_r(p-r, i) + P2 - \min_k L_r(p-r, k) \end{aligned}$$

όπου ο πρώτος όρος είναι το κόστος ομοιότητας (μια τιμή που "βάζει πρόστιμο" σε λύσεις όπου οι ραδιομετρικές τιμές είναι διαφορετικές στα αντίστοιχα εικονοστοιχεία-σημεία). Ο δεύτερος όρος αξιολογεί την κανονικότητα του πεδίου ανομοιοτήτων

(disparity field) και βάζει ένα μικρό πρόστιμο P1 για μικρές αλλαγές και ένα πρόστιμο P2 για μεγαλύτερες αλλαγές σε σχέση με το προηγούμενο σημείο κατά μήκος της γραμμής συνταύτισης. Οι δύο αυτοί όροι επιτρέπουν να περιγραφούν καμπύλες επιφάνειες και να διατηρηθούν οι ασυνέχειες αντίστοιχα. Τέλος επειδή κατά μήκος της γραμμής το κόστος συσσωμάτωσης αυξάνει, ο τελευταίος όρος χρησιμοποιείται για να μειώσει την τελική τιμή με την αφαίρεση του ελάχιστου κόστους του προηγούμενου εικονοστοιχείου. Το συνολικό κόστος υπολογίζεται από το συνδυασμό πολλαπλών γραμμών σάρωσης σε όλες τις διευθύνσεις συμμετρικά με το ελάχιστο κόστος για κάθε εικονοστοιχείο p . Για την επίτευξη υποψηφιακής ακρίβειας κατά τον υπολογισμό της ανομοιότητας βάθους, το ελάχιστο βρίσκεται με την προσαρμογή μιας δευτεροβάθμιας καμπύλης λαμβάνοντας υπόψη τα γειτονικά εικονοστοιχεία.

6. State of the Art

6.1 Εφαρμογή Αλγορίθμου SGM σε δορυφορικές εικόνες - Γενικά

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ) από δορυφορικές εικόνες μπορεί να αποτελέσει μια πολυπαραγοντική διαδικασία με αρκετά αλγοριθμικά βήματα, προς το τελικό προϊόν. Η διαδικασία μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύρια βήματα. Το πρώτο βήμα αφορά στην επιπολική επανασύσταση των δορυφορικών εικόνων. Διαδικασία η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τις τεχνικές που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3 και οι οποίες περιλαμβάνουν την χρήση κλασματικών πολυωνύμων RPC, την χρήση του δισδιάστατου αφινικού μοντέλου και την χρήση του αυστηρού μαθηματικού μοντέλου του δορυφόρου. Συνηθέστερη είναι η χρήση των κλασματικών πολυωνύμων RPC για την εκτέλεση της επανασύστασης, αφού πλέον οι πάροχοι των δορυφορικών δεδομένων, όλο και συχνότερα χορηγούν κλασματικά πολυώνυμα με την δορυφορική σκηνή και όχι το αυστηρό μαθηματικό μοντέλο του δορυφόρου. Επίσης στην περίπτωση της χορήγησης περισσότερων των δύο δορυφορικών εικόνων, απαιτείται η επιπολική επανασύσταση κατά ζεύγη και η μετέπειτα εφαρμογή του αλγορίθμου πυκνής συνταύτισης. Από κάθε επιπολικό δορυφορικό ζεύγος θα προκύψει μια τιμή για το ΨΜΕ και με την διαδικασία την συγχώνευσης θα προκύψει το τελικό ζητούμενο προϊόν.

Το δεύτερο βήμα, αυτό της πυκνής συνταύτισης, αποτελεί μια υπολογιστικά δαπανηρή διαδικασία και απαιτεί την όσο το δυνατόν βέλτιστη επιπολική επανασύσταση, ώστε οι γραμμές σάρωσης να συμπίπτουν το δυνατόν περισσότερο. Οι δορυφορικοί αισθητήρες όμως με την χρήση τεχνολογίας pushbroom, έχουν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά για κάθε γραμμή σάρωσης με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαία η συνόρθωση του συνολού των 2 ή περισσότερων δορυφορικών σκηνών σε ένα κοινό πλαίσιο με την χρήση της συνόρθωσης κατά δέσμες και η βελτίωση της εσωτερικής και της εξωτερικής ακρίβειας του μπλόκ με την χρήση φωτοσταθερών αλλά και σημείων σύνδεσης σε όλη την επιφάνεια της σκηνής. Η διαδικασία αυτή επιλύει τον αεροτριγωνισμό με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα και επιτρέπει την αποτελεσματικότερη λειτουργία του αλγορίθμου semi global matching.

6.2 Εφαρμογή του Αλγόριθμου σε Δορυφορικές Εικόνες

6.2.1 Εφαρμογή του Αλγόριθμου με την χρήση του λογισμικού ERDAS IMAGINE

6.2.1.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονοι δορυφορικοί αισθητήρες παρουσιάζουν δυνατότητες πολύ υψηλής χωρικής και ραδιομετρικής ανάλυσης (έως και 30cm). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την χρήση της στερεοσκοπικής κάλυψης μιας περιοχής παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα αφενός της κάλυψης πολύ μεγάλης εδαφικής περιοχής, αφετέρου της πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης. Η εκτέλεση του αλγορίθμου semi global matching σε δορυφορικές σκηνές stereo ή tri-stereo έχει ως αποτέλεσμα ένα πολύ υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατο νέφος σημείων το οποίο παρέχει υψομετρική πληροφορία ποιότητας παρόμοιας με αυτό που προέρχεται από δεδομένα lidar, τα οποία παρουσιάζουν πολλαπλάσιο κόστος κτήσης και δυσχέρειες απόκτησης με την επιθυμητή συχνότητα.

Τα παραγόμενα προϊόντα από την χρήση του παραπάνω αλγορίθμου μπορούν να είναι ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων με τιμές RGB ή ένα 2.5d τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας. Ο παραπάνω αλγόριθμος παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα στην εκτέλεση της τρισδιάστατης εξαγωγής σημείων από εικόνες σε σχέση με τους μέχρι τώρα αλγορίθμους (Hirschmuller et al. 2008), όπως είναι οι αλγόριθμοι με χρήση των απόλυτων διαφορών, του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης ή την μέθοδο της αμοιβαίας πληροφορίας.

6.2.1.2 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης αφορά στο νησί της Αντιπάρου με διαστάσεις 15x12 km, είναι ένα νησί που ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων και παρουσιάζει υψομετρικές διακυμάνσεις από 0 έως 300m περίπου. Το νησί καλύπτεται με χαμηλή βλάστηση και παρουσιάζει μικρή έως μέτρια οικιστική ανάπτυξη. Η τοπογραφία του εδάφους παρουσιάζει ομαλό ανάγλυφο, με μικρές κλίσεις και ήπιες αλλαγές αναγλύφου. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αποτελούν το ιδανικό πεδίο εφαρμογής για τον αλγόριθμο semi global matching αφού έχει παρουσιάσει εξαιρετικά αποτελέσματα σε περιοχές ομαλού αναγλύφου.

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες τύπου pleiades tri-stereo. Η περιοχή ενδιαφέροντος έχει αποτυπωθεί με τρεις διαδοχικές λήψεις, η πρώτη αποτελεί την εμπρόσθια λήψη (forward), η δεύτερη την ναδικική (nadir) και η τρίτη την οπίσθια (backward) κατά μήκος της τροχιάς κίνησης (along track). Επίσης πραγματοποιήθηκε η εκτέλεση των υπολογισμών με την χρήση του παγχρωματικού αισθητήρα, διότι παρουσιάζει την μεγαλύτερη χωρική ανάλυση (0.7 μ GSD-εδαφοψηφίδα) σε συνδυασμό με την δυνατότητα ευκολότερης μοντελοποίησης και

εκτέλεσης του αλγορίθμου σε ένα φασματικό κανάλι. (Σε σχέση με τα τρία φασματικά κανάλια που παρουσιάζει η κλασική RGB απεικόνιση).

	Incidence angle			
	Across	Along	Overall	Result
IMG_PHR1B_P_201304090912398_SEN_629327101-001_R1C1	6,4552812	1,6418372	6,6573988	Forward
IMG_PHR1B_P_201304090912253_SEN_629326101-001_R1C1	8,4160403	-7,0818932	10,9345950	Nadir
IMG_PHR1B_P_201304090912163_SEN_629325101-001_R1C1	9,6055214	-12,3947456	15,5028875	Backward

Πίνακας 1 Γωνίες Λήψης Δεδομένων Pleiades Tri Stereo

Τα μεταδεδομένα (metadata) της εικόνας απεικονίζονται στον παραπάνω πίνακα και παρουσιάζουν την γωνία λήψης για κάθε μία από τις τρεις σκηνές, τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια στην διεύθυνση κίνησης. Επειδή η στερεοσκοπική κάλυψη της περιοχής πραγματοποιείται με κατά μήκος λήψη (along track), η along γωνία λήψης καθορίζει αν η εικόνα είναι εμπρόσθια, οπίσθια ή ναδιρικής λήψης. Επομένως η IMG_PHR1B_P_201304090912253_SEN_629326101-001_R1C1 είναι η ναδιρική, η IMG_PHR1B_P_201304090912398_SEN_629327101-001_R1C1 και IMG_PHR1B_P_201304090912163_SEN_629325101-001_R1C1 η εμπρόσθια και η οπίσθια αντίστοιχα.

Η φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Photogrammetry Imagine, που αποτελεί υπορουτίνα του ERDAS Imagine. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει πέντε στάδια. Με τα αντίστοιχα υπο-στάδια.

α. Δημιουργία του block των εικόνων.

- ι. Επιλογή των κατάλληλων εικόνων
- ιι. Εισαγωγή των δεδομένων.
- ιιι. Υπολογισμός των πυραμίδων.

β. Προσανατολισμός του block των εικόνων

- ι. Ενσωμάτωση των κλασματικών πολυωνύμων
- ιι. Μέτρηση φωτοσταθερών (GCPs) και σημείων σύνδεσης

γ. Αεροτριγωνισμός του block

ι. Συνόρθωση δέσμης με την χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, επαναληπτικά εφόσον απαιτηθεί

δ. Εκτέλεση Ημικαθολικού Αλγόριθμου (semi global matching)

- ι Υπολογισμός και δημιουργία των επιτολικών εικόνων
- ιι Στερεοσυνταύτιση σημείων με χρήση του SGM

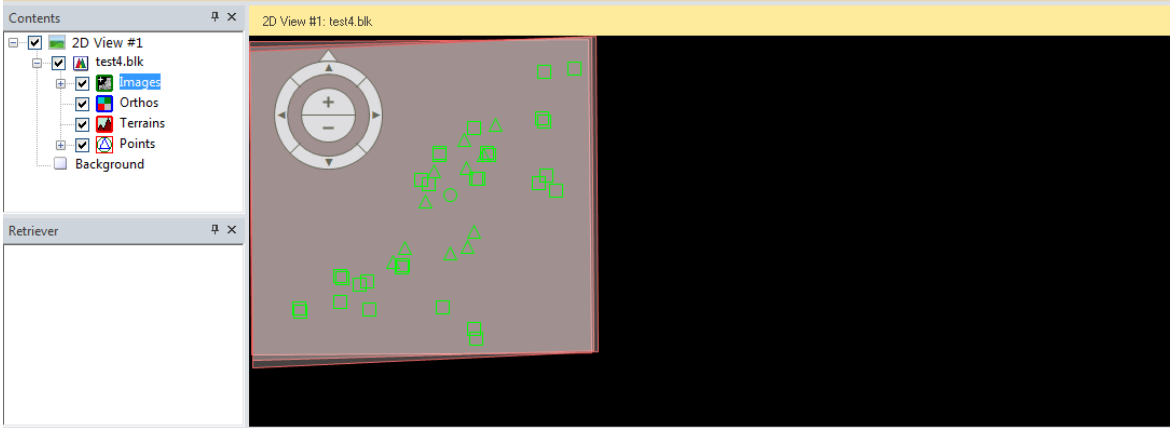
ε. Παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

- ι Καθαρισμός του νέφους σημείων
- ιι Δημιουργία του τελικού ψηφιδωτού DSM

6.2.1.3 Προεπεξεργασία των Εικόνων

Αρχικά εισήχθησαν οι εικόνες στο λογισμικό και υπολογίστηκαν οι πυραμίδες για κάθε μια από αυτές, επιτρέποντας την ταχύτερη επισκόπηση και χρήση των εικόνων. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο εσωτερικός και ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων. Ο εσωτερικός προσανατολισμός αποτελεί ουσιαστικά την ανάπλαση των φωτεινών ακτίνων στο εσωτερικό του αισθητήρα και την συσχέτιση των pixel της εικόνας με το μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα (κεντρική προβολή ή push-broom). Ο εξωτερικός προσανατολισμός αποτελεί την συσχέτιση μεταξύ του χώρου της εικόνας (image space) με τον τρισδιάστατο πραγματικό χώρο (ground space).

Οι τριάδα των δορυφορικών εικόνων διαθέτει κλασματικά πολυώνυμα RPC, τα οποία αποκαθιστούν τόσο τον εσωτερικό όσο και τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων. Η αποκατάσταση του εξωτερικού προσανατολισμού, όμως δεν είναι τέτοια που να επιτρέπει την ορθή εκτέλεση των αλγορίθμων συνταύτισης, αφού απαιτείται η όσο το δυνατόν ακριβέστερη γνώση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού μετρώνται φωτοσταθερά και σημεία συνδέσεως μεταξύ των εικόνων με σκοπό την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού και με την χρήση της συνόρθωσης με την επαναληπτική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, να προκύψει ο ακριβέστερος δυνατός εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων, για την χρήση του στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας.



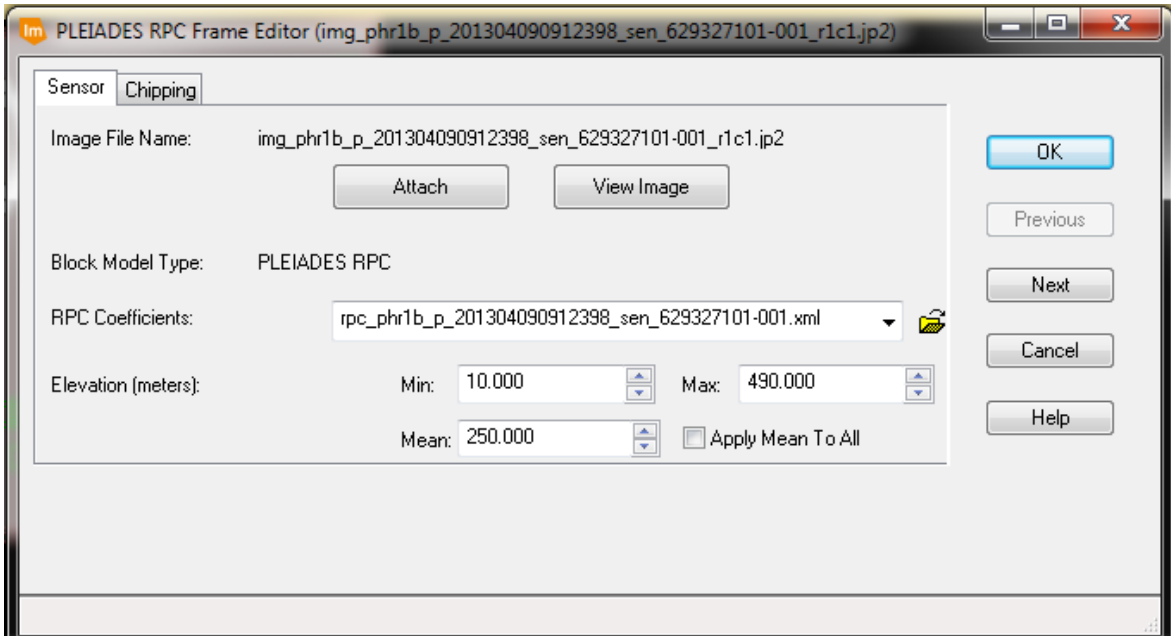
The screenshot shows the ERDAS IMAGINE interface. On the left, there is a 'Contents' pane with a tree view showing '2D View #1' containing 'test4.blk', 'Images', 'Orthos', 'Terrains', 'Points', and 'Background'. Below it is a 'Retriever' pane. The main window displays a 2D view of a test4.blk file, showing a map with a compass rose and several green and red markers. At the bottom, there is an 'Images' table with the following data:

Row #	Image ID	Description	Image Name	Active	Pyr.	Int.	Ext.	DTM	Ortho	Online
1	1		c:/masterthesis/erdas_test/pleiades/cgc600046199/img_phr1b_p_001/img_phr1b_p_201304090912398_sen_629327101-001_r1c1.jp2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	2		c:/masterthesis/erdas_test/pleiades/cgc600046200/img_phr1b_p_001/img_phr1b_p_201304090912253_sen_629326101-001_r1c1.jp2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	3		c:/masterthesis/erdas_test/pleiades/cgc600046201/img_phr1b_p_001/img_phr1b_p_201304090912163_sen_629325101-001_r1c1.jp2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Εικόνα 49 Εκτέλεση Διεργασιών σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Το περιβάλλον εργασίας του erdas imagine παρέχει πλειάδα εργαλείων για την εκτέλεση του προσανατολισμού των σκηνών. Συγκεκριμένα για την εκτέλεση του εσωτερικού προσανατολισμού λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο των δορυφορικών σκηνών τύπου Pleiades, που υπάρχει ήδη στο λογισμικό σε συνδυασμό με το αρχείο RPC με μορφότυπο xml το οποίο περιέχει της σταθερές για τον ευθύ και τον αντίστροφο μετασχηματισμό μεταξύ του χώρου της εικόνας και του πραγματικού χώρου. Τονίζεται ότι η χρήση των πολυωνύμων RPC αντικαθιστά την χρήση του αυστηρού μοντέλου και

πλέον δεν υφίσταται η ανάγκη για εύρεση και καθορισμό του πρωτεύοντος σημείουκάθε γραμμής σάρωσης, ούτε η σταθερά του αισθητήρα και η ακτινική διαστροφή. Το γεγονός αυτό απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό την εκτέλεση του προσανατολισμού, ο οποίος είναι τεχνικά δύσκολο για έναν αισθητήρα που αλλάζει προβολικό κέντρο για κάθε μια από τις χιλιάδες γραμμές σάρωσης που αποτελούν την σκηνή.



Εικόνα 50 Εκτέλεση Προσανατολισμών με χρήση RPC

Στην συνέχεια για την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού είναι απαραίτητη η σύνδεση των σκηνών μεταξύ τους με την χρήση σημείων σύνδεσης αλλά και η χρήση φωτοσταθερών για την σύνδεση των σκηνών με το έδαφος. Για την εκτέλεση των εργασιών αυτών απαιτείται η σκόπευση σε ένα νέο παραθυρικό περιβάλλον. Για την εκτέλεση της συγκεκριμένης εργασίας στο νησί της Αντιπάρου επιλέχθηκαν 29 κατάλληλα σημεία σύνδεσης τα οποία σκοπεύθηκαν και στις τρεις δορυφορικές σκηνές. Αυτό κατέστη δυνατό λόγω του μεγάλου ποσοστού επικάλυψης που παρουσιάζουν μεταξύ τους. Τα μοναδικά σημεία στα οποία η σκόπευση δεν πραγματοποιήθηκε, ήταν εκείνα στα οποία η δορυφορική σκηνή παρουσίαζε νεφοκάλυψη. Επίσης από εργασίες πεδίου που είχαν πραγματοποιηθεί στο νησί της Αντιπάρου στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας (Ιωάννου, 2013) επισημάνθηκαν και μετρήθηκαν δώδεκα σημεία προσδιορισμού δορυφορικών εικόνων με την χρήση δεκτών GPS γεωδαιτικής ακρίβειας περίπου 5cm, οι συντεταγμένες αυτών των σημείων σε συνδυασμό με τα συνοδευτικά σκαριφήματα χρησιμοποιήθηκαν για την επισήμανση των φωτοσταθερών επί των εικόνων και την μετέπειτα βέλτιστη σκόπευσή τους.



Εικόνα 51 Εκτέλεση Διεργασιών σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

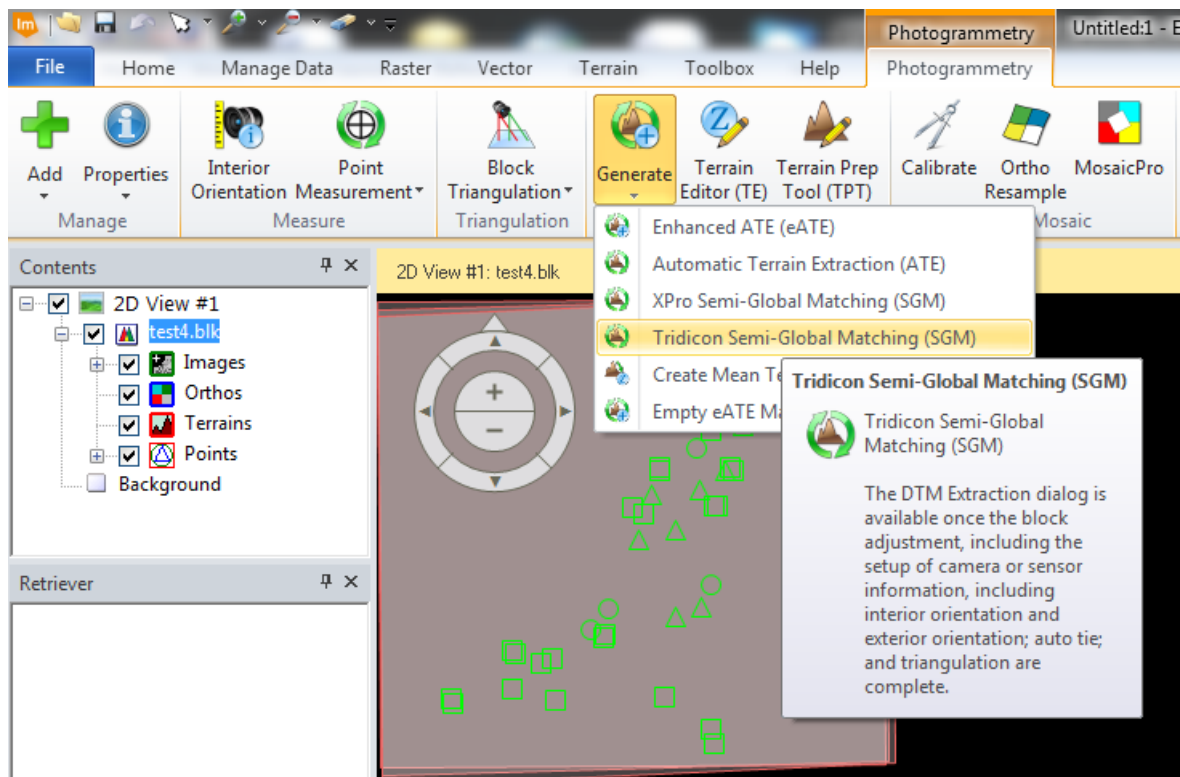
Πρίν την παραγωγή του τελικού ΨΜΕ, σημαντικό βήμα στην διαδικασία αποτελεί η εκτέλεση του αεροτριγωνισμού. Η ιδιαιτερότητα των δορυφορικών σκηνών έγκειται στο γεγονός ότι η ύπαρξη των πολυωνύμων RPC εξασφαλίζει a priori την γεωαναφορά και τον προσανατολισμό των δορυφορικών εικόνων με μεγάλη ακρίβεια, η οποία είναι της τάξης των λίγων μέτρων. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την εντύπωση ότι η εκτέλεση του αεροτριγωνισμού καθίσταται πλέον περιττή. Αυτό δεν είναι ακριβές, δι;οτι η ακρίβεια των πολυωνύμων RPC δεν είναι η απαραίτητη, ώστε η εκτέλεση του αεροτριγωνισμού και η μετέπειτα παραγωγή των ορθοεικόνων και του ΨΜΕ, να είναι τέτοιας ακρίβειας (της τάξης του 1 pixel), ώστε να εκμεταλλευθεί πλήρως το σύνολο της πληροφορίας που περιέχεται στα αρχικά δεδομένα.

6.2.1.4 Εκτέλεση του Αλγορίθμου SGM για την Παραγωγή ΨΜΕ

Σύμφωνα με τον Hirschmuller (Hirschmuller et .al 2004), η εκτέλεση του αλγορίθμου semi global matching πραγματοποιείται ως εξής: Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας συνταυτίζεται με την εικόνα βάσης και προκύπτει η τιμή της παράλλαξης (disparity value), παράλληλα πραγματοποιείται βελτιστοποίηση με την εφαρμογή μιας καθολικής συνάρτησης κόστους καθώς και εκτέλεση του αντιστρόφου υπολογισμού, δηλαδή της εύρεσης της τιμής παράλλαξης έχοντας ως εικόνα βάσης την εικόνα ελέγχου του προηγούμενου βήματος. Σε περίπτωση που οι τιμές αυτές παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις, τότε απορρίπτονται. Τελικά προκύπτει ένα νέφος σημείων στα σημεία με τις ορθά υπολογισμένες τιμές παράλλαξης.

Στο λογισμικό ERDAS Imagine ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε από την εταιρεία Tridicon και δίνει την δυνατότητα επεξεργασίας της τριάδας των δορυφορικών εικόνων

ανά δύο (I1-I2, I1-I3, I2-I3), επειδή ο αλγόριθμος SGM λειτουργεί σε ένα μόνο φασματικό κανάλι, επιλέγεται το παγχρωματικό κανάλι διότι παρουσιάζει μεγαλύτερη χωρική ανάλυση, αλλά και καλύτερη ραδιομετρία και εναργέστερο οπτικό περιεχόμενο σε σχέση με τα RGB.



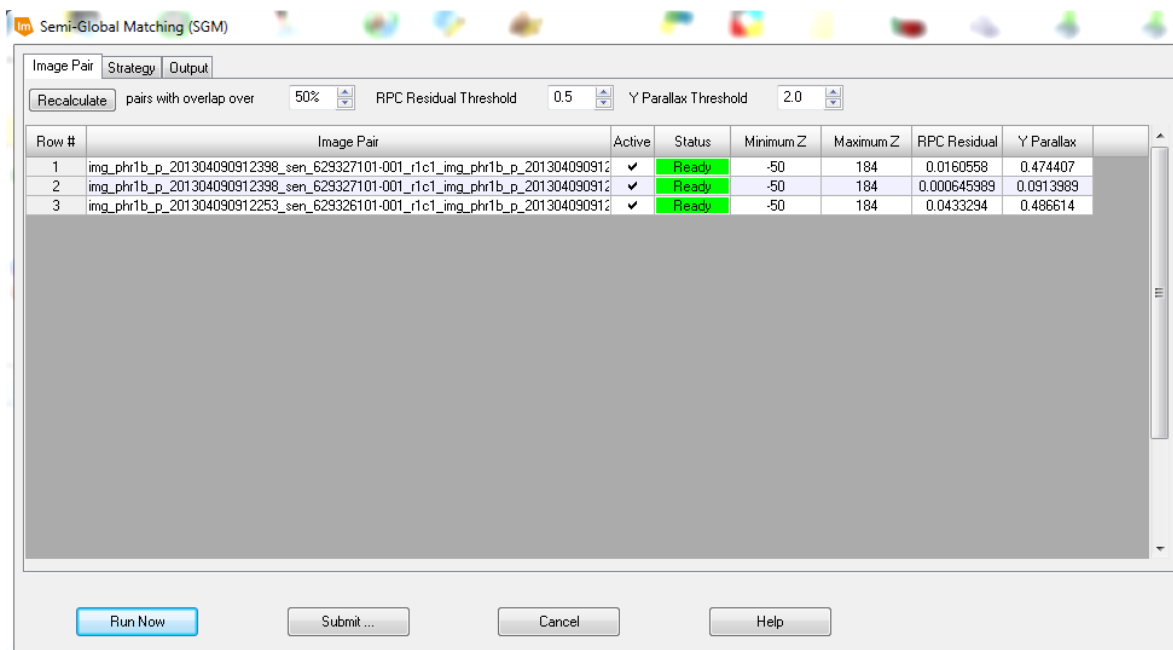
Εικόνα 52 Εκτέλεση SGM σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Συγκεκριμένα ο υλοποιηθείς αλγόριθμος μπορεί να εκτελεστεί είτε σε κάμερες με αισθητήρα πλαισίου (frame) είτε με δορυφορικούς αισθητήρες pushbroom με χρήση των πολυωνύμων RPC για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους πολύ υψηλής ανάλυσης. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου απαιτείται οι εικόνες να είναι σε μορφότυπο tiff με βάθος χρώματος 8-bit. Σε αντίθετη περίπτωση (όπως οι χορηγηθείσες .jp2-jpeg2000) το λογισμικό δημιουργεί τις ενδιάμεσες εικόνες για την παραγωγή του προϊόντος. Επίσης απαραίτητο για την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι οι δορυφορικές σκηνές να έχουν υποστεί επιπολική επανασύσταση. Αν αυτό το βήμα δεν έχει προηγηθεί, η επιπολική επανασύσταση πραγματοποιείται στο πλαίσιο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Το τελικό προϊόν είναι ένα νέφος σημείων RGB ή ranchromatic, αναλόγως της εικόνας εισόδου σε μορφότυπο .las 1.2 με σύστημα αναφοράς ίδιο με αυτό που ορίστηκε κατά την συνόρθωση των δορυφορικών σκηνών, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση το ΕΓΣΑ 87. Για την εκτέλεση του αλγορίθμου απαιτείται η ύπαρξη υπολογιστή αρχιτεκτονικής 64-bit με τουλάχιστον 4GB RAM.

Μετά την επιλογή του αλγορίθμου, εμφανίζεται το παράθυρο που ακολουθεί. Εδώ αρχικά δίδεται η δυνατότητα εκτέλεσης του αλγορίθμου στα επιθυμητά ζεύγη εικόνων. Στην προκειμένη περίπτωση τα δημιουργηθέντα ζεύγη είναι εμπρόσθια-ναδερική σκηνή, εμπρόσθια-οπίσθια σκηνή και ναδερική-οπίσθια σκηνή. Στο πλαίσιο διαλόγου που ακολουθεί δίνεται η δυνατότητα αφαίρεσης των ζευγαριών που

παρουσιάζουν μικρότερη επικάλυψη από την ελάχιστη επιθυμητή. Αυτό δεν έχει εφαρμογή στις συγκεκριμένες σκηνές αφού η επικάλυψη αυτών ξεπερνά το 95%.

Ως όριο στην αποδοχή της εκτέλεσης του αλγορίθμου για τα υπόλοιπα των πολυωνύμων RPC τίθεται το 0,5. Αν το όριο αυτό ξεπερνάται από κάποιο από τα ζεύγη των στερεο-εικόνων, η εκτέλεση του αλγορίθμου ακυρώνεται. Το όριο αυτό σύμφωνα με τα αποτελέσματα στην απεικόνιση που ακολουθεί δεν ξεπερνάται από κανένα ζεύγος της τριάδας των εικόνων. Το ποιοτικό αποτέλεσμα αποδεικνύεται και από την πολύ μικρή τιμή των διαφορών της γ παράλλαξης η οποία δεν ξεπερνά την τιμή του 0,5 ενώ το τεθέν όριο βρίσκεται στο 2. Η πράσινη ένδειξη στην γραμμή κατάστασης αποδεικνύει ότι οι εικόνες έχουν ήδη υποστεί επιτυχώς επιπολική επανασύσταση και είναι έτοιμες για την εκτέλεση του αλγορίθμου.

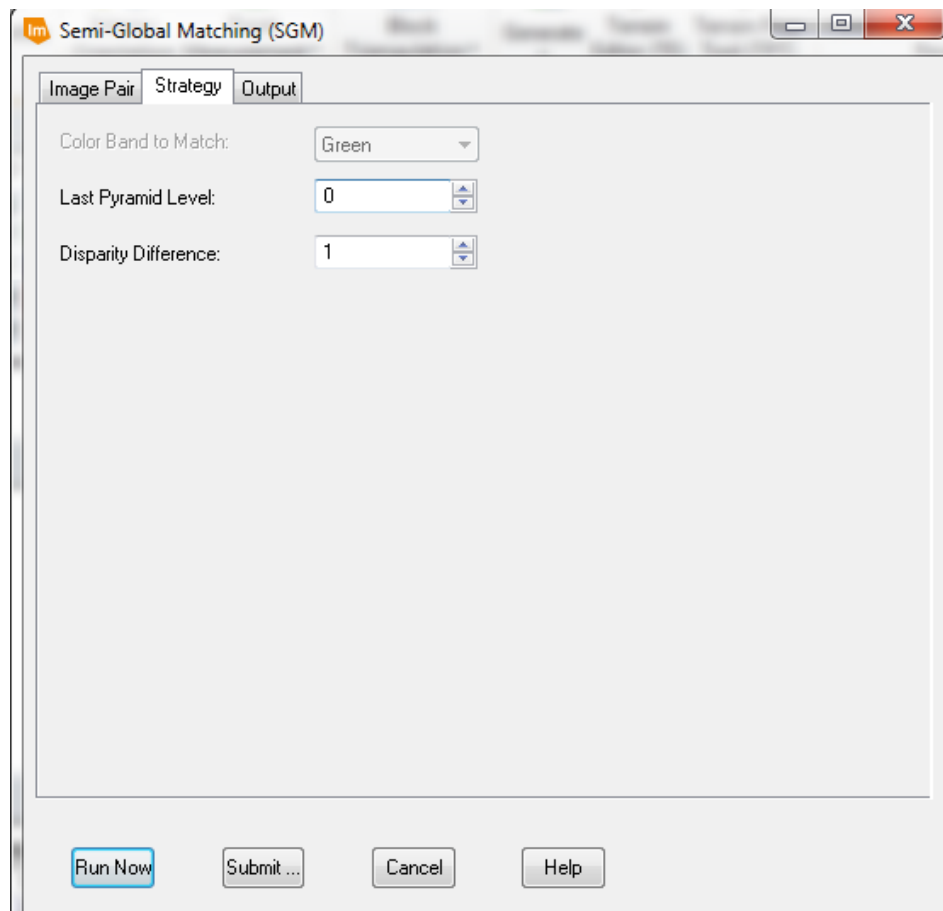


Εικόνα 53 Εκτέλεση SGM σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Στην παραμετροποίηση του αλγορίθμου συμβάλλει ουσιαστικά και ο πίνακας που ακολουθεί, στον οποίο περιγράφεται η ακολουθούμενη στρατηγική. Για τις εικόνες RGB επιλέγεται στο κανάλι που θα χρησιμοποιήσει ο αλγόριθμος για την εκτέλεση της συνταύτισης και το οποίο εξ ορισμού είναι το πράσινο. Στην προκείμενη περίπτωση η επιλογή είναι απενεργοποιημένη αφού το μόνο κανάλι που διαθέτει η εικόνα είναι το παγχρωματικό. Η επόμενη επιλογή, επιτρέπει την εκτέλεση του SGM μέχρι το επιθυμητό επίπεδο της πυραμίδας των εικόνων. Θέτοντας ως επιθυμητή τιμή το 0, ο αλγόριθμος εκτελείται μέχρι το μέγιστο επίπεδο ανάλυσης. Αναλύοντας την παραπάνω επιλογή πρέπει να τονιστεί ότι οι ψηφιακές εικόνες διαθέτουν πολλαπλά επίπεδα λεπτομερειών, τα οποία δεν παρουσιάζονται κατά την οπτικοποίησή τους στην οθόνη ενός τερματικού. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο κατά την εισαγωγή των εικόνων στο λογισμικό "χτίζονται" (δημιουργούνται) οι πυραμίδες για κάθε εικόνα. Η πυραμιδική οργάνωση των εικόνων επιτρέπει την εκτέλεση του αλγορίθμου συνταύτισης αρχικά σε υψηλότερο επίπεδο και η εύρεση αντιστοιχιών εκεί να αποτελέσει αρχική τιμή για το επόμενο επίπεδο λεπτομέρειας. Η στρατηγική αυτή δίνει την δυνατότητα εκμετάλλευσης της

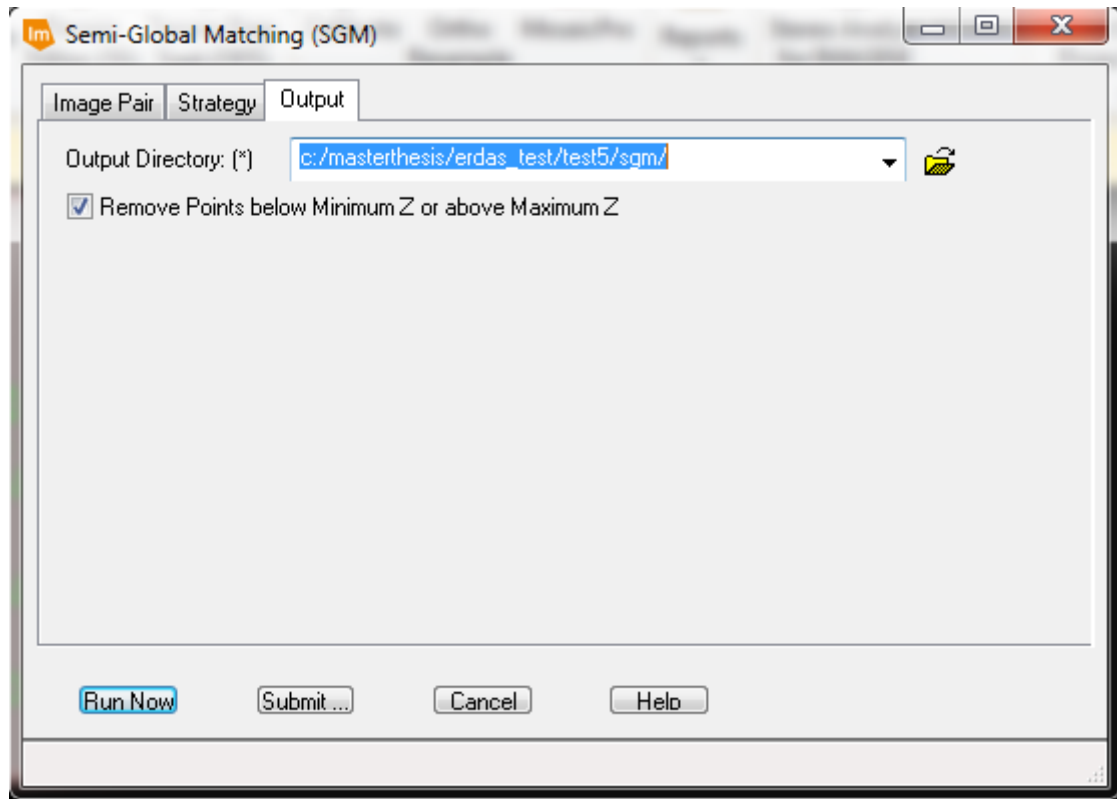
"μείωσης" της κλίμακας της εικόνας, άρα και των αποκρύψεων που δημιουργούν προβλήματα στην εκτέλεση των αλγορίθμων.

Σχετικά με την διαφορά στην ανομοιότητα βάθους (disparity difference), η τιμή αυτή τίθεται ως όριο μεταξύ της τιμής ανομοιότητας βάθους που προκύπτει από την θεώρηση μιας εκ των εικόνων του ζεύγους ως εικόνας βάσης και της τιμής ανομοιότητας βάθους με την θεώρηση της άλλης ως εικόνας βάσης αντιστοίχως. Αν η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη της μονάδας τότε η τιμή αυτή είναι παρεκτρεπόμενη (outlier) και δεν εισάγεται στο τρισδιάστατο νέφος σημείων.

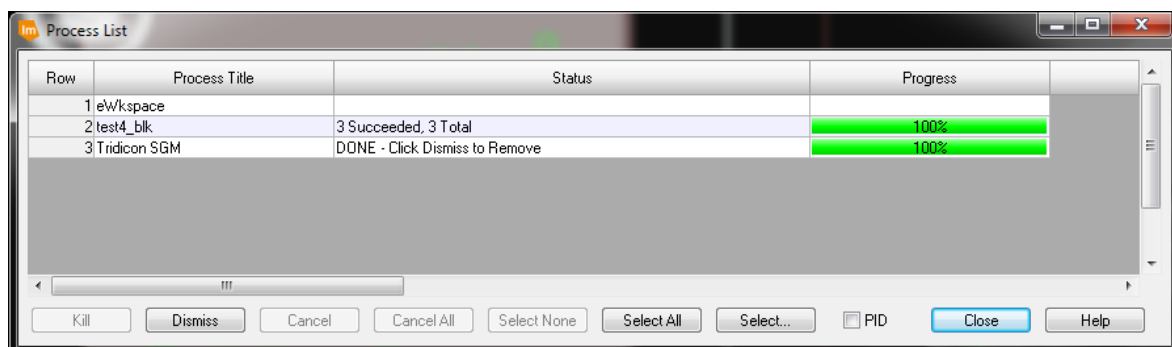


Εικόνα 54 Επιλογές SGM σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Το αποτέλεσμα της εκτέλεσης του αλγορίθμου αποθηκεύεται στην θέση που υποδεικνύεται στο πλαίσιο διαλόγου και δίνεται η επιλογή της αφαίρεσης των τιμών υψομέτρου οι οποίες είναι εκτός των ορίων που έχουν υπολογιστεί με την βοήθεια των κλασματικών πολυωνύμων.

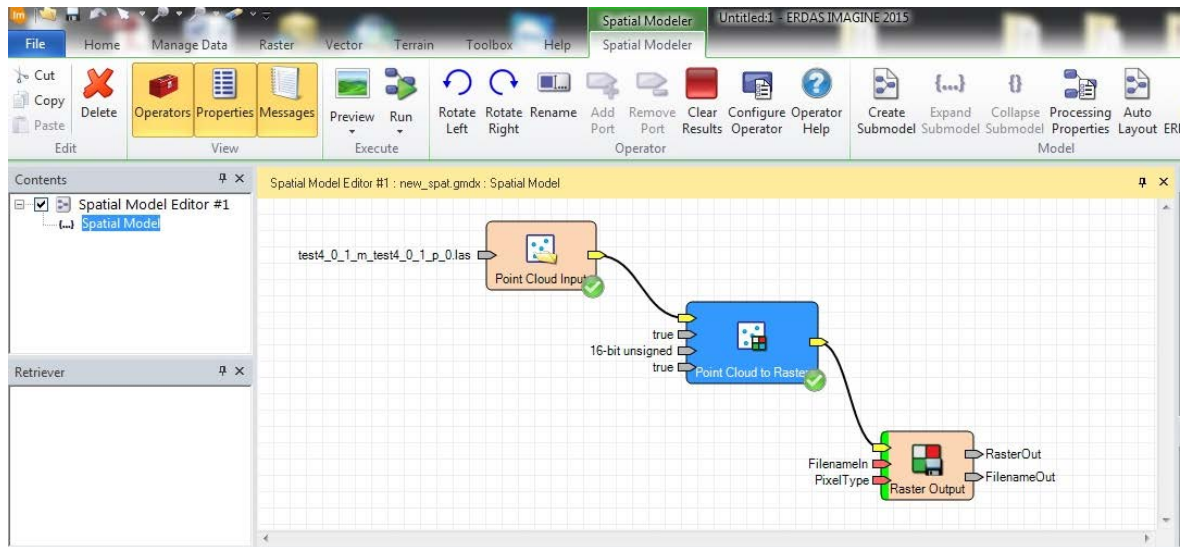


Εικόνα 55 Επιλογές SGM σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE



Εικόνα 56 Επιτυχής Εκτέλεση SGM σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας ήταν η παραγωγή ενός τρισδιάστατου νέφους σημείων το οποίο περιέχει παρεκτρεπόμενες τιμές (outliers). Για την εκμετάλλευση του προϊόντος και την μετέπειτα συγκριτική του αξιολόγηση απαιτείται η μετατροπή του σε ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση του spatial modeler εντός του λογισμικού ERDAS, σύμφωνα με το διάγραμμα ροής στο σχήμα που ακολουθεί. Τονίζεται ότι δεν διατίθεται λειτουργική ρουτίνα για την εκτέλεση της διαδικασίας αυτής και η χρήση του τελεστή point cloud to raster επιτρέπει την αφαίρεση των τιμών έντασης (RGB ή ranchromatic) από το νέφος και τη δημιουργία ενός αρχείου raster στο οποίο αποθηκεύονται οι τιμές υψομέτρων.



Εικόνα 57 Χρήση Spatial Modeler σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Για την μείωση του θορύβου, απο τις παρεκτρεπόμενες τιμές (outliers) εκτελείται ένα φίλτρο average 3x3 για την εξομάλυνση του τελικά παραγόμενου DSM. Το φίλτρο αυτό αφενός εξαφανίζει τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα (spikes, wells) επιτρέποντας την απόρριψη των outliers, αφετέρου μειώνει τοπικά την ακρίβεια του τελικού προϊόντος.

6.2.1.5 Αποτελέσματα

6.2.1.5.1 Τριγωνισμός Δορυφορικών Εικόνων.

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων, απαιτείται η συνόρθωση των τριών δορυφορικών σκηνών με την μέθοδο της συνόρθωσης κατά δέσμες. Η πολλαπλή εκτέλεση των τριγωνισμών μπορεί να δώσει όχι μόνο το μέγεθος της εξωτερικής ακρίβειας που παρουσιάζει η γεωαναφορά των δορυφορικών εικόνων, αλλά και τον βαθμό βελτίωσης που παρουσιάζεται με την προσθήκη φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης.

Check Point Residuals (pixels)

Point ID	rX	rY	rZ
37	-0,1898	0,5748	-1,0167
40	-0,0980	-0,1835	1,4546
35	-0,4283	0,1718	-0,7325

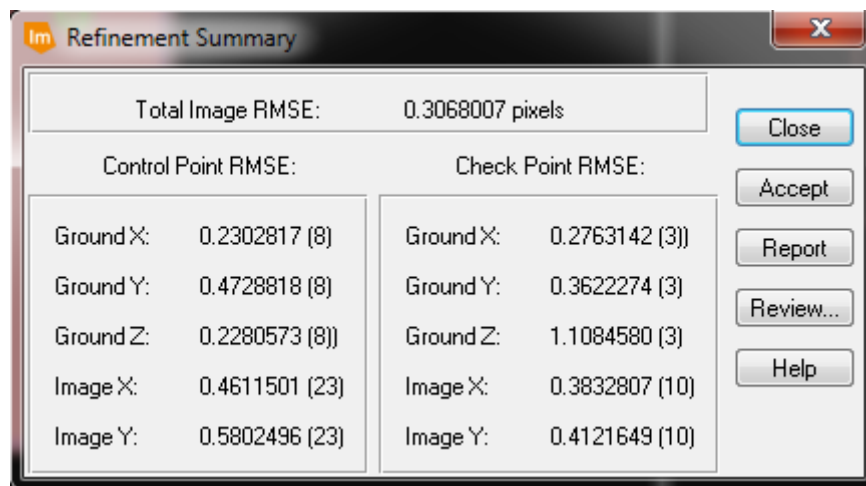
Control Point Residuals (pixels)

Point ID	rX	rY	rZ
36	-0,0025	-0,3427	-0,0848
38	0.1139	0.0840	-0.0473
39	-0.2395	0.3626	-0.3903
41	-0.0618	0.0527	0.2563
43	0.1465	-0.2869	0.1977
44	-0.0988	0.2577	-0.2651

45	-0.3080	-0.8932	0.0547
46	0.4726	0.7639	0.2761

Πίνακας Σφαλμάτων Φωτοσταθερών και Σημείων Ελέγχου

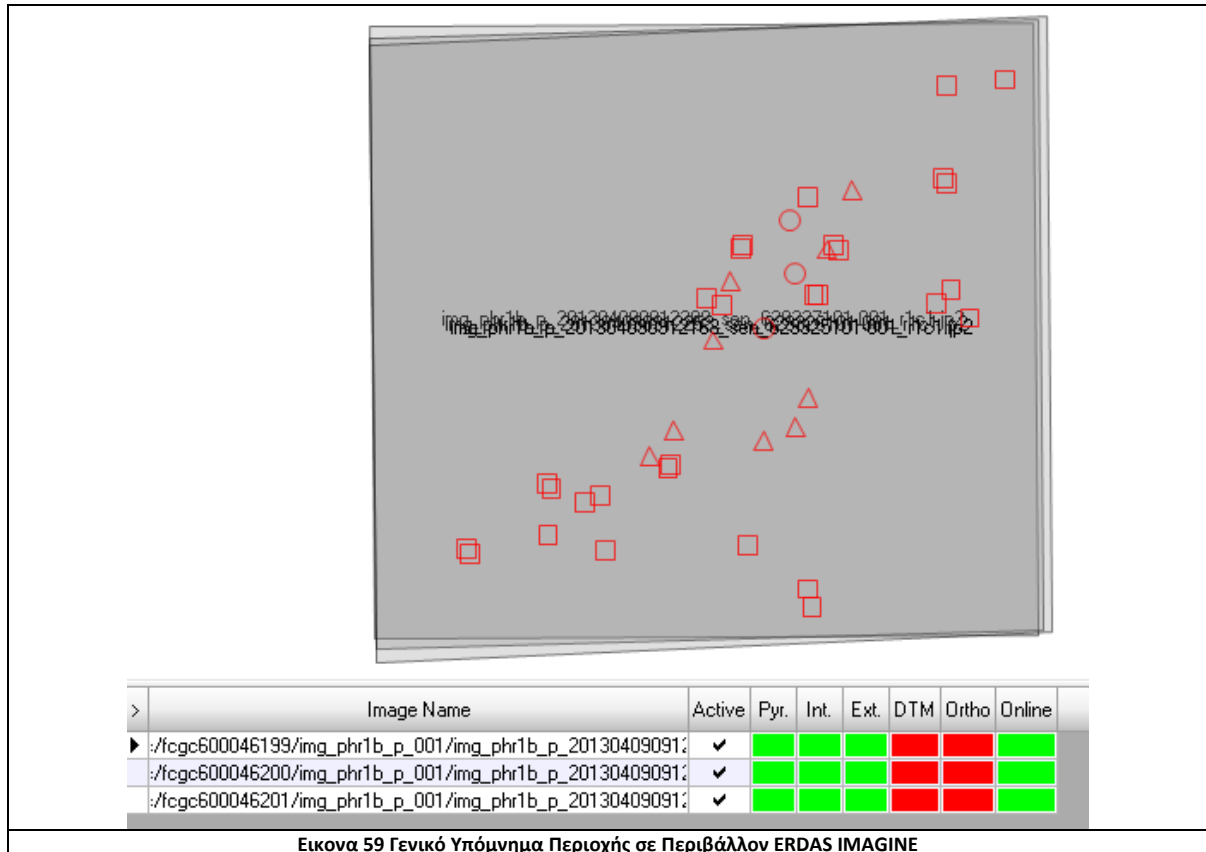
Χωρίς την χρήση φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης και με τα μετρημένα σημεία ως σημεία ελέγχου παρατηρείται μια ακρίβεια της τάξης των λίγων μέτρων. Εν αντιθέσει, με την χρήση ενός και μόνο φωτοσταθερού, η ακρίβεια βελτιώνεται σημαντικά φτάνοντας κάτω του μεγέθους της εδαφοψηφίδας. Με την χρήση δε του συνόλου των δεδομένων (σημείων σύνδεσης και φωτοσταθερών), επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα και μειώνεται το σφάλμα στο μέγιστο δυνατό. Τελικά επιλέχθηκε η λύση με μετρημένα 23 σημεία σύνδεσης και 8 GCP.



Εικόνα 58 Τριγωνισμός σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

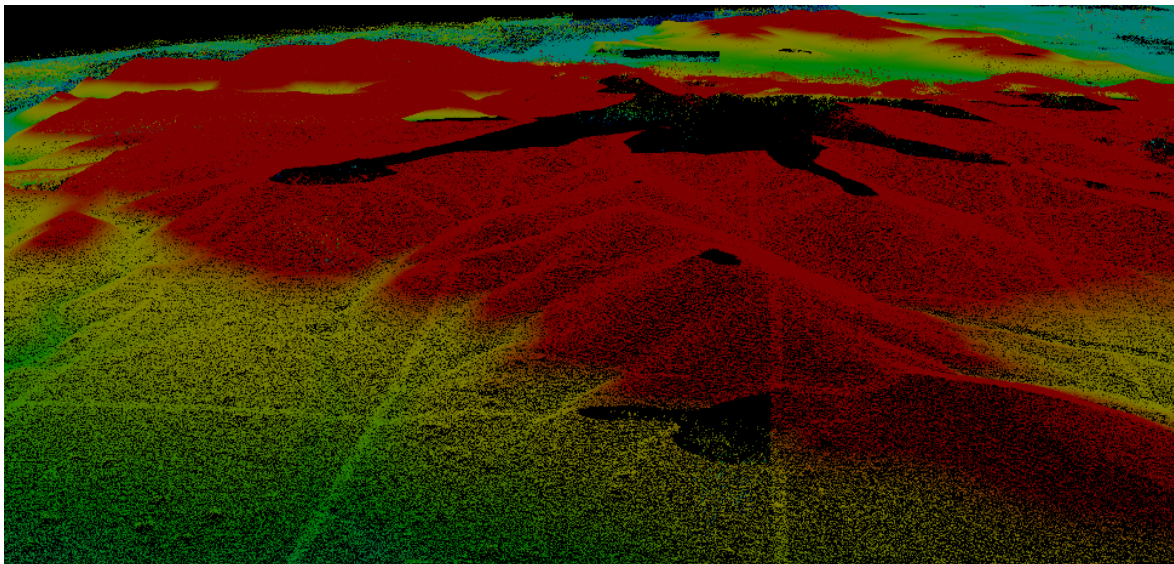
Απο την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού και τον έλεγχο των υπολοίπων τόσο των φωτοσταθερών όσο και των σημείων ελέγχου, προκύπτει η ακρίβεια της τάξης του 0,5 pixel (0.25 μ) για την οριζοντιογραφική θέση των σημείων και περίπου 2 φορές χειρότερη για την υψομετρική ακρίβεια. Τιμές αναμενόμενες για το είδος των εικόνων καθώς και τον αριθμό και την κατανομή των φωτοσταθερών και των σημείων σύνδεσης. Επίσης στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα υπόλοιπα του αεροτριγωνισμού για τα φωτοσταθερά καθώς και τα σφάλματα από τα σημεία ελέγχου.

Η τελική προκύπτουσα συνόρθωση από την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού με την εποπτική εμφάνιση των σημείων σύνδεσης, των σημείων ελέγχου και των φωτοσταθερών παρουσιάζεται στην εικόνα 59 που ακολουθεί.



Εικόνα 59 Γενικό Υπόμνημα Περιοχής σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

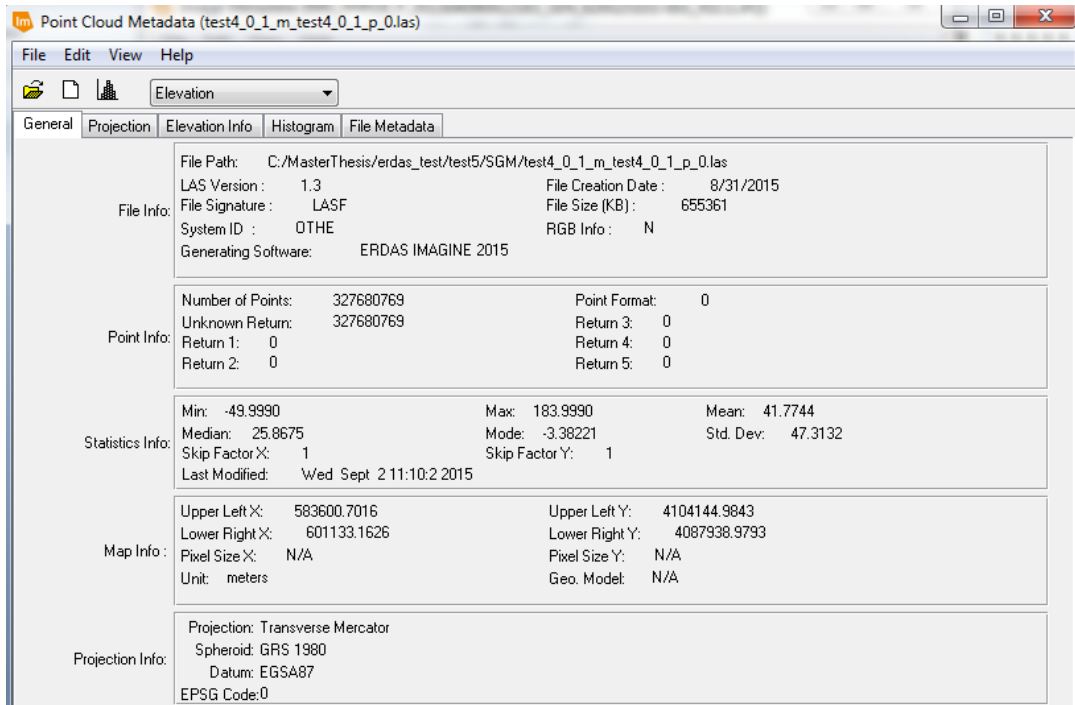
Στην συνέχεια με την χρήση των διαδικασιών που περιγράφησαν στην παράγραφο 6.1.4 προκύπτουν τα τρία νέφη σημείων από τα τρία ζεύγη εικόνων. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το τρισδιάστατο νέφος σημείων από την εκτέλεση του αλγορίθμου στο ζεύγος μεταξύ εμπρόσθιας και ναδρικής εικόνας.



Εικόνα 60 Δημιουργηθέν Νέφος Σημείων σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

Η πυκνότητα των παραγόμενων σημείων είναι 0,3 σημεία/pixel ή 1,22 σημεία/m² γεγονός που αποδεικνύει ότι η παραγόμενη πληροφορία με δεδομένη την απόσταση λήψης, την οικονομικότητα των δεδομένων και την επιφάνεια κάλυψης είναι ποσοτικά εντός των δυνατοτήτων ενός συστήματος lidar πολλαπλάσιου κόστους. Παρατηρείται επίσης η χαρακτηριστική γραμμή μεταξύ ισομοιρασμένων επιφανειών σε μορφή block. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο εκτελείται ο αλγόριθμος και ο

οποίος συνίσταται στον διαχωρισμό των εικόνων σε μικρότερα τμήματα, την εκτέλεση της συνταύτισης στα τμήματα αυτά και στην μετέπειτα ένωση των δημιουργούμενων νέων νεφών σημείων. Η μετέπειτα μετατροπή του νέφους σημείων σε ψηφιακό μοντέλο επιφανείας και η αξιολόγηση του περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο που ακολουθεί.



Εικόνα 61 Metadata Νέφους Σημείων σε Περιβάλλον ERDAS IMAGINE

6.2.1.6 Αξιολόγηση

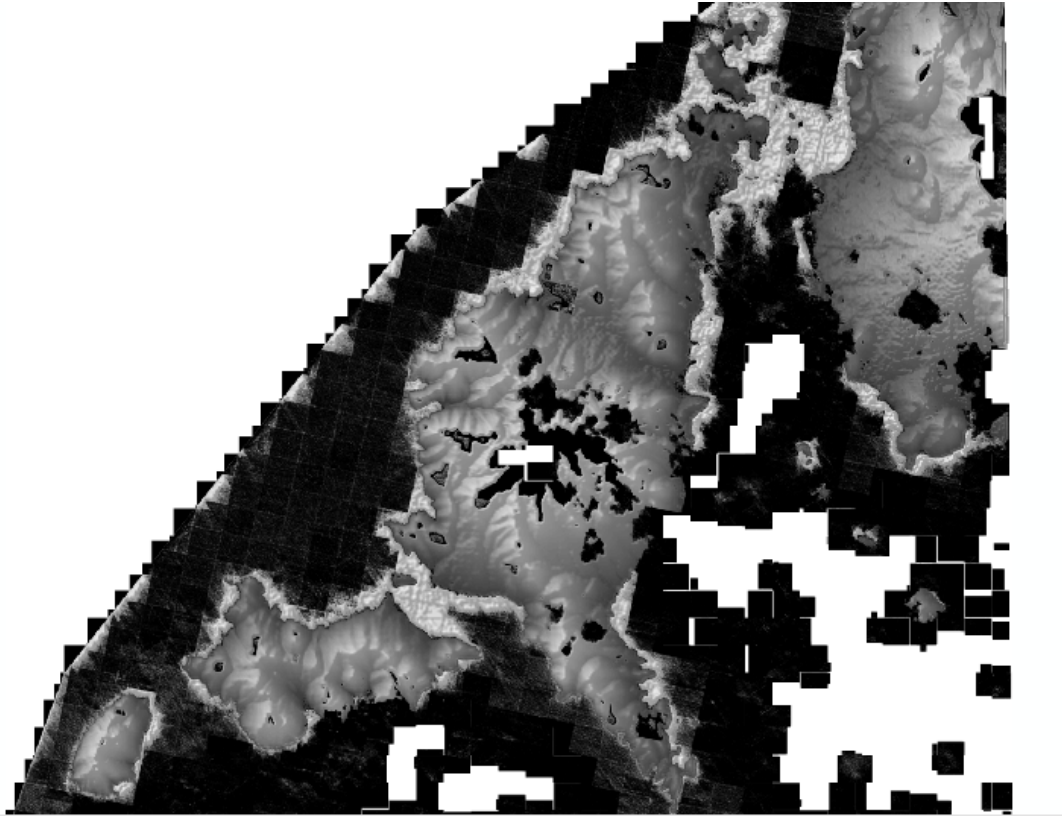
6.2.1.6.1 Οπτική Αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση του παραγόμενου DSM, διατίθενται τα δεδομένα της νήσου Αντιπάρου από την Κτηματολόγιο Α.Ε. , τα οποία περιλαμβάνουν πινακίδες ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε μορφή πινακίδων διαστάσεων 4600m x3600m με βήμα 5 μέτρα. Τα δεδομένα αυτά διατίθενται σε σύστημα αναφοράς HTRS07, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η συνένωση των πινακίδων, με την εκτέλεση του εργαλείου *mosaic to new raster* σε περιβάλλον Arcgis και η μετέπειτα επαναπροβολή των δεδομένων σε ΕΓΣΑ 87. Μετά από την εκτέλεση των παραπάνω ενεργειών προκύπτει το ψηφιακό μοντέλο αναφοράς του σχήματος που ακολουθεί.



Εικόνα 62 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από την εταιρεία Κτηματολόγιο Α.Ε.

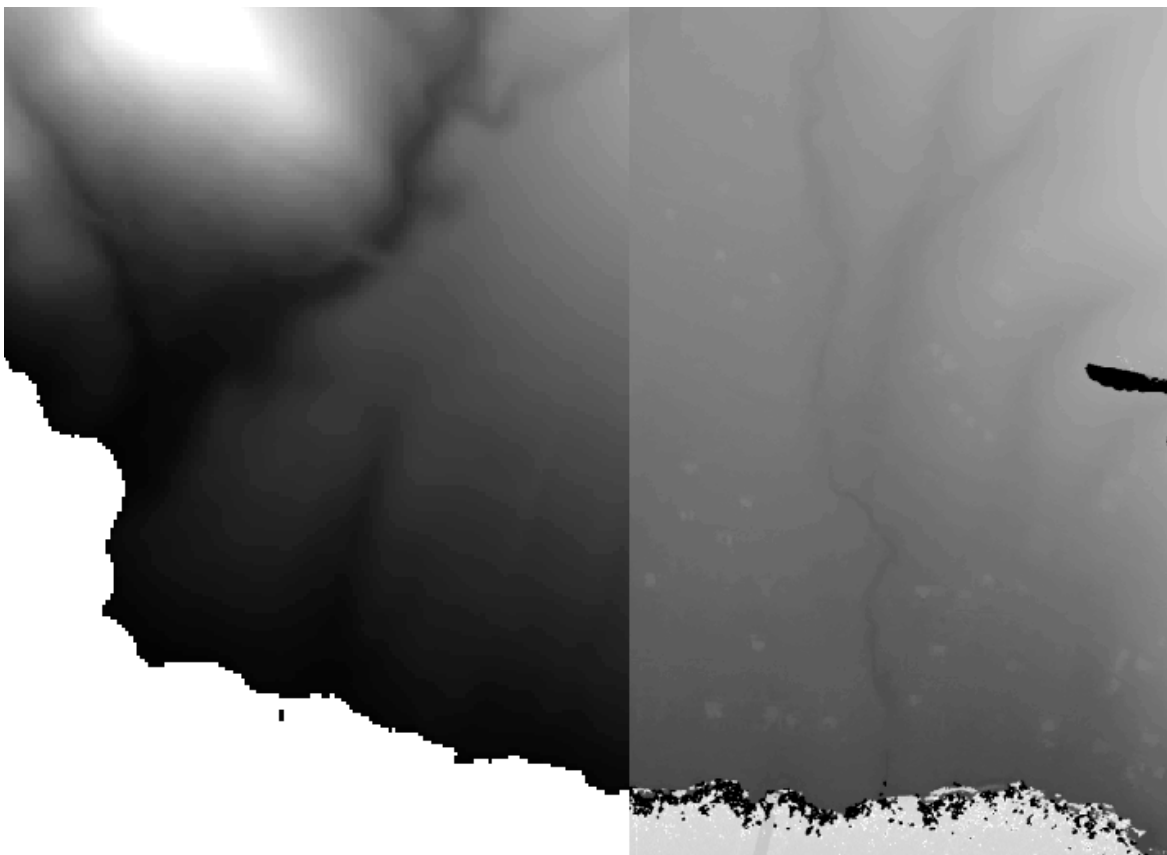
Για την οπτική καταρχάς αξιολόγηση του ΨΜΕ απαιτείται η μετατροπή του παραχθέντος νέφους σημείων σε ΨΜΕ με την χρήση του spatial modeler και στην συνέχεια η επίθεση των 2 layers για την οπτική σύγκριση των 2 μοντέλων. Έτσι προκύπτει η εικόνα του παρακάτω σχήματος.



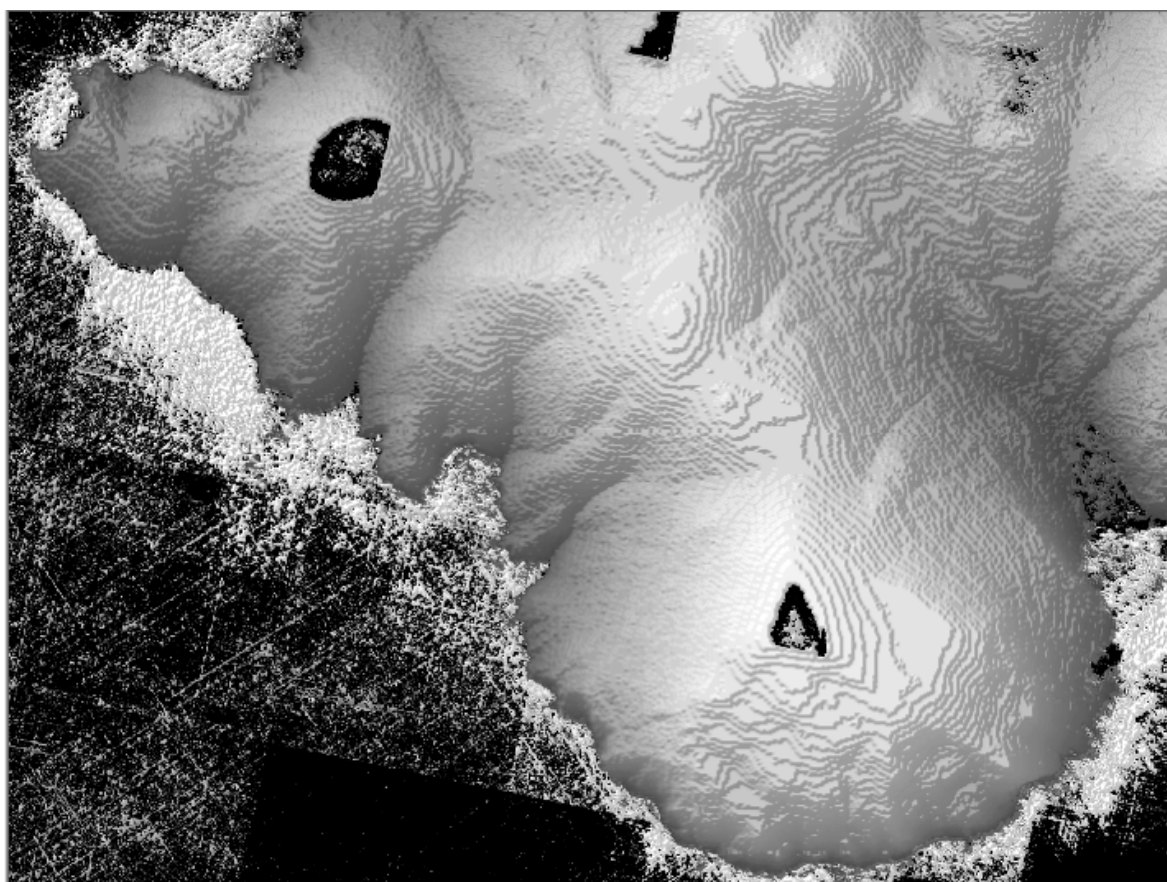
Εικόνα 63 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από την Tridicon SGM

Οι κύριες παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν από την αρχική οπτική αξιολόγηση του DSM είναι οι εξής:

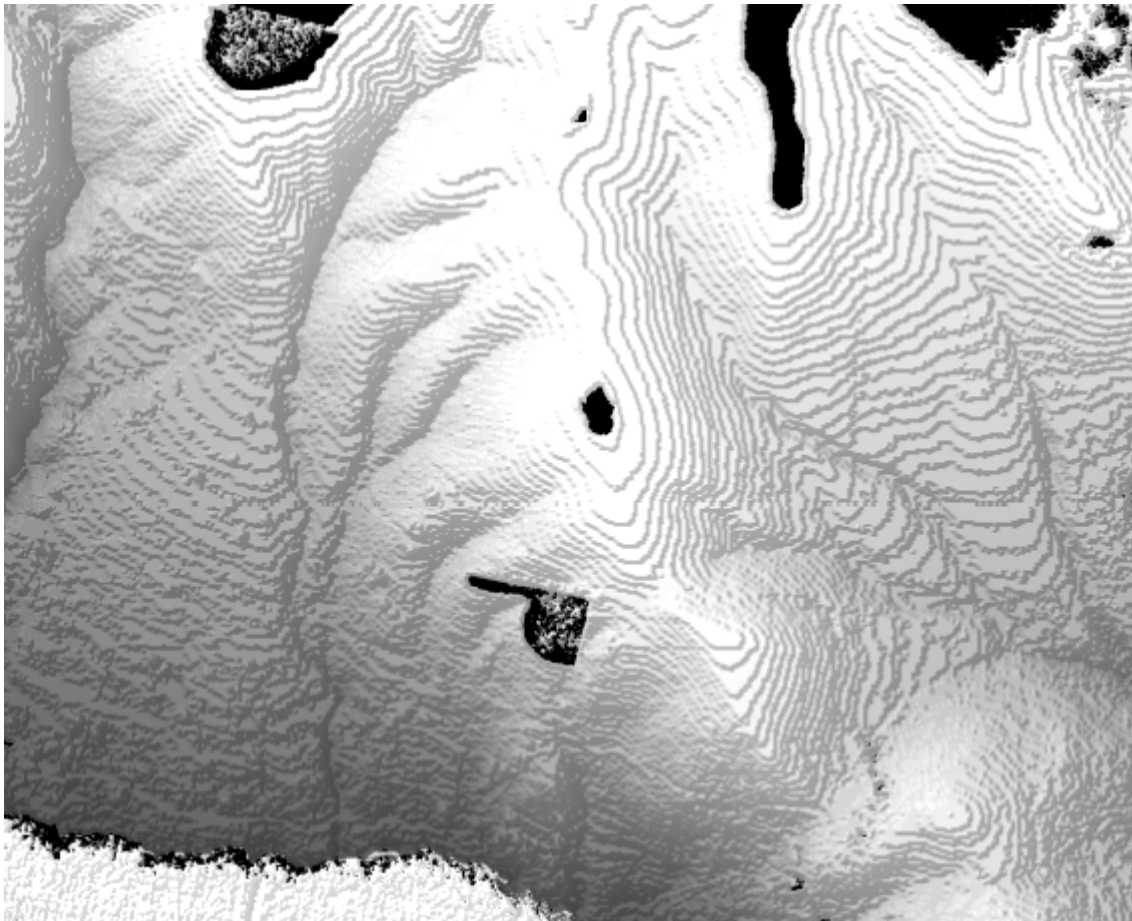
- Παρατηρείται η χαρακτηριστική τετραγωνική μορφή, σε όλη την επιφάνεια του DSM, η οποία παρατηρήθηκε και στο νέφος σημείων και οφείλεται στον τρόπο που επενεργεί ο αλγόριθμος και στην επεξεργασία των στερεοεικόνων κατά μπλόκ συγκεκριμένων διαστάσεων.
- Παρατηρείται αποτυχία του αλγορίθμου εντός των παραθαλάσσιων περιοχών, χαρακτηριστικό αναμενόμενο, αφού τα τμήματα αυτά της εικόνας δεν διαθέτουν υφή, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εκτελεστεί συνταύτιση σημείων.
- Παρατηρείται αποτυχία του αλγορίθμου σε περιοχές με νεφοκάλυψη. Για την περίπτωση της νήσου Αντιπάρου η νεφοκάλυψη βρίσκεται σε διαφορετικά σημεία τόσο στην εμπρόσθια όσο και στην ναδιρική εικόνα. Με αποτέλεσμα να μην είναι δύνατη η εύρεση ομολογιών, στα σημεία που αθροιστικά παρουσιάζουν νεφοκάλυψη και στις 2 εικόνες.



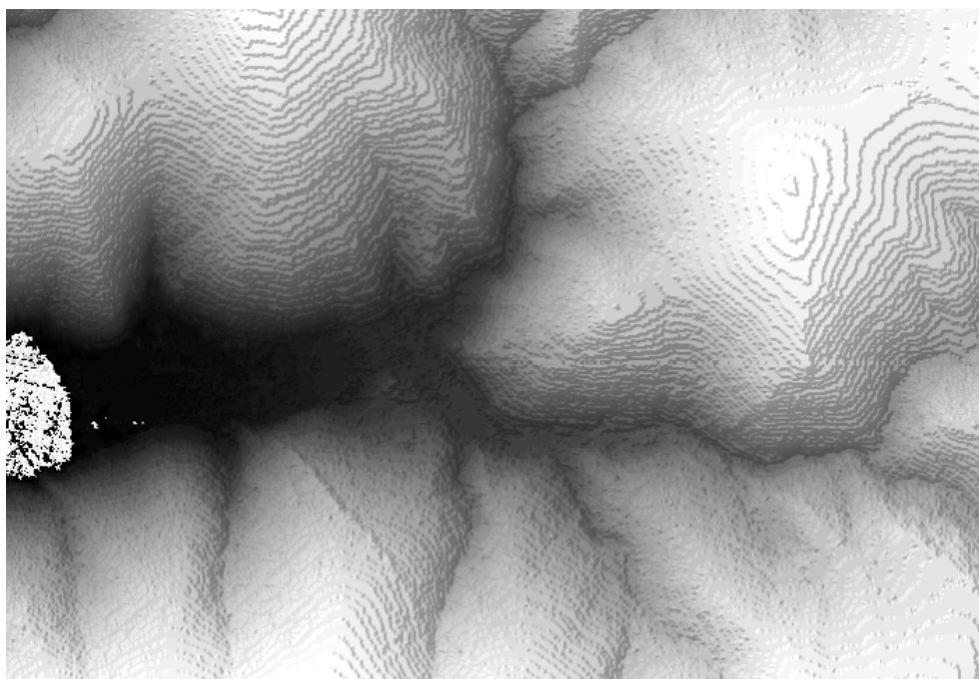
Εικόνα 64 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από την εταιρεία Κτηματολόγιο Α.Ε. σε παράθεση με το δημιουργηθέν από SGM



Εικόνα 65 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από Tridicon SGM σε μορφή hillshade



Εικόνα 66 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από Tridicon SGM σε μορφή hillshade



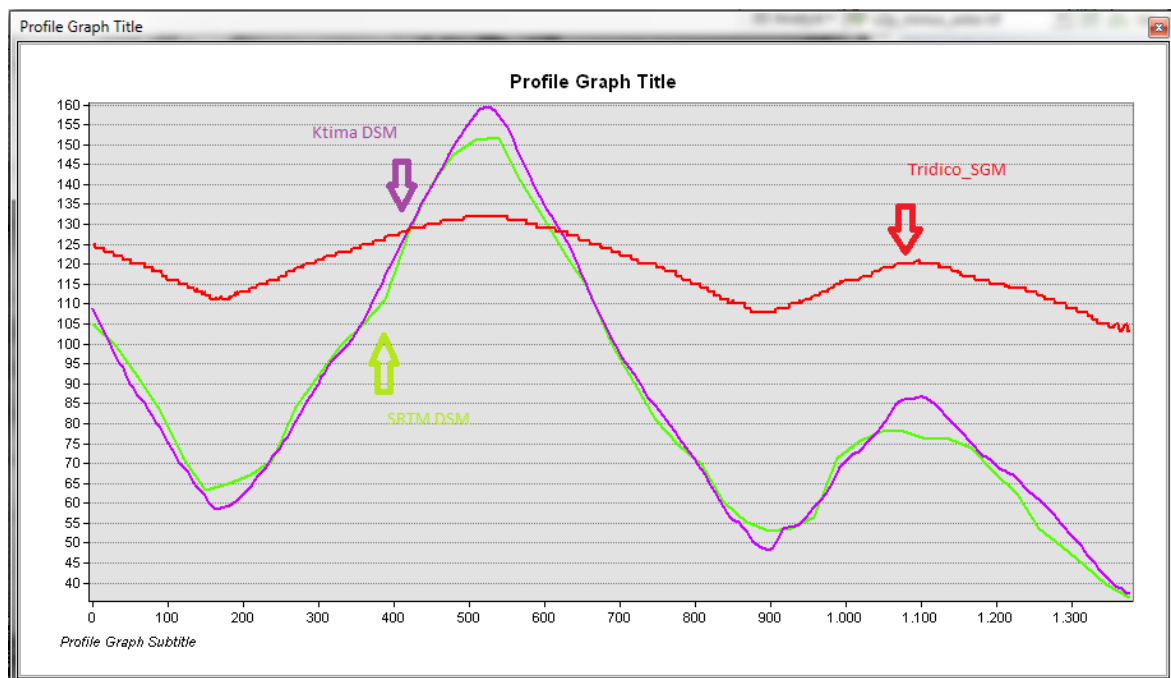
Εικόνα 67 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από Tridicon SGM σε μορφή hillshade

Από την πρώτη οπτική παράθεση του παραχθέντος ΨΜΕ σε μορφή σκίασης αναγλύφου παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές περιοχές αποτυχίας του αλγορίθμου, καθώς και ένα οπτικό "σκαλί" στην τοπογραφία της περιοχής που ομοιάζει με την μορφή των ισοϋψών

και παρουσιάζει βήμα 0,5m, το οποίο είναι ίσο με την εδαφοψηφίδα των αρχικών εικόνων.

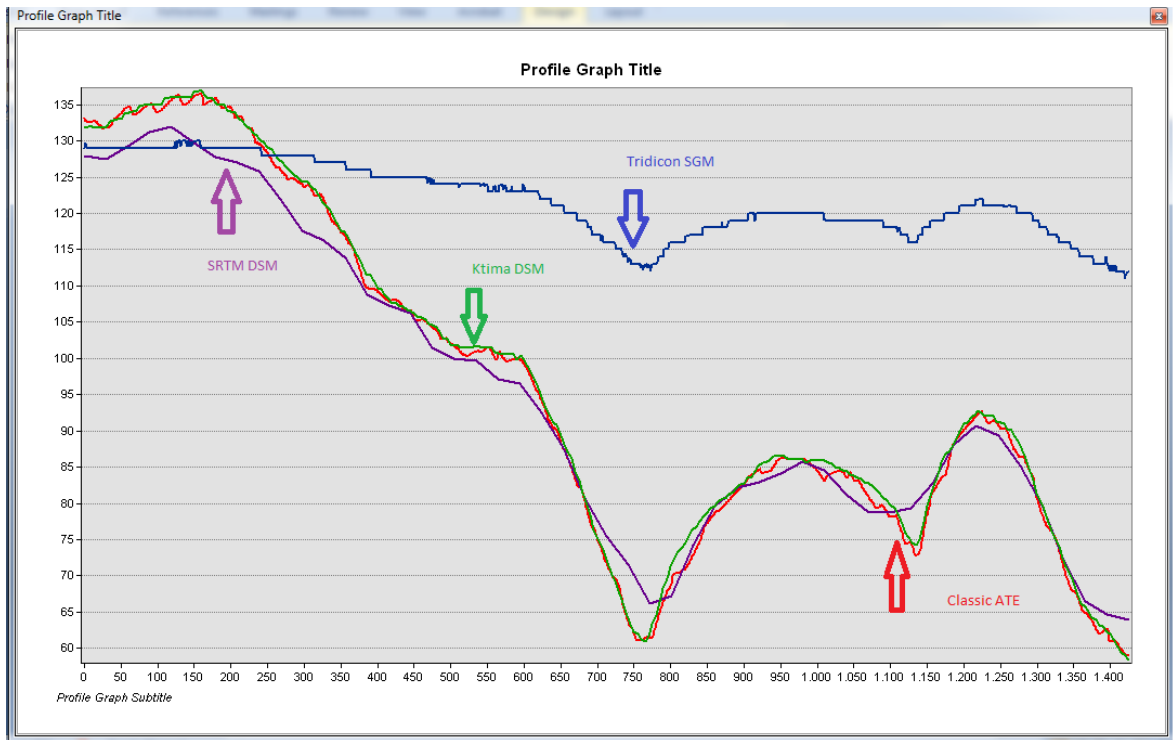
6.2.1.6.2 Αξιολόγηση με την εκτέλεση κατατομών (profile graph) με το σύνολο των δεδομένων ελέγχου

Για την βέλτιστη οπτικοποίηση των διαφορών μεταξύ των παραχθέντων ψηφιακών μοντέλων εδάφους και των δεδομένων βάσης χρησιμοποιούνται μηκοτομές κατά μήκος βασικών διευθύνσεων. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ του ΨΜΕ του κτηματολογίου και του tridicon semi global matching και των δεδομένων SRTM στην κατεύθυνση BN για περιοχή BA επί της νήσου Αντιπάρου.



Εικόνα 68 Μηκοτομή Σύγκρισης ΨΜΕ

Τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά αφού η εφαρμογή του αλγόριθμου tridicon SGM δεν ακολουθεί τα δεδομένα βάσης του κτηματολογίου στην παρούσα μηκοτομή, παρουσιάζοντας σημαντικές αποκλίσεις ειδικά στις έντονες τοπογραφικά μορφές. Τα αποτελέσματα αυτά οδηγούν στην διενέργεια επιπλέον προσπαθειών με χρήση του εμπορικού λογισμικού. Συγκεκριμένα με σκοπό την διακρίβωση αν τα σφάλματα οφείλονται σε λάθος χειρισμό των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε δημιουργία ΨΜΕ με την χρήση της ρουτίνας του λογισμικού Classic ATE με τα ίδια δεδομένα, και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα βάσης. Έτσι προέκυψε η παρακάτω μηκοτομή:

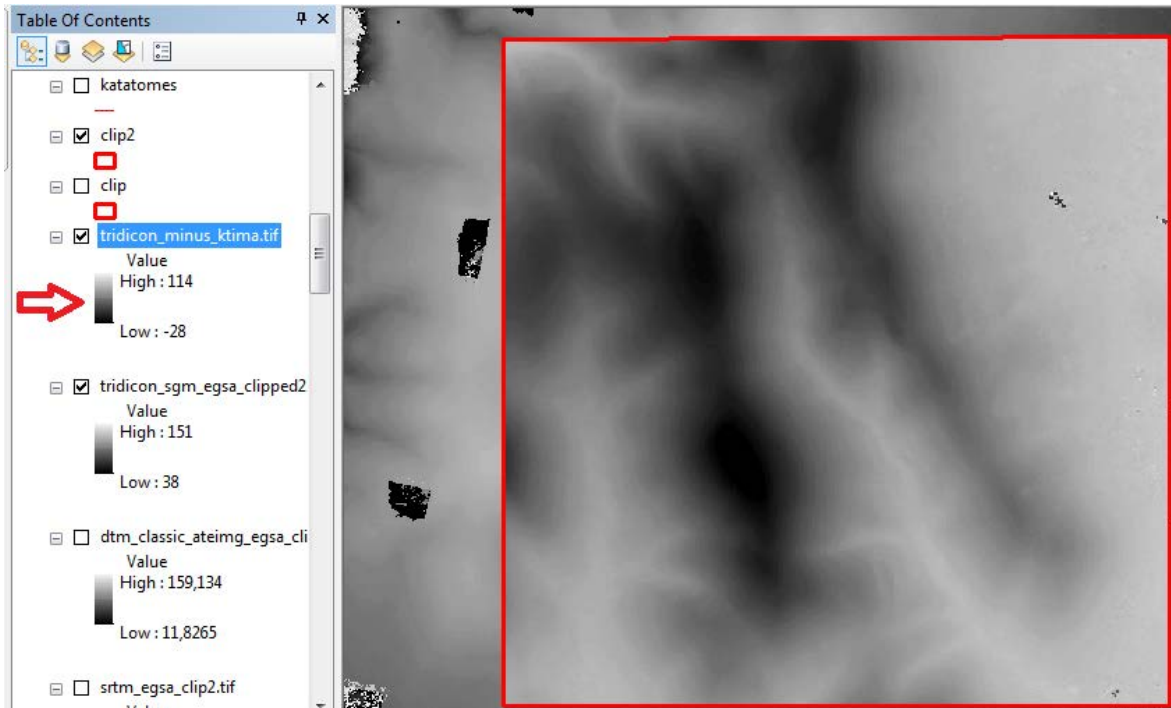


Εικόνα 69 Μηκτομή Σύγκρισης ΨΜΕ

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή του Classic ATE, αν και πρόκειται για παλαιότερο custom αλγόριθμο παρουσιάζει πάρα πολύ καλά αποτελέσματα με το ίδιο σετ δεδομένων. ;Ετσι συνάγεται ασφαλώς το συμπέρασμα ότι η αδυναμία οφείλεται στον τρόπο εφαρμογής του αλγορίθμου SGM απο το λογισμικό και όχι στην κακή ποιότητα των δεδομένων ή στην εσφαλμένη εκτέλεση των φωτογραμμετρικών διεργασιών.

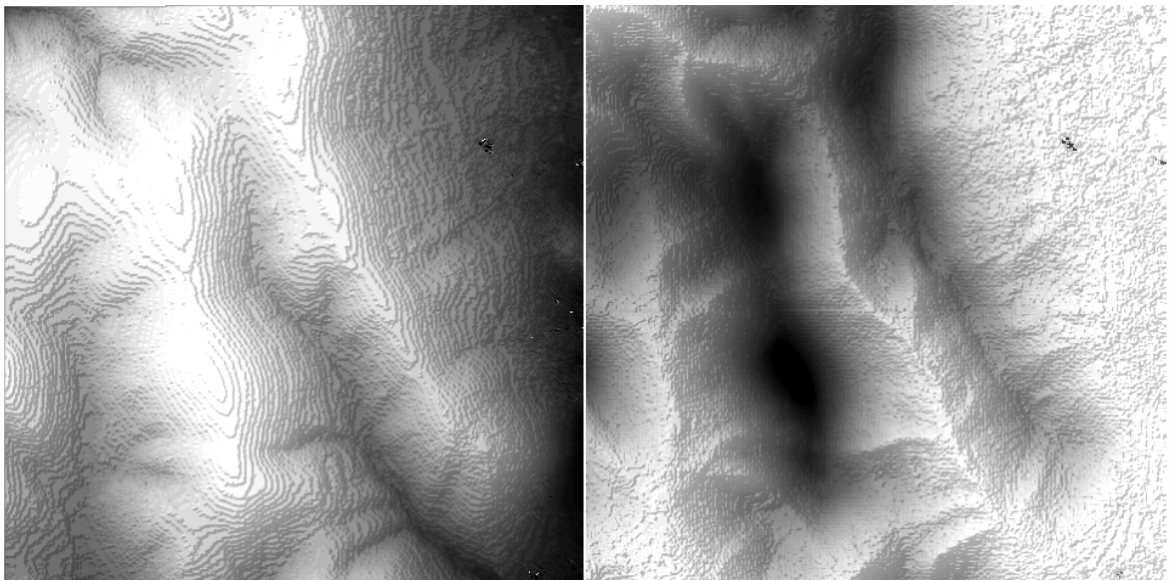
6.2.1.6.3 Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από Κτηματολόγιο Α.Ε.

Για λόγους πληρότητας πραγματοποιείται αφαίρεση ανά εικονοστοιχείο με την χρήση των δεδομένων του κτηματολογίου για την οπτικοποίηση των υψομετρικών διαφορών που παρουσιάζουν τα δύο ΨΜΕ.



Εικόνα 70 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

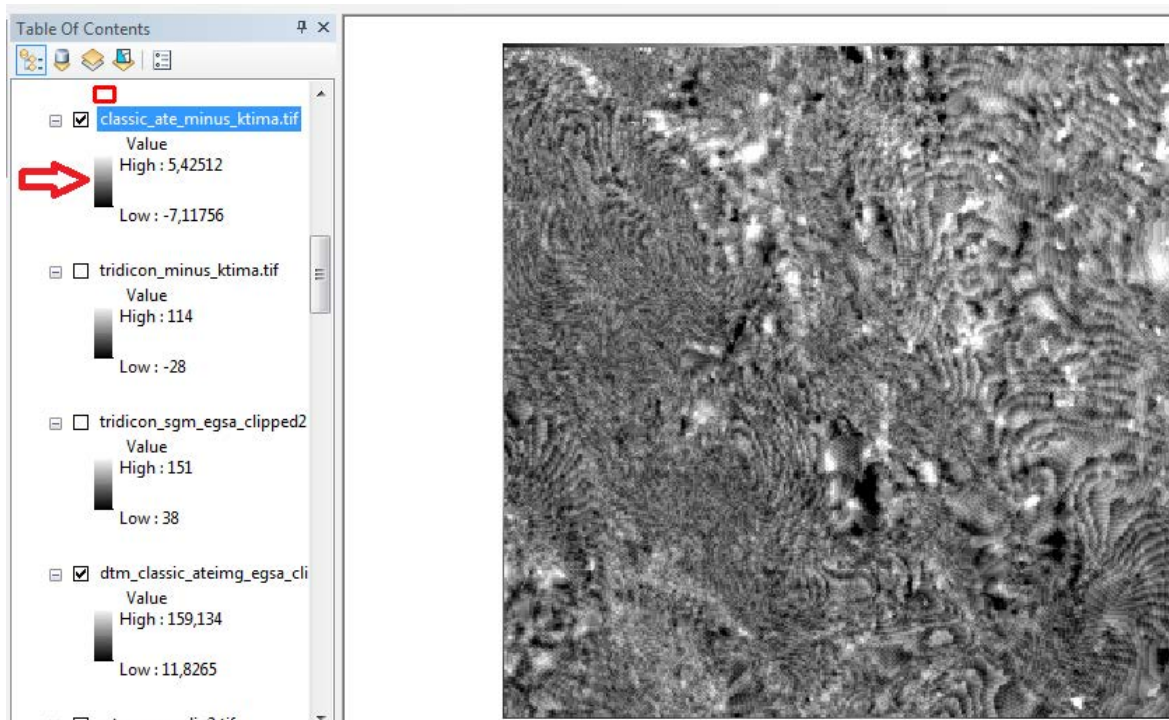
Παρατηρούνται σημαντικές υψομετρικές διαφορές μεταξύ του υλοποιημένου αλγορίθμου και των δεδομένων βάσης του κτηματολογίου. Οι διαφορές αυτές λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές στις έντονα τοπογραφικά μορφές αφού ο αλγόριθμος τείνει να "υποβαθμίζει- εξομαλύνει" τις τοπογραφικές εξάρσεις, όπως φαίνεται και από την συγκριτική παράθεση με σκίαση αναγλύφου των υψομετρικών διαφορών και των δεδομένων βάσης της εξεταζόμενης περιοχής.



Εικόνα 71 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς σε μορφή hillshade

Αριστερά παρουσιάζεται το ΨΜΕ απο τον tridicon SGM και δεξιά οι υψομετρικές διαφορές, οι οποίες λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές στις κορυφές και στις χαράδρες και τις μικρότερες στις ομαλές επιφάνειες.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί το ΨΜΕ που δημιουργήθηκε με τον Classic ATE, η εικόνα που προκύπτει με την κατα εικονοστοιχείο αφαίρεση με τα δεδομένα του κτηματολογίου είναι η παρακάτω:

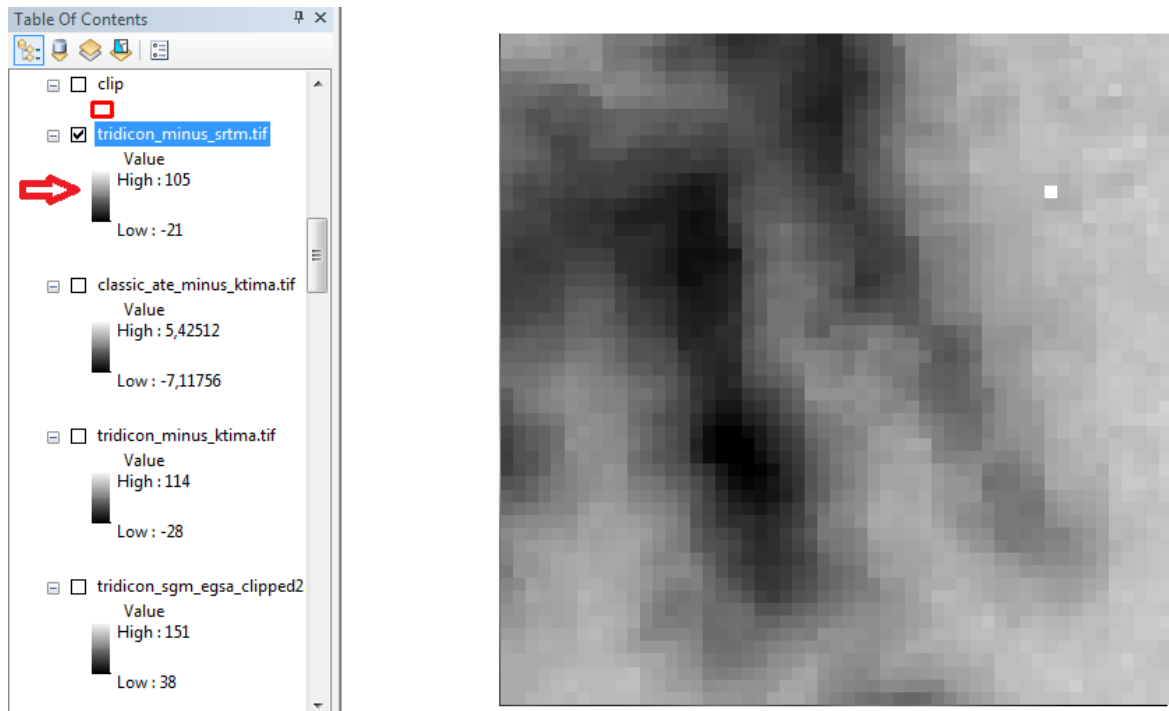


Εικόνα 72 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

Παρατηρείται μια τυχαιότητα στα προκύπτοντα σφάλματα τα οποία βρίσκονται εντός των ορίων ακρίβειας των δεδομένων βάσης και παρουσιάζουν πάρα πολύ καλή σύμπτωση για το σύνολο της περιοχής ελέγχου.

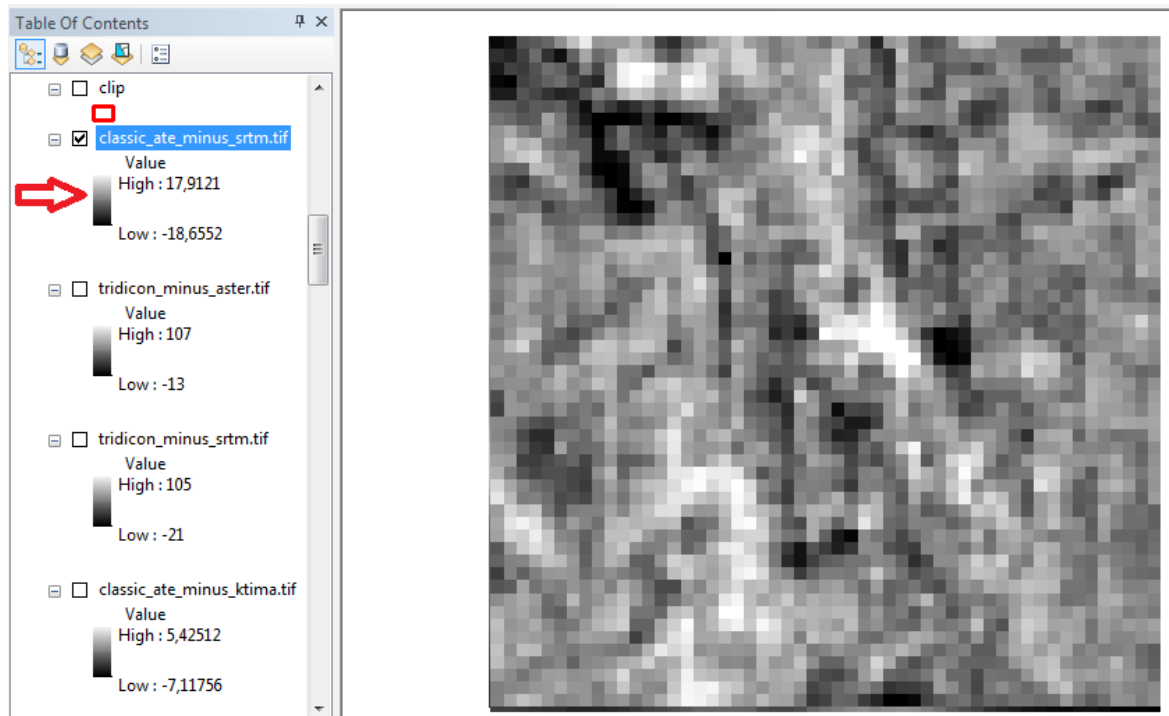
6.2.1.6.4 Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα SRTM και ASTER.

Για λόγους πληρότητας πραγματοποιείται αφαίρεση ανά εικονοστοιχείο με την χρήση των δεδομένων των δορυφορικών αποστολών SRTM και ASTER για την οπτικοποίηση των υψομετρικών διαφορών που παρουσιάζουν τα δύο ΨΜΕ.



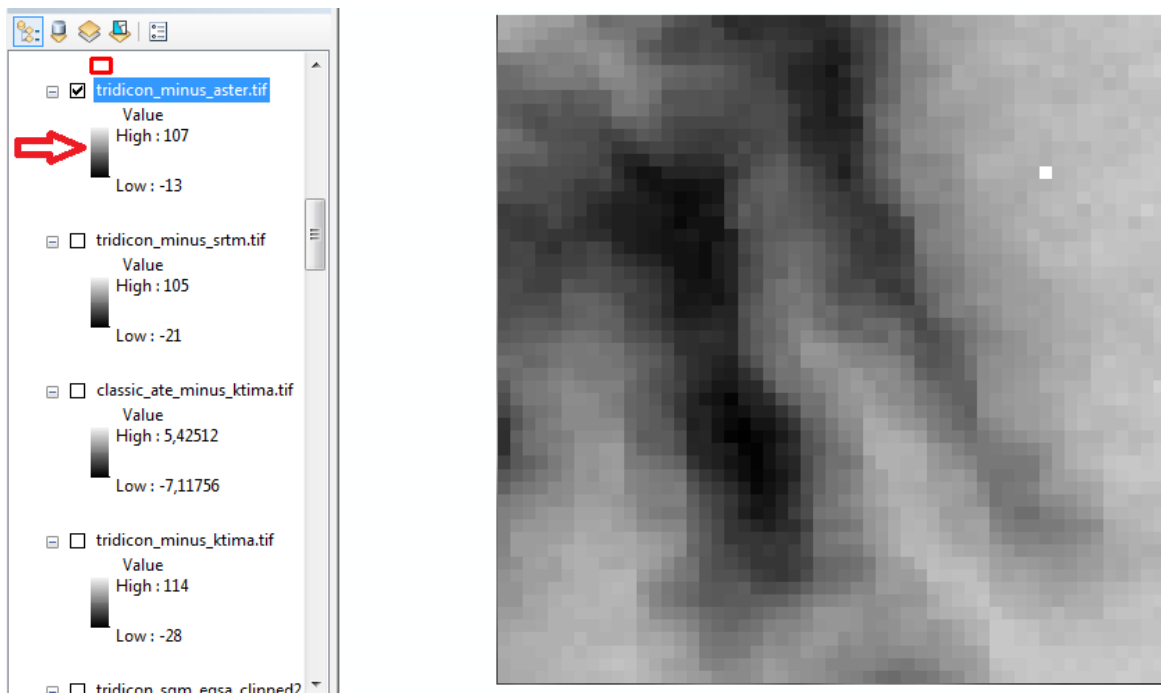
Εικόνα 73 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

Παρατηρούνται σημαντικές υψομετρικές διαφορές μεταξύ του υλοποιημένου αλγορίθμου και των δεδομένων βάσης από την δορυφορική αποστολή SRTM. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία για το ΨΜΕ που δημιουργήθηκε με την χρήση του αλγορίθμου classic ATE.



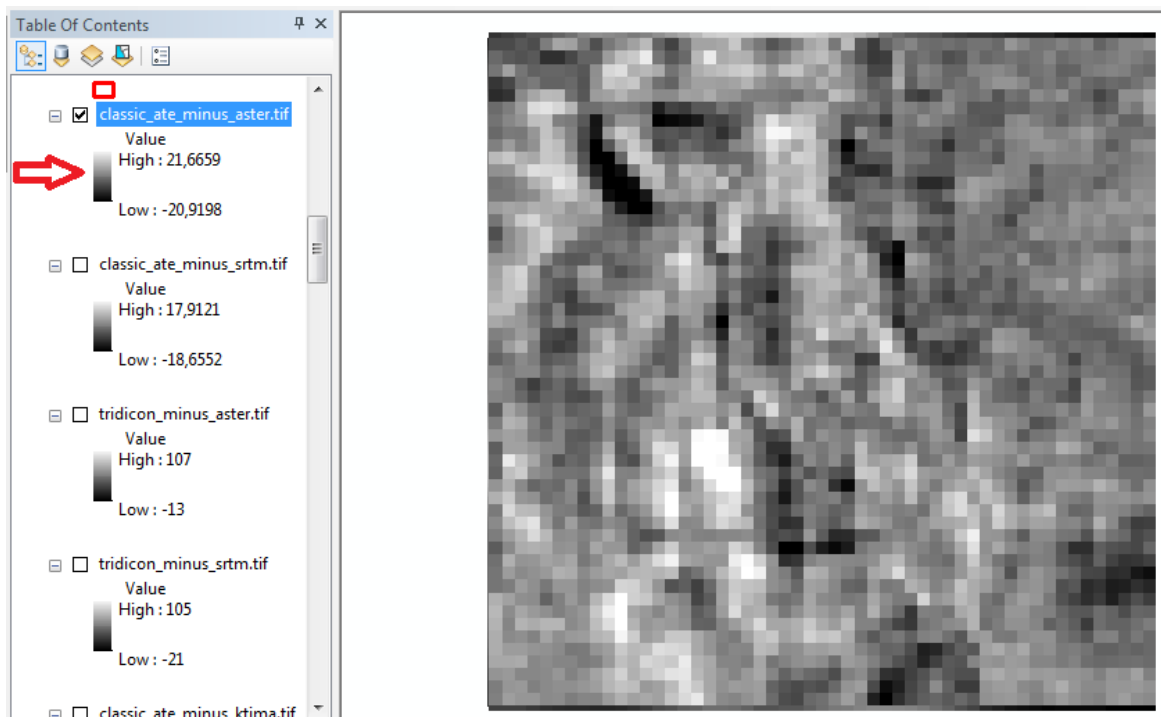
Εικόνα 74 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

Τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά και εντός των αποδεκτών ορίων για το σύνολο του υπο εξέταση ΨΜΕ. Συγκεκριμένα οι υψομετρικές διαφορές είναι μεταξύ $\pm 15 \mu$, τιμές απόλυτα αποδεκτές για το ΨΜΕ SRTM βήματος 30μ.



Εικόνα 75 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται για την ανά εικονοστοιχείο ψηφιακή σύγκριση του παραγόμενου ΨΜΕ, με αυτό που προέκυψε από την δορυφορική αποστολή ASTER. Το ΨΜΕ ASTER χαρακτηρίζεται ως προϊόν χαμηλότερης ακρίβειας σε σχέση με το SRTM και η σύγκρισή του με το ΨΜΕ από τις ρεϊάδες, συνηγορεί στο συμπέρασμα αυτό, αφού παρατηρούνται αποδεκτές αλλά μεγαλύτερες διαφορές τόσο για την σύγκριση με τον tridicon SGM όσο και με τον αλγόριθμο classic ATE.



Εικόνα 76 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

6.3 Εφαρμογή του Αλγόριθμου με την χρήση του αλγορίθμου S2P (Satellite Stereo Pipeline) και του συνοδευτικού διαδικτυακού εργαλείου

Η εφαρμογή του αλγορίθμου semi global matching σε δορυφορικές εικόνες αποτελεί μια απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία, η οποία απαιτεί τον χειρισμό δεδομένων τα οποία δεν ακολουθούν το μοντέλο την κάμερας σημειακής οπής (pinhole camera). Αντίθετα το μοντέλο του γραμμικού σαρωτή, που ακολουθείται, έχει ως αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα των μεθόδων χειρισμού αλλά και τις πολύ μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Το παραπάνω γεγονός, οδήγησε στην εφαρμογή του αλγορίθμου του satellite stereo pipeline, ο οποίος παρουσιάζει την δυνατότητα κατάτμησης της εικόνας και την επιμέρους εκτέλεση των διαδικασιών στέρεο συνταύτισης.

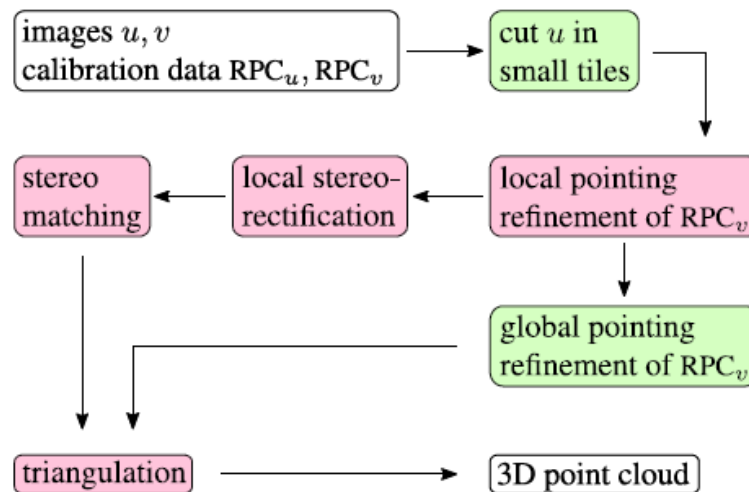
6.3.1 Μεθοδολογία εφαρμογής

6.3.1.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία εφαρμογής satellite stereo pipeline, έχει εφαρμοστεί σε δορυφορικές εικόνες από τους αισθητήρες pleiades, worldview και Ikonos και η φιλοσοφία της μεθόδου έγκειται στην απεμπλοκή της διαδικασίας εφαρμογής του αλγορίθμου από τις δυσχέρειες που παρουσιάζει η γεωμετρία λήψης των δορυφορικών εικόνων τύπου pushbroom. Με την κατάτμηση της εικόνας σε μικρότερα τμήματα και την εφαρμογή σε αυτά αλγορίθμων της όρασης υπολογιστών που εφαρμόζονται σε κάμερες σημειακής οπής, επιτυγχάνεται η εκτέλεση του αλγόριθμου SGM με την κλασσική διαδικασία, το προκύπτον δε σφάλμα από την διαδικασία αυτή είναι μικρότερο από 1/10 του pixel, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικά επίπεδα ακρίβειας.

Για την εκτέλεση των διορθώσεων σε κάθε τμήμα της αρχικής εικόνας, απαιτείται η γνώση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας. Συνήθως όμως η χρήση των πολυωνύμων RPC δεν εξασφαλίζει την απαιτούμενη ακρίβεια και απαιτείται η χρήση φωτοσταθερών. Με την περιγραφόμενη διαδικασία η απαίτηση αυτή παρακάμπτεται.

Η διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά στο παρακάτω γράφημα. Ως στοιχεία εισόδου θεωρούνται οι εικόνες με τα αντίστοιχα πολυώνυμα RPC. Κάθε εικόνα κόβεται σε μικρότερα τμήματα και στο δημιουργούμενο τμήμα, πραγματοποιείται βελτίωση των πολυωνύμων RPC και στην συνέχεια στερεοσκοπική συνταύτιση κάθε τμήματος με την χρήση του αλγόριθμου SGM. Στην συνέχεια οι τοπικές διορθώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ολικών διορθώσεων και στην συνέχεια την εκτέλεση του τριγωνισμού στην χρησιμοποιούμενη τριάδα εικόνων.



Εικόνα 77 Διάγραμμα Ροής Satellite Stereo Pipeline

Για τις κάμερες που ακολουθούν το μοντέλο της σημειακής οπής, η εκτέλεση της στερεοσκοπικής συνταύτισης αποτελεί ουσιαστικό βήμα στη διαδικασία επιπολικής επανασύστασης. Αναλυτικότερα για τις κάμερες αυτές ισχύει ότι αν ένα σημείο στην εικόνα X βρίσκεται στην επιπολική γραμμή της αριστερής εικόνας, το αντίστοιχο σημείο θα βρίσκεται στην επιπολική γραμμή της δεξιάς εικόνας. Η επιπολική επανασύσταση έχει ως σκοπό τον προβολικό μετασχηματισμό της εικόνας με τέτοιο τρόπο, ώστε οι επιπολικές γραμμές να καταστούν παράλληλες και η διαδικασία συνταύτισης να περιοριστεί σε μια διάσταση. Οι δορυφορικές εικόνες όμως δεν μπορούν να υποστούν επιπολική επανασύσταση γιατί οι δέκτες είναι τύπου pushbroom δεν διαθέτουν ευθείες επιπολικές γραμμές, αλλά καμπύλες υπερβολικής μορφής (Orun et al. 1994, Oh et al. 2010). Τρεις είναι οι κύριες μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν για την παράκαμψη του προβλήματος και συνοψίζονται στις παρακάτω επιλογές:

α. Να μην εκτελεστεί καμιά μετατροπή. Να εκτελεστούν οι αλγόριθμοι πυκνής συνταύτισης χωρίς την εκτέλεση επιπολικής επανασύστασης αλλά με την εκτέλεση των αλγορίθμων κατά μήκος των υπερβολικών γραμμών, με συνέπεια την πολυπλοκότητα των αλγοριθμικών υπολογισμών και την μη δυνατότητα χρήσης της πλειάδας των έτοιμων μεθόδων πυκνής συνταύτισης. Αποτελεί διαδικασία εξαιρετικά κοστοβόρα υπολογιστικά, που μπορεί με την υπάρχουσα ισχύ των υπολογιστών να καταστήσει την διαδικασία σχεδόν ανέφικτη.

β. Η χρήση της προσέγγισης του αφινικού μοντέλου. Σύμφωνα με το οποίο, συχνά με την χρήση φωτοσταθερών γίνεται προσέγγιση της γεωμετρίας του δέκτη για κάθε κομμάτι της εικόνας, με αποτέλεσμα ακρίβεια της τάξεως του 1 pixel στο σύνολο της εικόνας.

γ. Ο Oh (Oh et al. 2010) προτείνει την χρήση της μεθόδου της πολυωνυμικής επιπολικής επανασύστασης, όπου θεωρώντας μικρές μεταβολές υψών, είναι δυνατός ο τμηματικός υπολογισμός των επιπολικών καμπυλών, στην συνέχεια η συνένωσή τους και η μετέπειτα δημιουργία της τελικής επιπολικής καμπύλης, ώστε να καταστεί δυνατή η μετατροπή τους σε ευθείες γραμμές και η τελική διευκόλυνση στην εκτέλεση των αλγορίθμων. Τα σφάλματα που επιτυγχάνονται είναι της τάξης του 1 pixel.

Από τα παραπάνω προτεινόμενα μοντέλα το αφινικό μοντέλο κάμερας παρουσιάζει τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα (Okamoto et al., 1993) αφού:

α. Οι απεικονιζόμενες υψομετρικές διαφορές είναι μικρές σε σχέση με το μεγάλο ύψος πτήσης των δορυφόρων, που είναι της τάξης των 700km.

β. Η γωνία θέασης είναι εξαιρετικά μικρή, της τάξης των λίγων μοιρών

γ. Ο χρόνος έκθεσης για ένα τμήμα της εικόνας είναι μικρότερος από ένα δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού να παραμένουν σταθερά.

Επομένως ως καταλληλότερο επιλέγεται το αφινικό μοντέλο κάμερας και το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό του πίνακα F. Για τον υπολογισμό του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα (fundamental matrix) απαιτείται η εύρεση ομόλογων σημείων μεταξύ των δύο τμημάτων. Η μέχρι τώρα πρακτική περιελάμβανε την χρήση τελεστών όπως ο SIFT και ο SURF για την εύρεση επτά ή περισσότερων ομόλογων σημείων μεταξύ των δύο όψεων, αν τα σημεία αυτά βρίσκονται επί ενός επιπέδου τότε ο πίνακας F δεν μπορεί να υπολογιστεί. Με την χρήση όμως στοιχείων βαθμονόμησης (Oh et al. 2010) είναι δυνατός ο υπολογισμός του πίνακα F με την χρήση εικονικών αντιστοιχίσεων μεταξύ των δύο όψεων.

Έτσι αν θεωρηθεί μια περιοχή της εικόνας Ω και ένα εκτιμώμενο υψομετρικό εύρος (h_m, h_M) των σημείων που απεικονίστηκαν στην περιοχή της εικόνας Ω . Αν θεωρηθεί με τον συμβολισμό RPC η συσχέτιση μεταξύ του απεικονιζόμενου τρισδιάστατου χώρου και του δισδιάστατου χώρου της εικόνας, τότε με τον συμβολισμό RPC^{-1} , εννοείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός από τον χώρο της εικόνας στην φυσική γήινη επιφάνεια. Έτσι αν θεωρηθεί ένα σύνολο σημείο στον τρισδιάστατο χώρο X_1, X_2, X_3, \dots τότε αυτά με την χρήση των πολυωνύμων RPC, προβάλλονται στις αντίστοιχες εικόνες ως σημεία x_1, x_2, x_3, \dots και x'_1, x'_2, x'_3, \dots αντίστοιχα. Τα σημεία αυτά μπορεί να μην αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο οπτικό περιεχόμενο (σημεία στην εικόνα), αλλά αυτό είναι αρκετό για τον υπολογισμό του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα F. Ως βέλτιστο μέγεθος τμήματος εικόνας για την εκτέλεση του αλγορίθμου θεωρείται αυτό με διάσταση 1000×1000 pixel, δηλαδή για τις δορυφορικές εικόνες pleiades έκτασης $500 \times 500m$.

Τα πολυώνυμα RPC προσδίδουν μια συστηματική μετατόπιση, λόγω της αδυναμίας τους να περιγράψουν με ακρίβεια τον μετασχηματισμό, για αυτό και είναι απαραίτητη η χρήση ενός ή περισσότερων φωτοσταθερών για την μείωση ή εξάλειψη αυτής της συστηματικής μετατόπισης. Ομως για την εκτέλεση της επιπολικής επανασύστασης είναι απαραίτητη η ύπαρξη της μέγιστης ακρίβειας. Επομένως είναι απαραίτητη η διόρθωση αυτής της μετατόπισης πριν από την εκτέλεση της επιπολικής επανασύστασης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν χρησιμοποιεί φωτοσταθερά αλλά την σχετική συνέπεια (right - left consistency) στο οπτικό περιεχόμενο των 2 εικόνων.

Επομένως η επιπολική καμπύλη μπορεί να οριστεί ως εξής: Εστω 2 εικόνες u, y αν x το σημείο στην μια εικόνα τότε η συνάρτηση

$$epi_{uy}^x : h \rightarrow RPC_u(RPC_y^{-1}(x, h))$$

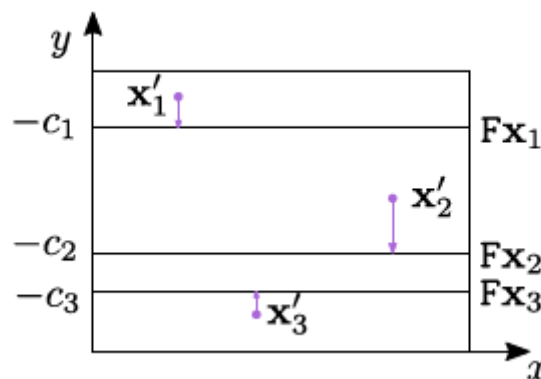
περιγράφει μια επιπολική καμπύλη, η οποία περιέχει το σύνολο όλων των αντιστοιχίσεων για τις διαφορετικές τιμές υψομέτρου. Με την χρήση των επιπολικών καμπυλών είναι δυνατή η εύρεση του υψομέτρου h ενός τυχαίου σημείου X . Αφού αν το

σημείο αυτό απεικονίζεται ως σημείο x στην μια εικόνα τότε με την χρήση των πολυωνύμων RPC το αντίστοιχο σημείο στην άλλη εικόνα κείται επι της επιπολικής καμπύλης και αν αυτό το σημείο είναι το x' , τότε είναι δυνατή η εύρεση του h . Επειδή όμως όπως προαναφέρθηκε η χρήση των πολυωνύμων RPC δεν παρουσιάζει την απαραίτητη ακρίβεια, η διαφορά της ορθής από την προβαλλόμενη θέση καλείται δείκτης σχετικού σφάλματος το οποίο παρουσιάζει μέγεθος των αρκετών pixel. Ο δείκτης σχετικού λάθους μαθηματικά ορίζεται ως

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(x'_i, \text{epi}_{uv}^{x_i}(\mathbf{R})).$$

δηλαδή ο δείκτης σχετικού λάθους προκύπτει ως ο μέσος όρος της διαφοράς της θέσης των σημείων όπως προκύπτουν από την χρήση των πολυωνύμων RPC και όπως εμφανίζονται στις εικόνες. Το μέγεθος μετράται σε pixels και οι αντιστοιχίες των 2 σημείων βρίσκονται με την χρήση του τελεστή SIFT.

Για την μοντελοποίηση του λάθους είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι είναι αποτέλεσμα μιας μόνο μετατόπισης. Έτσι με δεδομένες 2 εικόνες και μια σειρά ομόλογων σημείων $(x_i, x'_i)_{i=1..n}$ αναζητείται μια διανυσματική μετατόπιση T τέτοια ώστε όταν επενεργήσει επί των σημείων x'_i τα προκύπτοντα σημεία να ευρίσκονται επί της επιπολικής καμπύλης $\text{epi}_{uv}^{x_i}$



Εικόνα 78 Συστηματικό Σφάλμα Υπολογισμών Επιπολικής Γραμμής

$$T^* = \arg \min_T \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(Tx'_i, \text{epi}_{uv}^{x_i}(\mathbf{R})).$$

Ο παραπάνω μαθηματικός τύπος αντιστοιχεί στον γεωμετρικό μέσο των σημείων (median). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιπολική καμπύλη προσεγγίζεται από την επιπολική γραμμή Fx_i , με τον F να αποτελεί τον δεσμευμένο επιπολικό πίνακα με ακρίβεια που είναι καλύτερη από 0.05 pixel. Αυτή η επιπολική γραμμή μπορεί να γραφεί σε ομογενείς συντεταγμένες με την μορφή

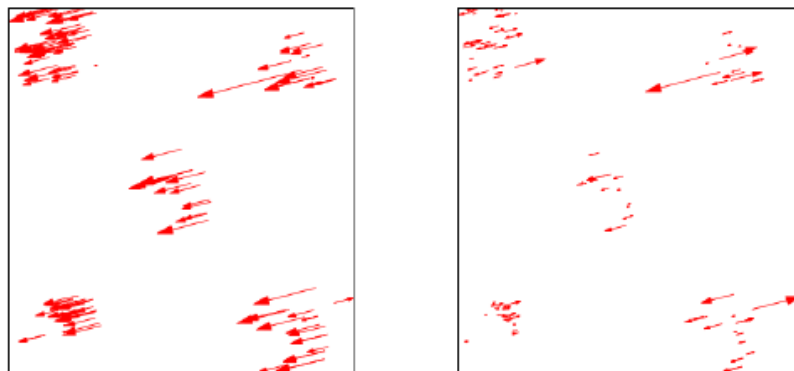
$$Fx_i = [0 \ 1 \ c_i]^T$$

Επομένως η απόσταση μεταξύ των x_i και x'_i και μπορεί να γραφεί σε μορφή εξίσωσης

$d(x'_i, Fx_i) = |y'_i + c_i|$ όπου το x'_i σε ομογενείς συντεταγμένες γράφεται $x'_i = (x'_i, y'_i, 1)^T$, επίσης, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η διανυσματική μετατόπιση περιορίζεται μόνο κατά τον άξονα y με μια παράμετρο που καλείται t . Έτσι το σφάλμα μπορεί να γραφεί στην μορφή

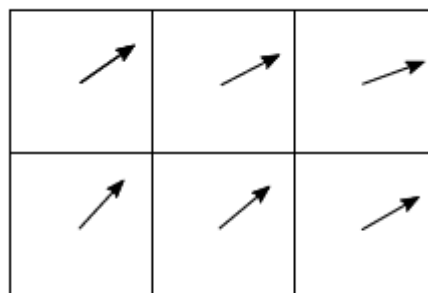
$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(Tx'_i, Fx_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y'_i + t + c_i|$$

επομένως η μετατόπιση αυτή είναι ίση με τον γεωμετρικό μέσο των σημείων, δηλαδή με την τιμή εκείνη η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα των αποστάσεων για το σύνολο σημείων που επελέγησαν. Τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται βέλτιστα στην παρακάτω απεικόνιση



Εικόνα 79 Υπόλοιπα Υπολογισμών Επιπολικής Γραμμής

Τα αποτελέσματα από κάθε τμήμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της συνολικής διόρθωσης στην εικόνα 79. Με την εφαρμογή ενός αφινικού μετασχηματισμού με την χρήση των επιμέρους διανυσματικών διορθώσεων, διορθώνεται ο δείκτης σχετικού λάθους θέσης για όλη την εικόνα.



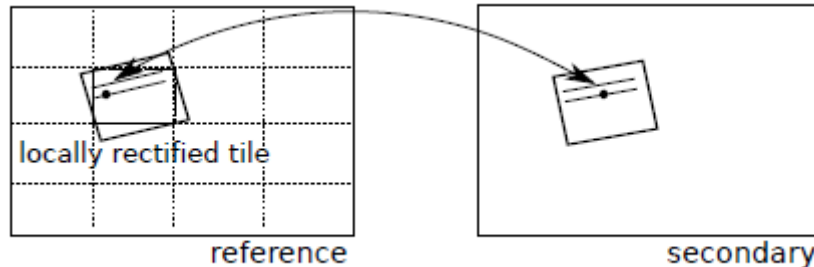
Εικόνα 80 Συνολικά Υπόλοιπα Υπολογισμών Επιπολικής Γραμμής

όπως αυτό εμφανίζεται στην εικόνα 80.

6.3.1.2 Στέρεο Συνταύτιση και Τριγωνισμός

Για την εκτέλεση της πυκνής συνταύτισης και τον υπολογισμό της παράλλαξης για κάθε εικονοστοιχείο εκτελείται ο αλγόριθμος SGM. Με την εύρεση των ομόλογων σημείων είναι δυνατός ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων ως προς το σύστημα

αναφοράς της πρώτης εικόνας και ο μετέπειτα τρισδιάστατος προσδιορισμός θέσης του σημείου που καταγράφηκε στις 2 διαφορετικές εικόνες με την χρήση των κλασματικών πολυωνύμων RPC. Με την χρήση των δεδομένων SRTM και των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την μείωση του δείκτη σχετικού λάθους θέσης πραγματοποιείται η αρχική εκτίμηση του εύρους των τιμών παράλλαξης για τον μετέπειτα τελικό υπολογισμό των υψομέτρων.



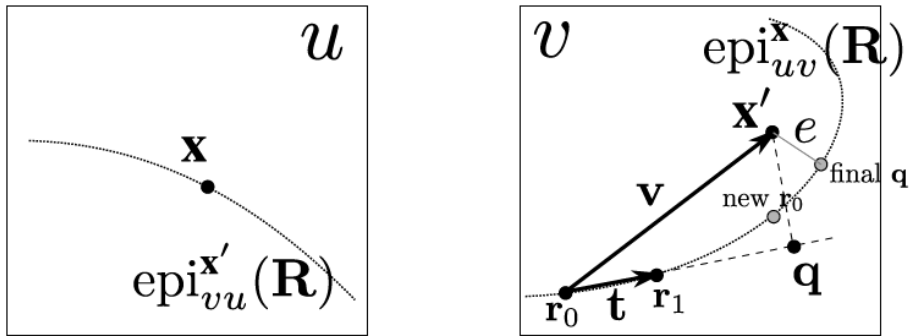
Εικόνα 81 Εκτέλεση Υπολογισμών Εύρεσης Τιμών Παράλλαξης

6.3.1.3 Αλγόριθμος εύρεσης υψομέτρου

Για την εύρεση των ομόλογων σημείων και με δεδομένη την αδυναμία των πολυωνύμων RPC να περιγράψουν ακριβώς την συσχέτιση μεταξύ τρισδιάστατου κόσμου και δισδιάστατης εικόνας, ακολουθείται ο αλγόριθμος, που περιγράφεται αδρομερώς με την παρακάτω διαδικασία.

Ως στοιχεία εισόδου θεωρούνται οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου χ, χ' καθώς και τα κλασματικά πολυώνυμα που περιγράφουν τις 2 εικόνες RPC_u, RPC_v . Τα μειωμένης ακρίβειας κλασματικά πολυώνυμα RPC έχουν ως αποτέλεσμα την μειωμένη ακρίβεια στον υπολογισμό του ομόλογου σημείου x και την απόσταση αυτού από την επιπολική καμπύλη. Ο αλγόριθμος δρα επαναληπτικά με τον υπολογισμό του υψομέτρου h από την αντιστοίχιση των x, q (όπου q η προβολή του χ' επί της ομόλογης επιπολικής καμπύλης). Ο αλγόριθμος αυξάνει την τιμή του υψομέτρου κατά ένα βήμα τέτοιο ώστε το προκύπτον r_0 σημείο να είναι όσο το δυνατόν εγγύτερα στο χ' , το υψόμετρο αυξάνεται προσεγγίζοντας την επιπολική καμπύλη ως γραμμική, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα.

1. $h = 0$;
2. $h_{INC} = \infty$;
3. $h_{STEP} = 1$;
4. while $h_{INC} > 10^{-7}$ do
5. $r_0 = epix_{uv}(h)$;
6. $r1 = epix_{uv}(h + h_{STEP})$;
7. $t = r1 - r0$;
8. $v = x0 - r0$;
9. $h_{INC} = t^T v / t^2$;
- 10 $q = r_0 + h_{INC} \cdot t$; /* q η προβολή του v επί του t */
- 11 $e = kq - x0k$;
- 12 $h = h + h_{INC} \cdot h_{STEP}$;



Εικόνα 82 Διόρθωση Σφάλματος Εύρεσης Ομόλογων Σημείων

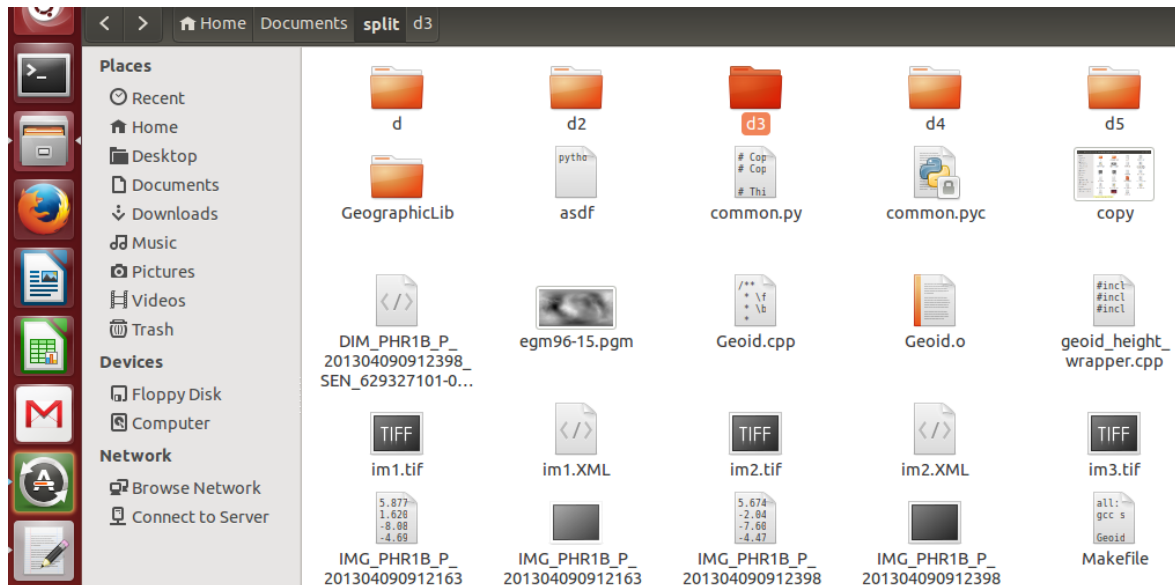
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται επαναληπτικά για το σύνολο των υποπεριοχών στις οποίες κόβεται η εικόνα για την εκτέλεση του αλγορίθμου.

6.3.2 Μέθοδοι Εφαρμογής

6.3.2.1 Χρήση του διαδικτυακού εργαλείου S2p

Για την εκτέλεση του διαδικτυακού εργαλείου απαιτείται πρόσβαση στο ίντερνετ και συγκεκριμένα στην διεύθυνση http://lime.onh.hw.ipol.im/workshop_s2p/, όπου οι δημιουργοί του λογισμικού έχουν κατασκευάσει ένα online εργαλείο για την εκτέλεση του αλγορίθμου satellite stereo pipeline (s2p). Επειδή οι πρωταρχικές εικόνες είναι σε μορφή .jp2 αρχικά απαιτείται η μετατροπή τους σε .tiff με την χρήση εμπορικού λογισμικού. Στην συνέχεια λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων του server από πλευράς αποθηκευτικού χώρου, απαιτείται η κατάτμηση των εικόνων έτσι ώστε το μέγεθος του ζεύγους μαζί με τα συνοδευτικά πολυώνυμα RPC να μην ξεπερνά τα 100MB. Αυτό αντιστοιχεί σε τμήματα εικόνων με μέγεθος περίπου 3000 pixels. Για την εκτέλεση της κατάτμησης στις αρχικές εικόνες, απαιτείται η χρήση ενός εργαλείου που καλείται RPC cropper και εκτελείται σε μορφή γραμμής εντολών σε περιβάλλον linux.

Συγκεκριμένα το σύνολο του κώδικα μαζί με τις υπό επεξεργασία εικόνες βρίσκεται στον ίδιο φάκελο και δημιουργείται ένας υποφάκελος στον οποίο θα αποθηκευτούν τα παράγωγα αρχεία.



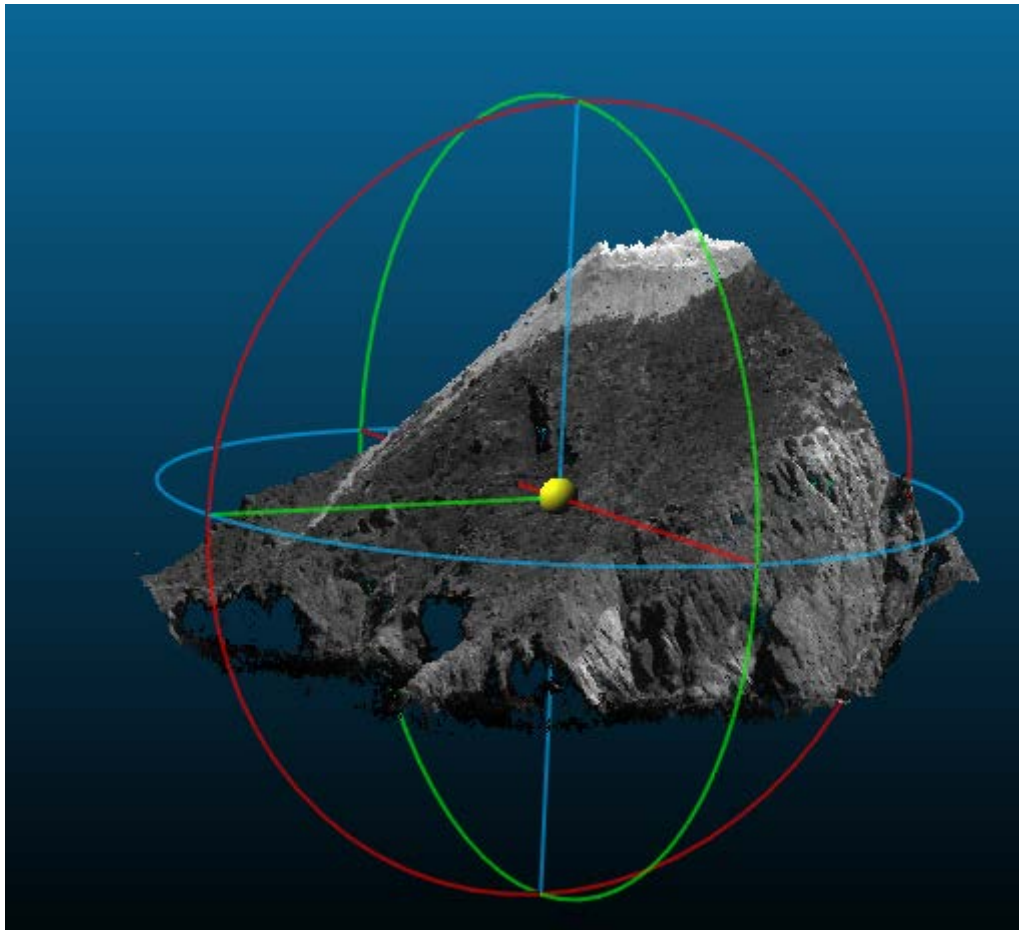
Εικόνα 83 Εκτέλεση RPC crop

Με την χρήση του τερματικού η κλήση της ρουτίνας γίνεται εκτελώντας την εντολή. Για την εκτέλεση του εργαλείου δεν απαιτείται μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα (compilation), διότι αυτή πραγματοποιείται αυτόματα κατά την πρώτη κλήση του προγράμματος.

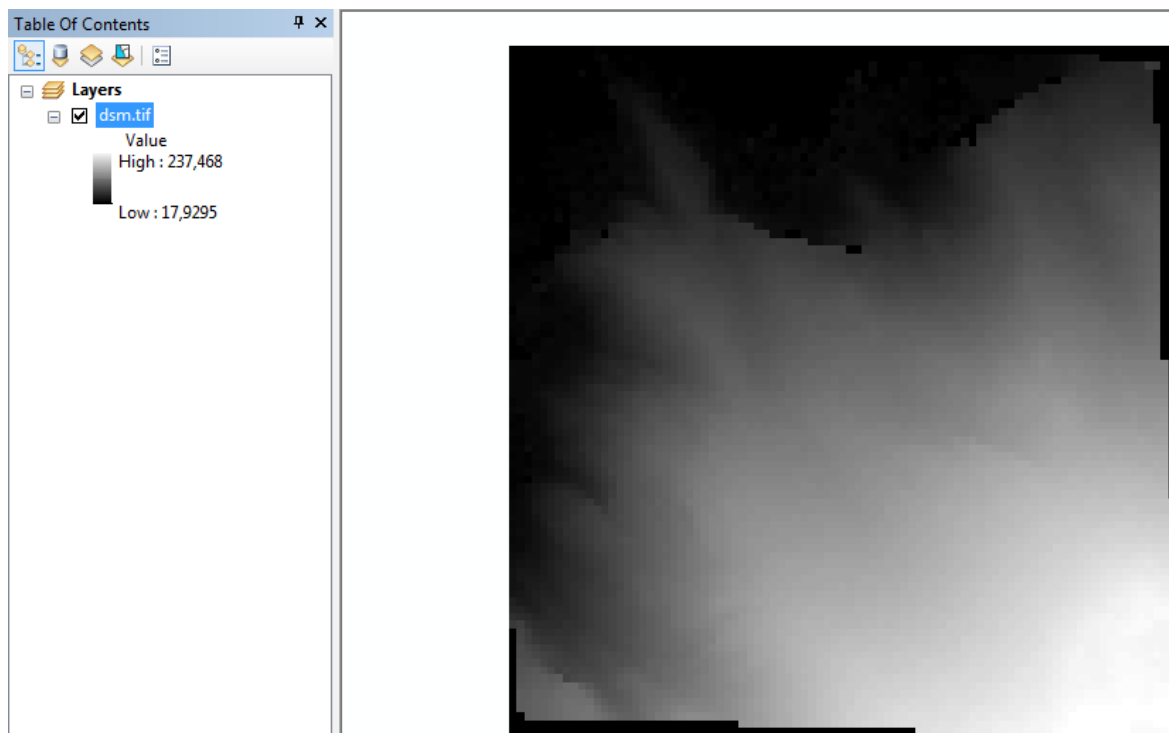
```
$. /rpc_crop.py d3 im1.tif im1.xml im2.tif im2.xml 12000 14000 5000 5000
```

Με την εκτέλεση του προγράμματος η κομμένη εικόνα μαζί με το συνοδευτικό αρχείο RPC αποθηκεύεται στο φάκελο d3 και η αποκοπή της εικόνας πραγματοποιείται με έναρξη το pixel (12000, 14000) (στήλη και γραμμή αντίστοιχα) και το μέγεθος της εικόνας είναι 3000 pixel. Ενώ το μέγεθος της δεύτερης εικόνας είναι το ίδιο και είναι κομμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνει την ίδια περιοχή. Αυτό γίνεται με την χρήση δεδομένων SRTM και η εκτέλεσή του απαιτεί σύνδεση στο διαδίκτυο για το κατέβασμα των δεδομένων αυτών. Ενώ με την κατάλληλη τροποποίηση της εκτέλεσης του εργαλείου δίνεται η δυνατότητα για την επιλογή της περιοχής αποκοπής μέσω γραφικής διεπαφής (graphics interface).

Τα παράγωγα της παραπάνω διαδικασίας αποθηκεύονται στον φάκελο και είναι έτοιμα για την μεταφόρτωσή τους στο διαδικτυακό εργαλείο. Με την σειρά μεταφορτώνονται η πρώτη εικόνα, η δεύτερη και τα 2 συνοδευτικά αρχεία. Στην συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος και τα παράγωγα παρουσιάζονται με την χρήση του φυλλομετρητή σε νέα παράθυρα και περιλαμβάνουν το τρισδιάστατο νέφος σημείων με τις τιμές έντασης κάθε εικόνας καθώς και το παραγόμενο ΨΜΕ. Τα παράγωγα αυτά φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν και παρουσιάζονται τόσο το παραγόμενο νέφος σημείων όσο και το ΨΜΕ. Τα παράγωγα καθώς και το σύνολο των επεξεργασμένων στοιχείων μπορούν να αποθηκευτούν τοπικά και να διερευνηθεί η όλη ροή εργασιών.

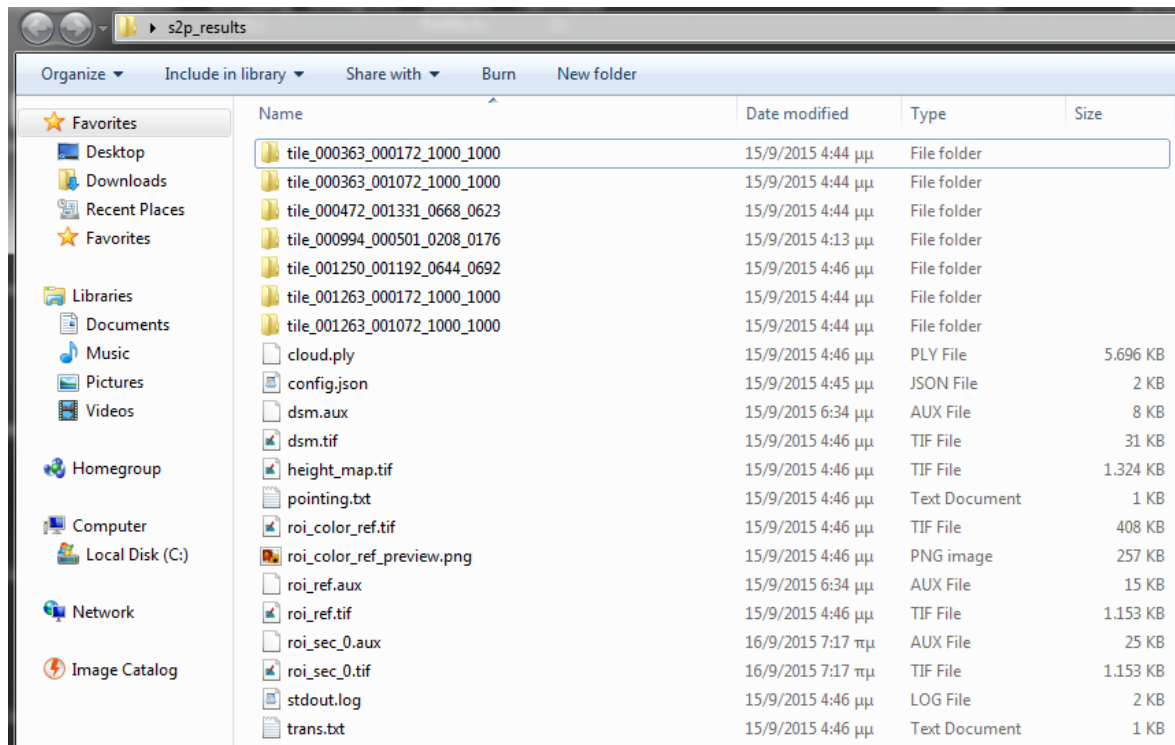


Εικόνα 84 3d point cloud σε Cloud compare



Εικόνα 85 ΨΜΕ σε περιβάλλον Arcgis

Συγκεκριμένα μετά το κατέβασμα των αρχείων παρατηρείται η παρακάτω δομή εντός του φακέλου.

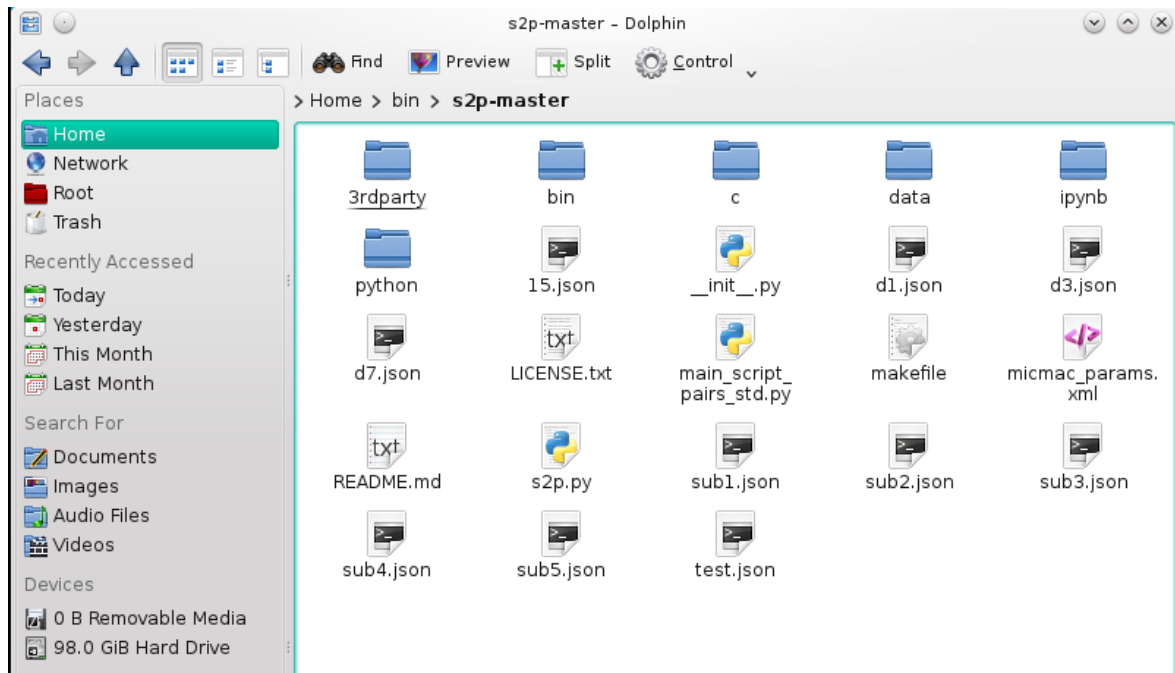


Εικόνα 86 Περιεχόμενα Φακέλου από Online s2p

Οι φάκελλοι που παρουσιάζονται αρχικά αποτελούν τα τμήματα της δορυφορικής εικόνας μεγέθους 1000x1000 pixels τα οποία έχουν υποστεί επεξεργασία με την χρήση του αφινικού μοντέλου. Στην συνέχεια το cloud.ply και το dsm.tif παρουσιάζουν αντίστοιχα το τρισδιάστατο νέφος σημείων και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Τα αρχεία με κατάληξη .tif αποτελούν ενδιάμεσα στάδια στο τελικό προϊόν. Στα αρχεία trans.txt και pointing.txt περιγράφεται η μετατόπιση κατά την εκτέλεση της διόρθωσης της επιπολικής γραμμής λόγω σφαλμάτων των πολυωνύμων RPC στον με ακρίβεια προσδιορισμό των συντεταγμένων, ώστε να εκτελεστεί ο αλγόριθμος SGM.

6.3.2.2 Εκτέλεση του πηγαίου κώδικα S2p σε περιβάλλον OpenSuse Linux.

Το online εργαλείο διαθέτει και πηγαίο κώδικα σε ανοιχτή μορφή για την εκτέλεση του εργαλείου σε μεγαλύτερες εικόνες και την πλήρη εκμετάλλευση των παραγώγων προϊόντων του. Για την επεξεργασία των δορυφορικών σκηνών χρησιμοποιήθηκε το λειτουργικό OpenSUSE 13.2 linux στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα και η εκτέλεση αυτού με την επιθυμητή παραμετροποίηση.



Εικόνα 87 Εκτέλεση σε OpenSuse 13.2 του Satellite Stereo Pipeline

Η μεταγλώττιση πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής `cmake` και η μετέπειτα κλήση της ρουτίνας με χρήση της γραμμής εντολών, αφού πρώτα εγκαταστάθηκαν πλειάδα ανεξάρτητων προγραμμάτων τα οποία είναι απαραίτητα για την μεταγλώττιση και εκτέλεση του κώδικα. Η εκτέλεση πραγματοποιείται με την κλήση μιας ρουτίνας σε ρυθμό σύμφωνα με τα παρακάτω:

```
$ ./s2p.py d7.json
```

Αυτή η μέθοδος κλήσης είναι η απλούστερη και στην ουσία καλεί την ρουτίνα `s2p.py` σύμφωνα με το αρχείο διαμόρφωσης επιλογών `d7.json`. Το αρχείο αυτό μπορεί να διαμορφωθεί σύμφωνα με τα εκάστοτε επιθυμητά τελικά προϊόντα και έχει την μορφή:

```

{
  "out_dir" : "/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/s2p_out",
  "images" : [
    { "img" : "/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/IMG_PHR1B_P_201304090912163_SEN_629325101-001_R1C1.tif",
      "rpc" : "/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/RPC_PHR1B_P_201304090912163_SEN_629325101-001.XML" },
    { "img" : "/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/IMG_PHR1B_P_201304090912253_SEN_629326101-001_R1C1.tif",
      "rpc" : "/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/RPC_PHR1B_P_201304090912253_SEN_629326101-001.XML" }
  ],
  "roi" : {
    "x" : 1900,
    "y" : 2300,
    "w" : 5000,
    "h" : 5000
  },
  "full_img" : true,
  "matching_algorithm" : "sgm",
  "subsampling_factor" : 1,
  "subsampling_factor_registration" : 1,
  "sift_match_thresh" : 0.6,
  "disp_range_extra_margin" : 0.2,
  "n_gcp_per_axis" : 5,
  "epipolar_thresh" : 0.5,
  "use_pleiades_unsharpening" : false,
  "debug" : false,
  "temporary_dir" : "/tmp",
  "tile_size" : 800,
  "clean_tmp" : true,
  "offset_ply" : false,
  "color_ply" : true,
  "fusion_thresh" : 3,
  "disp_range_method" : "wider_sift_srtm",
  "disp_range_srtm_high_margin" : 50,
  "disp_range_srtm_low_margin" : -20,
  "skip_existing" : false,
  "mosaic_method" : "plio",
  "msk_erosion" : 0,
  "dsm_resolution" : 0.5
}

```

Εικόνα 88 Παραμετροποίηση του Satellite Stereo Pipeline

Στην αρχή προσδιορίζεται ο φάκελος εξόδου, εκεί δηλαδή που θα εγγραφούν το σύνολο των βοηθητικών αρχείων καθώς και τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου σε κάθε υποπεριοχή της εικόνας. Στην συνέχεια αναφέρονται τα πρωτογενή δεδομένα με τα συνοδευτικά αρχεία RPC, τα οποία αναζητά ο αλγόριθμος κατά την εκτέλεση της ρουτίνας. Στην συνέχεια στο ROI ορίζεται η περιοχή εκτέλεσης του αλγορίθμου, τα x,y ορίζουν την πάνω αριστερή γωνία της περιοχής και τα w,h το πλάτος και το ύψος αυτής. Τα δεδομένα αυτά δεν λαμβάνονται υπόψιν αν η επιλογή "full_img" είναι true. Σε εκείνη την περίπτωση ο αλγόριθμος εκτελείται για το σύνολο της εικόνας. Με την επιλογή matching algorithm = sgm εξασφαλίζεται η χρήση του αλγορίθμου semi global matching. Με την χρήση του sift match thresh=0.6, επιλέγεται ως κατώτερο όριο αποδοχής των ομολογιών με την χρήση του τελεστή sift το 0.6 και με το epipolar_thresh=0.5 για την εκτέλεση της επιτολικής επανασύστασης το 0.5. Πολύ σημαντική παράμετρος είναι η επιλογή tile size. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί ο αφινικός μετασχηματισμός στα τμήματα της εικόνας απαιτείται (Franchis et al. 2012) το μέγεθος του φαντίου να μην ξεπερνά τα 1000 pixel, έτσι ώστε η ακρίβεια των υπολογισμών να είναι καλύτερη από 1/10 του pixel. Οι επιλογές disp range method, low και high margin αντίστοιχα αφορούν στην εκτέλεση του τελεστή SIFT και τα ελάχιστα και μέγιστα όρια εκτίμησης της τιμής υψομέτρου με χρήση των δεδομένων SRTM για τον υπολογισμό της τιμής παράλλαξης. Τέλος το σημαντικότερο όλων είναι η χωρική ανάλυση του τελικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους η οποία τέθηκε ίση με την χωρική

ανάλυση των εικόνων, αν και ένας εμπειρικός κανόνας θεωρεί ότι το μέγεθος του DSM οφείλει να έχει τουλάχιστον υποτετραπλάσια ανάλυση σε σχέση με την αρχική εικόνα.

Πολύ σημαντικές πληροφορίες εμπεριέχονται επίσης και στο configuration file το οποίο υπάρχει στον φάκελο των αποτελεσμάτων και καταδεικνύει σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου, όπως φαίνεται παρακάτω.

```
{
  "roi": {
    "y": 1900,
    "x": 2300,
    "w": 5000,
    "h": 5000
  },
  "dsm_resolution": 0.5,
  "out_dir": "/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/s2p_out3",
  "srtm_url": "ftp://xftp.jrc.it/pub/srtmV4/tiff",
  "disp_range_method": "wider_sift_srtm",
  "skip_existing": false,
  "sift_match_thresh": 0.6,
  "images": [
    {
      "cld": null,
      "roi": null,
      "rpc":
"/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/RPC_PHR1B_P_201304090912163
_SEN_629325101-001.XML",
      "clr": null,
      "img":
"/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/IMG_PHR1B_P_201304090912163
_SEN_629325101-001_R1C1.tif"
    },
    {
      "rpc":
"/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/RPC_PHR1B_P_201304090912253
_SEN_629326101-001.XML",
      "img":
"/home/dimitris/pleiades4dirita/sub/d5/IMG_PHR1B_P_201304090912253
_SEN_629326101-001_R1C1.tif"
    }
  ],
  "disp_min": null,
  "matching_algorithm": "sgm",
  "offset_ply": false,
  "msk_erosion": 0,
  "color_ply": true,
  "use_pleiades_unsharpening": false,
  "disp_range_srtm_high_margin": 50,
  "tile_size": 800,
  "srtm_dir": "/home/dimitris/bin/s2p-master/.srtm",
  "subsampling_factor": 1,
  "max_nb_threads": null,
  "fusion_thresh": 3,
  "temporary_dir": "/tmp",
  "subsampling_factor_registration": 1,
  "epipolar_thresh": 0.5,
  "pointing_correction_rois_mode": "automatic",
  "fusion_conservative": false,
```

```
"clean_tmp": true,  
"disp_range_extra_margin": 0.2,  
"disp_max": null,  
"mosaic_method": "pio",  
"n_gcp_per_axis": 5,  
"disp_range_srtm_low_margin": -20,  
"full_img": false,  
"debug": false  
}
```

Εικόνα 89 Παραμετροποίηση του Satellite Stereo Pipeline

Πλειάδα χαρακτηριστικών και επιλογών περιγράφονται και στο τελικό configuration file, όπως είναι το μέγεθος των tile το όριο εκτέλεσης των αλγορίθμων καθώς και το είδος των αλγορίθμων. Ειδικής μνείας χρήζει το γεγονός της χρήσης του SRTM για την αρχικό υπολογισμό και εύρεση των ομόλογων σημείων. Το SRTM DEM βρίσκεται σε έναν ftp server από τον οποίο καλούνται μόνο εκείνα τα τμήματα του μοντέλου που καλύπτουν την υπόψη περιοχή ενδιαφέροντος.

6.3.2.3 Αποτελέσματα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου για μια ευρεία περιοχή καθώς και η συγκριτική μελέτη με την χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ως DSM αναφοράς. Στην εικόνα που ακολουθεί με χρωματική απεικόνιση παρουσιάζεται η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκε η εκτέλεση του αλγορίθμου.



Εικόνα 90 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από την εταιρεία Κτηματολόγιο Α.Ε. σε παράθεση με το δημιουργηθέν από S2P

6.3.2.4 Οπτική Αξιολόγηση

Οι κύριες παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν από την αρχική οπτική αξιολόγηση του DSM είναι οι εξής:

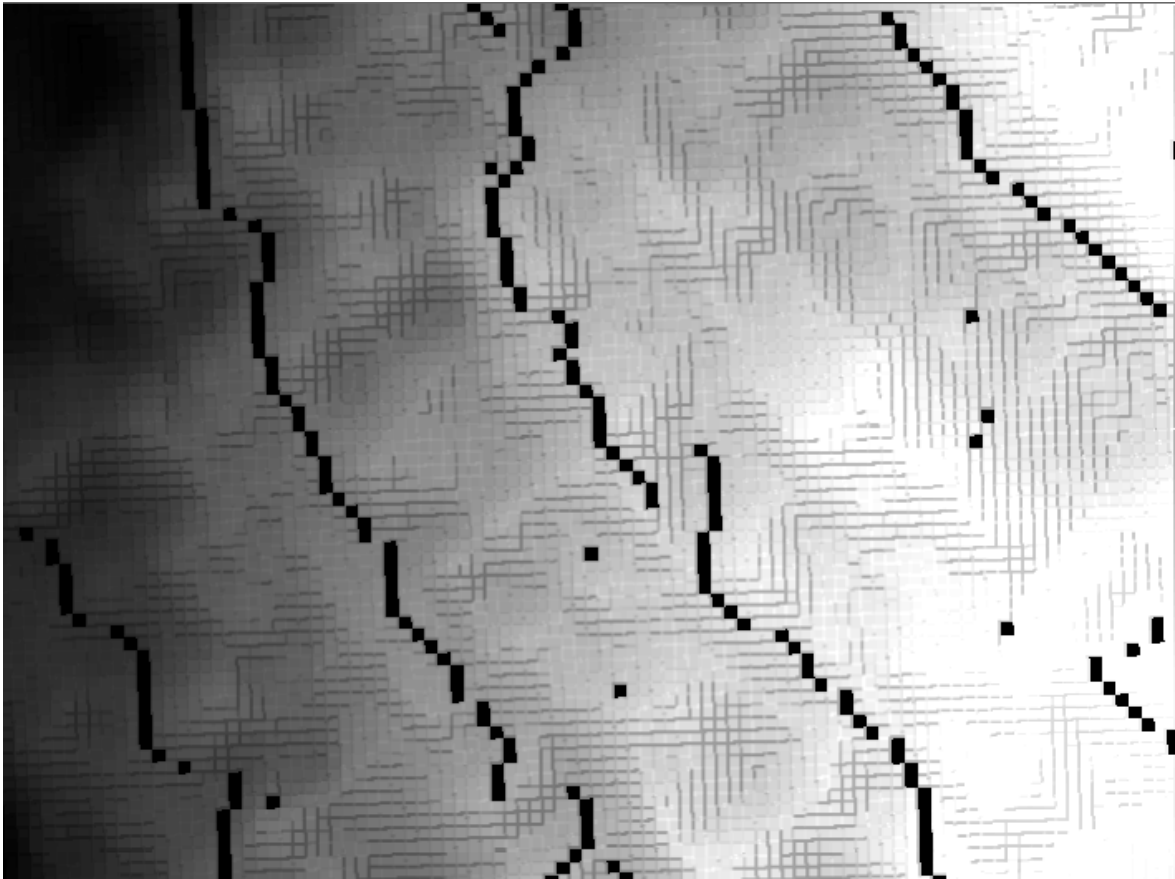
- Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου για ένα πάρα πολύ μικρό τμήμα της Νήσου Αντιπάρου με την χρήση του διαδικτυακού εργαλείου, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές προσπάθειες για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους για το σύνολο της σκηνής. Ο αλγόριθμος παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα - σφάλμα ότι σε περίπτωση που αποτύχει σε κάποια από τα περίπου 4100 tiles της συνολικής σκηνής σταματά, δεν δημιουργεί τα απαραίτητα αρχεία H_ref.txt και H_sec.txt, με συνέπεια κατά την εκτέλεση του mosaicking μεταξύ των tiles δεν μπορεί να βρεί τα κομμάτια αυτά και αποτυγχάνει. Επίσης επειδή ο αλγόριθμος δρα κατά τμήματα και υπολογίζει το σφάλμα κατά την εκτίμηση των ομολογιών και την διόρθωση των επιπολικών γραμμών, στο σύνολο των tiles εφαρμόζει όχι μόνο την τοπική διόρθωση αλλά και μια γενική διόρθωση (global correction) η οποία διορθώνει την μορφή των επιπολικών γραμμών για το σύνολο της εικόνας. Αυτό έχει ως συνέπεια αν γίνει εκτέλεση του αλγορίθμου κατά τμήματα και δημιουργία DSM κατά τμήματα, αυτά θα έχουν διαφορές κατά την διαδικασία του edge matching.
- Παρατηρείται αποτυχία του αλγορίθμου εντός των παραθαλάσσιων περιοχών, χαρακτηριστικό αναμενόμενο, αφού τα τμήματα αυτά της εικόνας δεν διαθέτουν υψή με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εκτελεστεί συνταύτιση σημείων.
- Παρατηρείται αποτυχία του αλγορίθμου σε περιοχές με νεφοκάλυψη. Συγκεκριμένα η διαδικασία δημιουργίας του dsm μπορεί στις συγκεκριμένες περιοχές να έχει δύο πιθανές εκβάσεις. Στην πρώτη ο αλγόριθμος εντοπίζει την νεφοκάλυψη και με την χρήση mask αφαιρεί το συγκεκριμένο τμήμα και συνεχίζεται η εκτέλεσή του σε άλλα τμήματα, στην δεύτερη αποτυγχάνει να αναγνωρίσει την περιοχή αυτή και αποτυγχάνει να εκτελέσει συνολικά τον αλγόριθμο και την μετέπειτα παραγωγή DSM.

Στην συνέχεια ακολουθεί το παραγόμενο DSM σε μορφή σκίασης αναγλύφου.



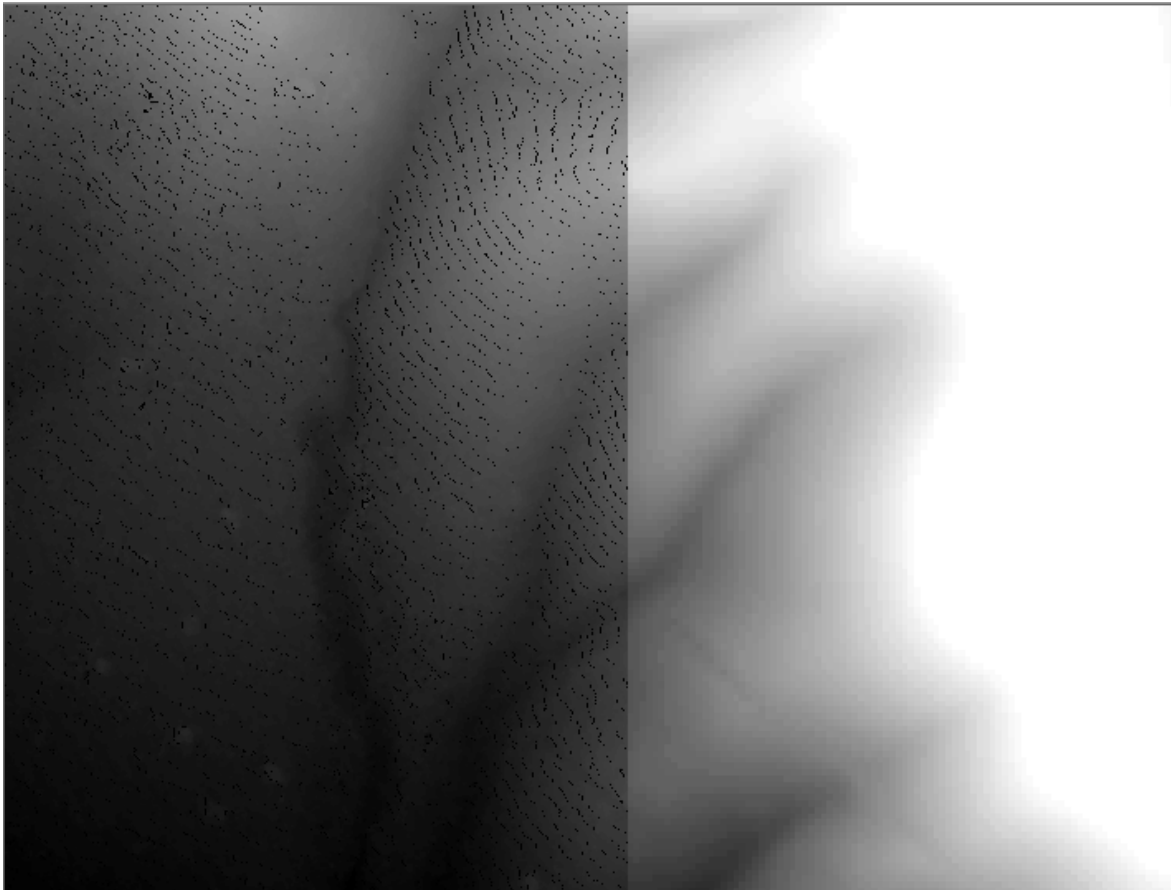
Εικόνα 91 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από S2P σε μορφή hillshade

Το παραγόμενο DSM τόσο σε μορφή hillshade όσο και στην κανονική μορφή παρουσιάζει μια γραμμική μορφή κατά μήκος των ισοϋψών η οποία είναι no data value. Αυτή η γραμμή είναι αποτέλεσμα της εκτέλεσης του αλγορίθμου και δύναται να εξαλειφθεί με την εφαρμογή ενός φίλτρου 3x3 mean, το οποίο θα αφαιρέσει αυτά τα σημεία (θόρυβος) από το τελικό προϊόν.



Εικόνα 92 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από S2P σε μορφή hillshade

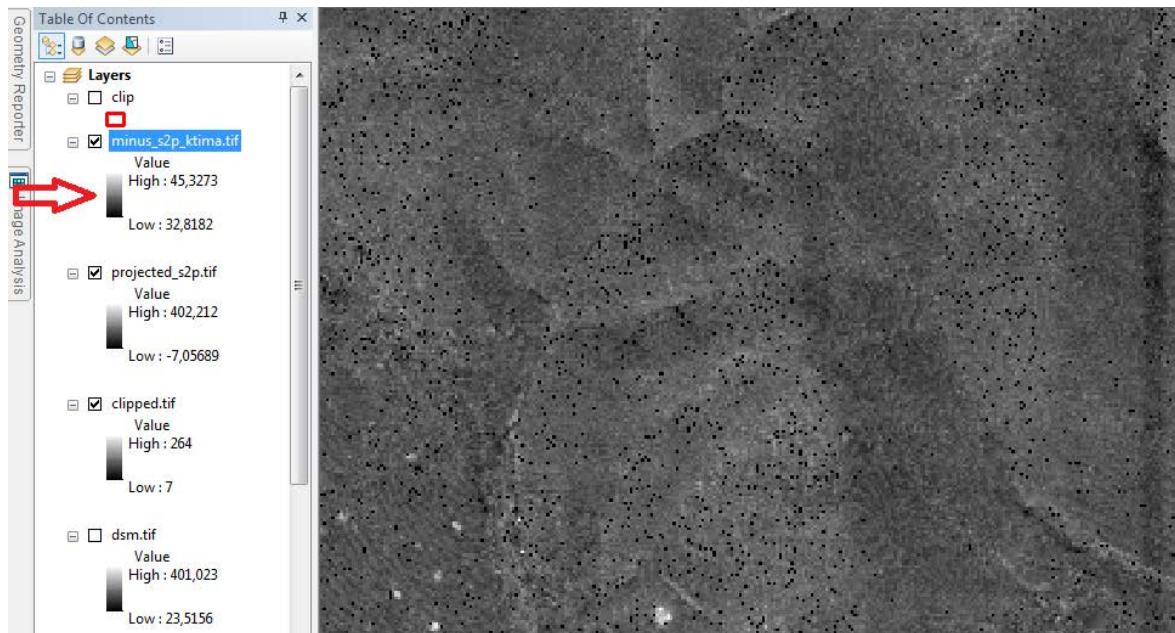
Με την παράθεση του δημιουργηθέντος ψηφιακού μοντέλου εδάφους με το μοντέλο αναφοράς, παρατηρείται μια πολύ καλή σύμπτωση κατά μήκος της γραμμής επαφής των δύο μοντέλων. Εδώ χρήζει αναφοράς ότι το παραγόμενο DSM έχει σύστημα αναφοράς wgs84 utm 34n, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η επαναπροβολή του σε ΕΓΣΑ87 για την οπτική σύγκριση των αναφερομένων.



Εικόνα 93 ΨΜΕ Ν. Αντιπάρου από S2P σε παράθεση με ΨΜΕ από ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.

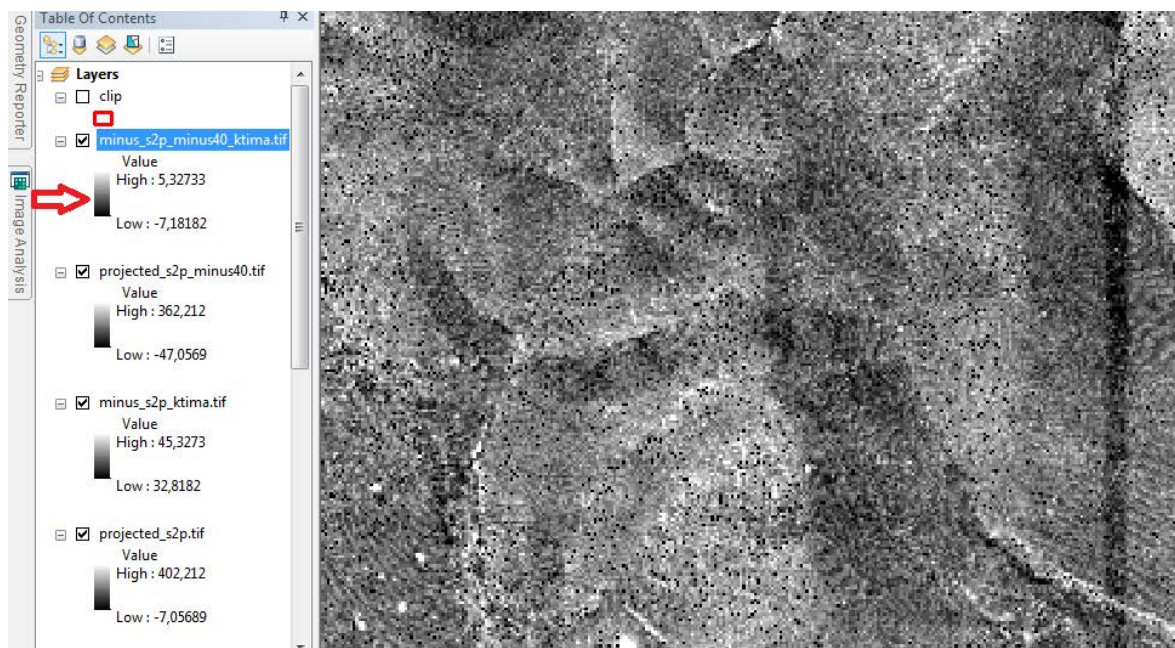
6.3.2.5 Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από Κτηματολόγιο Α.Ε.

Για την εναργέστερη απεικόνιση των υψομετρικών διαφορών μεταξύ του DSM από την εκτέλεση του αλγορίθμου satellite stereo pipeline και του DSM αναφοράς πραγματοποιείται αφαίρεση ανά εικονοστοιχείο των τιμών υψομέτρου και προκύπτει το αποτέλεσμα που ακολουθεί.



Εικόνα 94 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

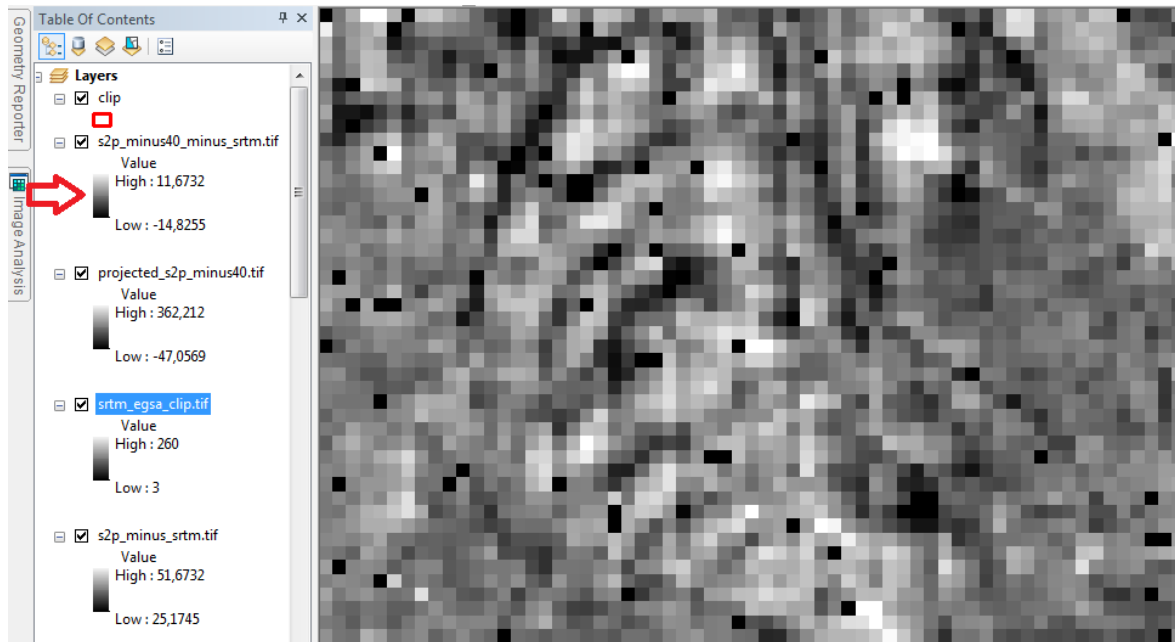
Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται μια συστηματική μετατόπιση (bias), μεταξύ των δύο σετ δεδομένων, η οποία μπορεί να εξαλειφθεί με την κατά εικονοστοιχείο αφαίρεση της τιμής των 40m στο σύνολο του raster. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε και στη συνέχεια επαναπραγματοποιήθηκε αφαίρεση ανά εικονοστοιχείο με το DSM αναφοράς και οι ακρίβειες που προέκυψαν ήταν οι αναμενόμενες, αφού οι υψομετρικές διαφορές είναι ± 1 pixel (δηλαδή $\pm 5\mu$)



Εικόνα 95 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

6.3.2.6 Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από τα δεδομένα srtm

Η ίδια αξιολογική διαδικασία ακολουθήθηκε, για λόγους πληρότητας, και με την χρήση δορυφορικών δεδομένων τύπου SRTM, με αποτελέσματα πολύ καλής ακρίβειας και εντός προδιαγραφών σε σχέση με το ΨΜΕ αναφοράς.

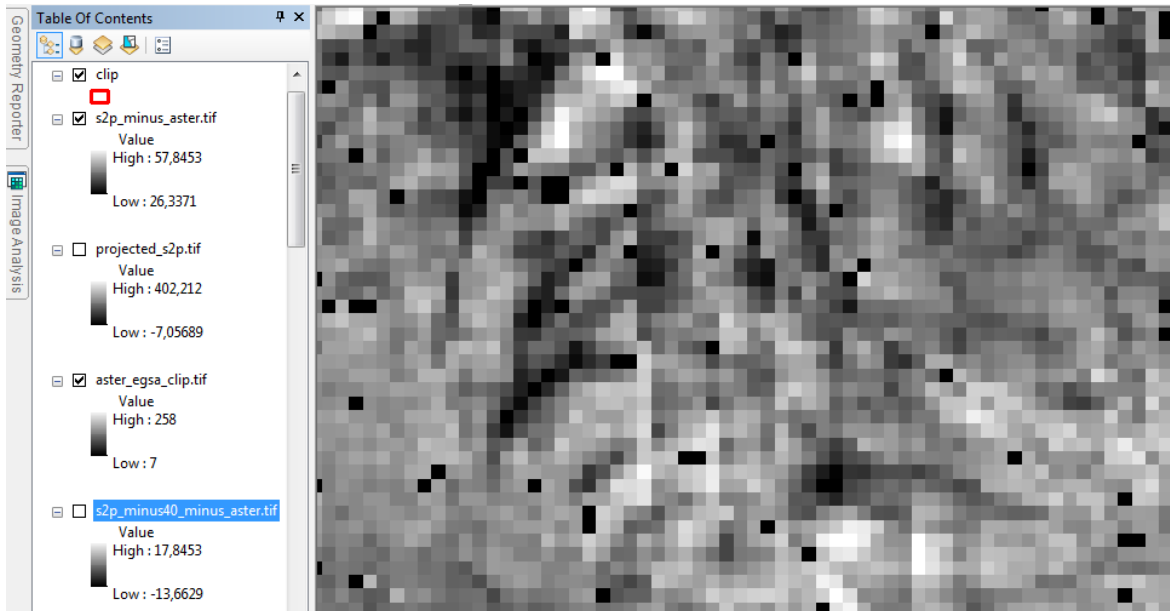


Εικόνα 96 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

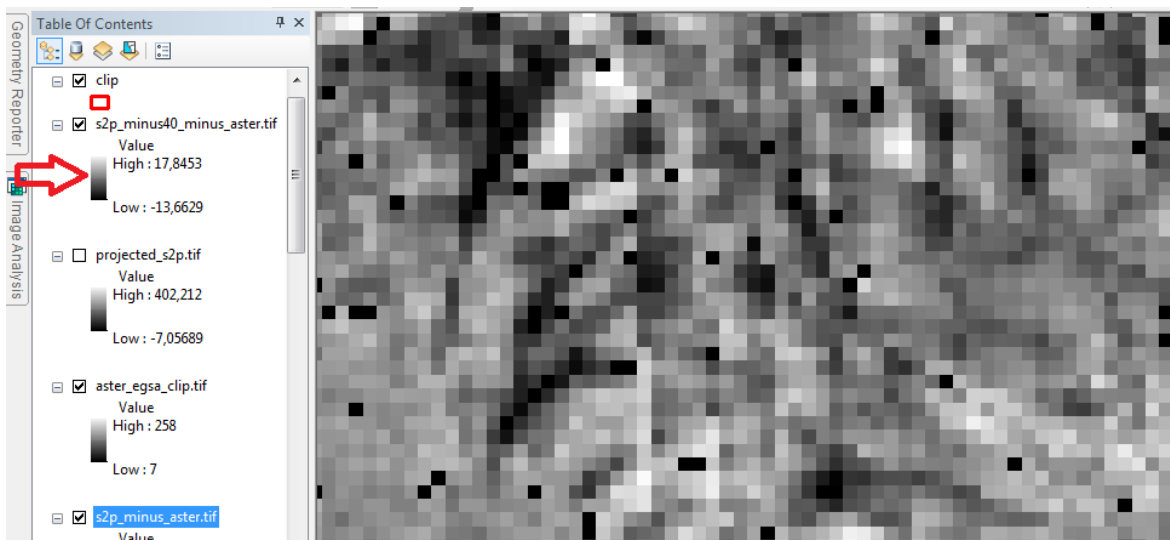
Απο την εκτέλεση της σύγκρισης μεταξύ του παραγόμενου DSM και του s2p DSM προκύπτει η προαναφερθείσα συστηματική μετατόπιση (bias), η οποία μόλις εξαλειφεί με την αφαίρεση ανά εικονοστοιχείο της τιμής αυτής (40μ), οι ακρίβειες που προκύπτουν είναι οι αναμενόμενες για το σετ δεδομένων SRTM, δηλαδή της τάξης των ± 15 μέτρων και καλύτερες.

6.3.2.7 Αξιολόγηση με αφαίρεση των ψηφιδωτών επιπέδων με αναφορά τα δεδομένα από τα δεδομένα aster

Για την επιπλέον αξιολόγηση μεταξύ του DSM απο την εκτέλεση του αλγορίθμου satellite stereo pipeline και του DSM αναφοράς πραγματοποιείται αφαίρεση ανά εικονοστοιχείο των τιμών υψομέτρου με την χρήση του ψηφιακού μοντέλου ASTER και προκύπτει το αποτέλεσμα που ακολουθεί.



Εικόνα 97 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

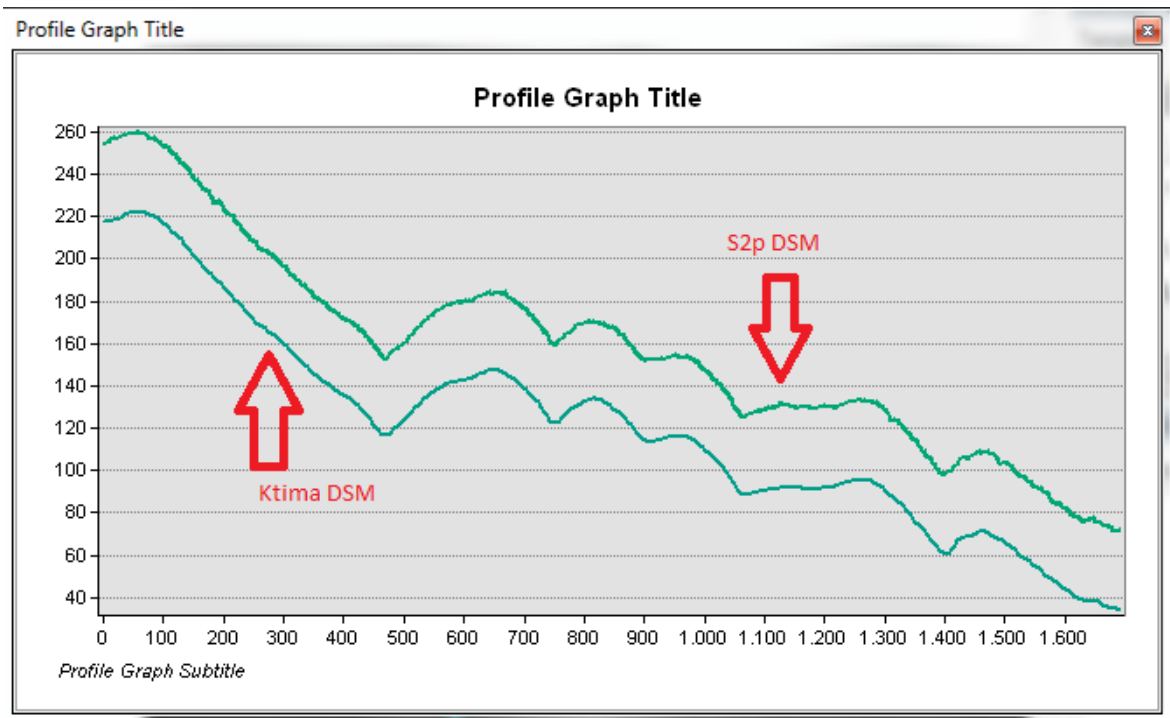


Εικόνα 98 Επιφανειακή Αφαίρεση Δεδομένων από τα Δεδομένα Αναφοράς

Απο την εκτέλεση της σύγκρισης μεταξύ του παραγόμενου DSM και του s2p DSM προκύπτει η προαναφερθείσα συστηματική μετατόπιση (bias), η οποία μόλις εξαλειφεί με την αφαίρεση ανα εικονοστοιχείο της τιμής αυτής, οι ακρίβειες που προκύπτουν είναι οι αναμενόμενες για το σετ δεδομένων SRTM, δηλαδή της τάξης των ± 15 μέτρων και είναι ελαφρώς χειρότερες σε σχέση με τα δεδομένα SRTM. Το γεγονός αυτό δύναται να δικαιολογηθεί από την ολοκληρωτική έλλειψη φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης καθώς και από την χαμηλή ακρίβεια των grc πολυωνύμων.

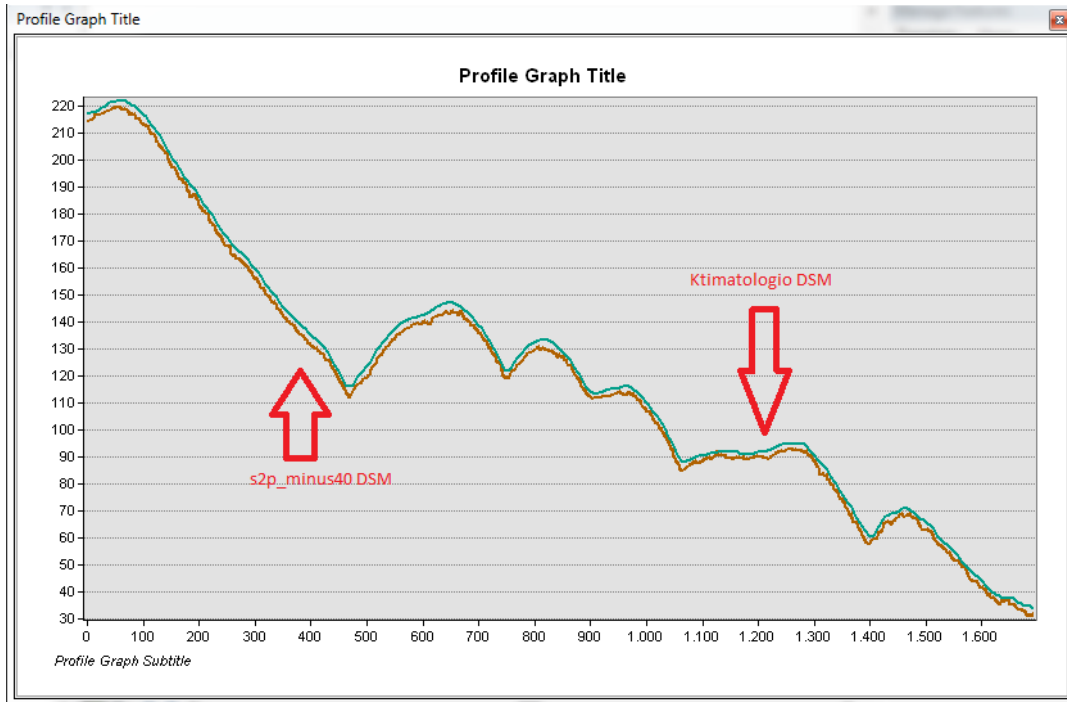
6.3.2.8 Αξιολόγηση με την εκτέλεση κατατομών (profile graph) με το σύνολο των δεδομένων ελέγχου

Για την βέλτιστη οπτικοποίηση των διαφορών μεταξύ των παραχθέντων ψηφιακών μοντέλων εδάφους και των δεδομένων βάσης χρησιμοποιούνται μηκομές κατα μήκος βασικών διευθύνσεων (B-N, A-Δ). Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η συστηματική διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ του ΨΜΕ του κτηματολογίου και του s2p.



Εικόνα 99 Μηκομή Δεδομένων σε συνάρτηση με Δεδομένα Αναφοράς

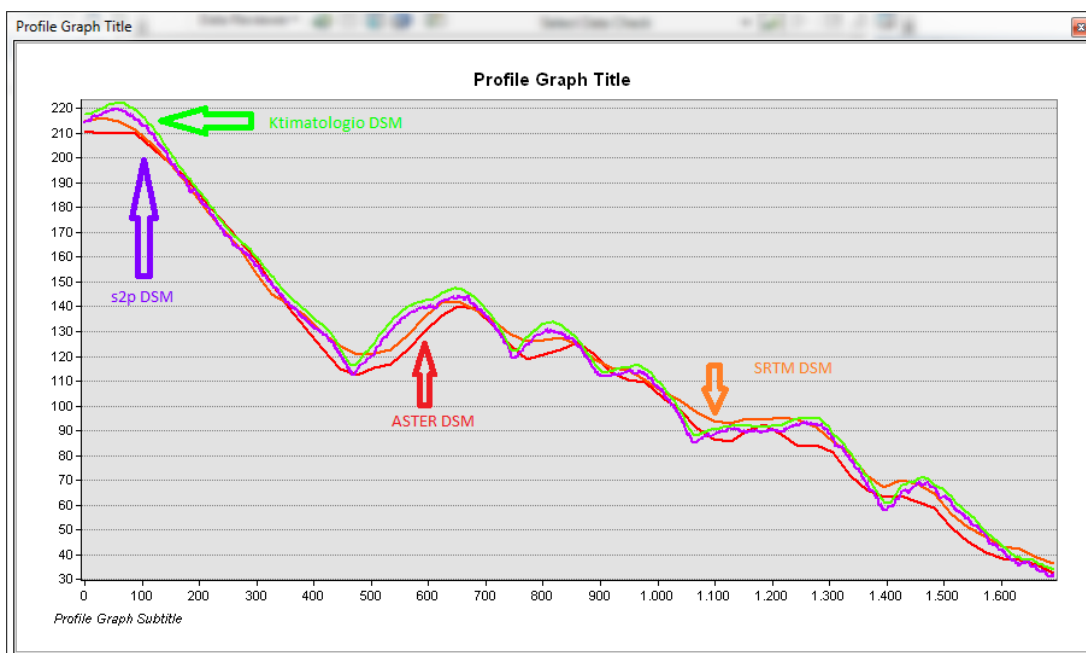
Για την εξάλειψη της παρατηρούμενης συστηματικής διαφοράς δημιουργείται ένα νέο DSM με μείον 40μ ανά εικονοστοιχείο και προκύπτει η μηκομή του σχήματος, η οποία παρουσιάζει πάρα πολύ καλή σύμπτωση σε σχέση με τα δεδομένα βάσης (Εικόνα 100).



Εικόνα 100 Μηκοτομή Δεδομένων σε συνάρτηση με Δεδομένα Αναφοράς

Στην συνέχεια και για λόγους πληρότητας ελέγχεται το s2p DSM με τα παραγόμενα ΨΜΕ από τις δορυφορικές αποστολές SRTM και ASTER. Στην σύγκριση των μηκοτομών έχει χρησιμοποιηθεί το s2p DSM από το οποίο έχει αφαιρεθεί η συστηματική μετατόπιση.

Από τις μηκοτομές προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα: Το DSM του αλγορίθμου s2p ακολουθεί με μεγάλη πιστότητα και ακρίβεια το DSM του κτηματολογίου. Στην συνέχεια το DSM από την αποστολή SRTM παρουσιάζει σχετικά μικρά σφάλματα στο μέγεθος των προδιαγραφών ακριβείας αυτού και αποτυγχάνει μόνο τοπικά στην περιγραφή των υψηλών κορυφών και των χαραδρών. Την χειρότερη ακρίβεια παρουσιάζει το ΨΜΕ από τον ASTER, το οποίο παρουσιάζει μια γενική αδυναμία να περιγράψει το σύνολο των τοπογραφικών μορφών στην απαιτούμενη ακρίβεια.



6.4 Εφαρμογή του Αλγορίθμου με την χρήση του ανοιχτού λογισμικού OSSIM και του DATE plugin

Η χρήση της παραπάνω μεθόδου δεν κατέστη δυνατή, αφού μετά από επτάμηνη και πλέον προσπάθεια να γίνει χρήση του λογισμικού τόσο σε περιβάλλον OpenSUSE όσο και σε περιβάλλον Ubuntu Linux, το λογισμικό δεν εκτελείτο. Λόγω της παραπάνω αδυναμίας πραγματοποιήθηκε επικοινωνία με την δημιουργό του λογισμικού και προσπάθεια αποσφαλμάτωσης αυτού, η οποία δεν στέφθηκε με επιτυχία. Στην συνέχεια παραδώθηκε από την δημιουργό του κώδικά, μέρος ενός νέου κώδικά, ο οποίος δεν απαιτεί την ύπαρξη του OSSIM ως περιβάλλοντος εγκατάστασης (standalone κώδικας). Το νέο αυτό λογισμικό λειτούργησε με δορυφορικές εικόνες τύπου Geoeye, αλλά δεν κατέστη δυνατή η λειτουργία του με τις παρεχόμενες εικόνες τύπου Pleiades. Πιθανότερη αιτία για την αποτυχία αυτή είναι η μη ορθή παραμετροποίηση του συνοδευτικού αρχείου DIM κάθε δορυφορικής σκηνής, από το οποίο συλλέγει στοιχεία το λογισμικό. Στις παρεχόμενες εικόνες πραγματοποιήθηκε εκτέλεση του αλγορίθμου DATE από την δημιουργό του λογισμικού με πολύ καλά αποτελέσματα, τα οποία δεν παρουσιάζονται αφού δεν αποτελούν κομμάτι της εργασίας του υπογράφοντος.

7. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Ολοκληρώνοντας την μελέτη της εφαρμογής του αλγορίθμου σε διαφορετικές πλατφόρμες και με διαφορετική μεθοδολογία, καθίσταται αναγκαία η σύγκριση της αποτελεσματικότητας αυτών και η παράθεση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει ο καθένας, μετά από την ενδελεχή αξιολόγηση των παραγόμενων ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

7.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του Tridicon SGM

Για την χρήση του tridicon SGM, χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό erdas imagine και απο την εκτέλεση του αλγορίθμου προκύπτουν τα παρακάτω:

- ✓ Ο αλγόριθμός και ο τρόπος εφαρμογής του ακολουθεί την κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία, ενσωματώνοντας το σύνολο των δεδομένων συμπεριλαμβανομένων και των φωτοσταθερών, μετρημένων με τοπογραφική ακρίβεια, με αποτέλεσμα να γίνεται πιο εύληπτη η εφαρμογή του απο την φωτογραμμετρική κοινότητα, αλλά και με μετρήσιμα αποτελέσματα (ακρίβεια αεροτριγωνισμού, υπόλοιπα φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης, μέσο τετραγωνικό σφάλμα κ.τ.λ.)
- ✓ Εκτελείται με τον πλέον αξιόπιστο τρόπο, αν και αποτελεί μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία. Συγκεκριμένα για την εκτέλεσή του για τα τρία

ζεύγη εικόνων χρειάστηκαν περίπου 36 ώρες εκτέλεσης σε υπολογιστή core-i7 με 8GB RAM. Σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα δεν παρουσίασε οποιαδήποτε αποτυχία, στις περιπτώσεις δε που ο αλγόριθμος αποτύγχανε τοπικά, η περιοχή καταγραφόταν ως no data value και η διαδικασία συνεχιζόταν.

- ✓ Επιτρέπει την χρήση εικόνων σε μορφή jpeg2000 καθώς και με διαφορετικό βάθος χρώματος από τα 8-bit, διότι κατά την εκτέλεσή του οι υπορουτίνες του λογισμικού μετατρέπουν τις εικόνες στην επιθυμητή μορφή.
- ✓ Είναι πιο προσιτό από την πλευρά του μη εξειδικευμένου χρήστη, αφού το παραθυρικό του περιβάλλον και η πλειάδα των βοηθητικών εγχειριδίων, καθοδηγούν τον χρήστη βήμα-βήμα.
- Κυριότερο μειονέκτημα είναι η κακή του αποτελεσματικότητα, αφού παρουσιάζει μια συστηματική λειτουργία, να εξομαλύνει τις έντονες τοπογραφικές εξάρσεις, μη δυνάμενος να περιγράψει το σχετικά ομαλό ανάγλυφο της Ν. Αντίπαρου, σε αντίθεση με τον classic ATE, ο οποίος περιγράφει την τοπογραφία της περιοχής συστηματικά με πιστό και αποδοτικό τρόπο.
- Η μη ύπαρξη μιας ενιαίας γραμμής επεξεργασίας μέχρι το τελικό προϊόν, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρήση του spatial modeler, για την μετατροπή του νέφους σημείων στο αντίστοιχο DSM, διαδικασία η οποία παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα μη εκτέλεσης. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι από τα τρία νέφη σημείων που δημιουργήθηκαν με την χρήση του tridicon SGM, το spatial modeler μπόρεσε να μετατρέψει σε raster μόνο το ένα, αποτυγχάνοντας στα άλλα δύο.

7.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του Satellite Stereo Pipeline SGM

Για την εκτέλεση του satellite stereo pipeline με την χρήση του αλγόριθμου SGM, χρησιμοποιήθηκε τόσο το διαδικτυακό εργαλείο για μικρότερα τμήματα της εικόνας όσο και ο πηγαίος κώδικας σε περιβάλλον OpenSuse Linux μετά από κατάλληλη μεταγλώτιση. Έτσι προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✓ Ο αλγόριθμός παρουσιάζει πάρα πολύ καλά αποτελέσματα στην απεικόνιση της τοπογραφίας του εδάφους. Μάλιστα αυτό πραγματοποιείται χωρίς την ύπαρξη φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης. Η συστηματική δε μετατόπιση (bias) μπορεί να αφαιρεθεί με την χρήση είτε ενός φωτοσταθερού, είτε άλλων δεδομένων βάσης.
- ✓ Το διαδικτυακό εργαλείο επιτρέπει την γρήγορη και αξιόπιστη απεικόνιση του εδάφους τόσο σε μορφή νέφους σημείων όσο και σε μορφή

ψηφιακού μοντέλου εδάφους, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση ή η κατοχή οποιουδήποτε λογισμικού, αποκλειστικά και μόνο σε διαδικτυακό περιβάλλον.

- ✓ Παρουσιάζει τη δυνατότητα εκτέλεσης σε πλειάδα δορυφορικών δεκτών, όπως είναι οι worldview, Ikonos και Pleiades.
 - ✓ Είναι ελεύθερος για μεταφόρτωση και χρήση από τον οποιοδήποτε, σε συγκεκριμένο διαδικτυακό αποθετήριο.
-
- Η εκτέλεση του κώδικα πραγματοποιείται σε περιβάλλον linux με την χρήση τερματικού και γραμμής εντολών, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ιδιαίτερα φιλική διεπαφή για τον μη εξειδικευμένο χρήστη.
 - Ο αλγόριθμος παρουσιάζει αστάθεια κατά την εκτέλεσή του, με αποτέλεσμα όταν εκτελείται σε μεγάλες περιοχές και αποτυγχάνει να εκτελεστεί σε τμήμα του, να αδυνατεί να υπολογίσει καθοριστικές παραμέτρους και να γίνει η τελική συνένωση των επιμέρους τμημάτων.
 - Δεν χρησιμοποιεί φωτοσταθερά και σημεία σύνδεσης, με αποτέλεσμα η εξωτερική του ακρίβεια να εξαρτάται αποκλειστικά από τα χορηγούμενα κλασματικά πολυώνυμα RPC.

Βιβλιογραφία

1. Franchis C., Meinhardt-Llopis E., Michel J., Morel J-M, Facciolo G, 2014, An automatic and modular stereo pipeline for pushbroom images. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich.
2. Franchis C., Meinhardt E, Michel J, Morel J-M, Facciolo G, 2014, On stereo rectification, Zurich, Switzerland
3. Franchis C., Meinhardt E, Michel J, Morel J-M, Facciolo G, 2014, Automatic sensor orientation refinement of pleiades stereo images, IEEE Transactions, Zurich, Switzerland.
4. Hirschmuller H., 2005, Accurate and Efficient Stereo Processing by semi-global matching and mutual information DLR, Germany
5. Hirschmuller H., 2007, Evaluation of cost functions for stereo matching DLR Germany
6. Eisank C., Rieg L., Klug C., Kleindienst H., Sailer R, 2015, Semi-Global Matching of Pléiades Tri-Stereo Imagery to Generate Detailed Digital Topography for High-Alpine.
7. Taejung K. 2000, A study on the epipolarity of linear pushbroom images, Asprs Photogrammetric Engineering and Remote Sensing
8. Dial J. , Grodecki J. , 2005, Replacement Camera Models, Asprs 2005 Annual Conference
9. Guptcha A., Hartley A., 2000, Linear pushbroom Cameras, IEEE Transactions
10. Jaeng Oh , 2000, Novel Approach to Epipolar Resampling of HRSI and Satellite Stereo Imagery-based Georeferencing of Aerial Images, phd dissertation OSU
11. Tetsu Ono, 1999, Epipolar resampling of high resolution satellite images, Kyoto
12. Scharstein D., Szeliski R., 2005, A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms, Middlebury.
13. Stentoumis C., Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., 2012, Implementing an adaptive approach for dense stereo matching, NTUA Athens
14. Καρράς Γ. , 1998, Γεωμετρικοί μετασχηματισμοί Εικόνας, ΕΜΠ Αθήνα
15. Καροπούλου Θ. 2007, Ανάπτυξη αλγορίθμου για την απευθείας γεωαναφορά των δορυφορικών Εικόνων, ΕΜΠ Αθήνα.
16. Μαλτέζος, εξαγωγή πίνακα ανομοιότητας βάθους μετά από πυκνή συνταύτιση σημείων, ΕΜΠ Αθήνα.

Παράρτημα

Ακολουθούν στο παράρτημα, τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αεροτριγωνισμού στην μέθοδο tridicon SGM.

Triangulation Report With LPS

The output image x, y units: pixels

The output ground X, Y, and their residual units: meters

The output ground Z and its residual units: meters

Input Image Coordinates

Image ID = 1

Point ID	x	y
1	33355.245	3052.237
3	30287.392	3372.388
5	30046.938	8264.108
6	22977.973	9237.813
7	30224.770	8587.751
8	19407.266	11942.087
9	24306.248	11811.841
10	24514.668	12062.917
11	17571.329	14597.750
12	23210.749	14460.682
13	23459.680	14494.818
14	30431.969	14210.528
15	18361.037	14992.668
16	29662.264	14951.066
17	31409.363	15763.654
18	15482.444	23703.418
19	15624.821	23477.313
20	9119.411	24468.215
21	9374.455	24720.857
22	11932.121	25142.373
23	11141.766	25451.193
24	9145.019	27214.289
25	5060.890	28207.816
28	22798.633	30179.605
30	22987.639	31122.283
35	22238.375	13318.125
36	25269.125	8927.125
37	23937.375	12049.125
38	21996.375	10443.625
39	17901.125	16850.875
40	20549.400	16193.162
41	22878.678	19965.573
43	15806.875	21638.375
44	14538.817	23051.951
45	20503.929	22204.770
46	18840.630	13674.802

Initial values of correction parameters

a[0]=0.66246

b[0]=-1.5986

Image ID = 2

Point ID	x	y
1	32858.235	3020.944
3	29832.376	3276.043
5	29598.243	8077.038
6	22630.357	8889.476
7	29774.102	8396.050
8	19114.336	11466.028
9	23941.088	11443.332
10	24147.201	11691.993
11	17301.961	14054.260
12	22861.375	14029.125
13	23107.605	14062.958
14	29979.566	13931.151
15	18082.434	14450.627
16	29221.875	14638.875
17	30944.346	15474.953
18	15249.223	22941.129
19	15388.973	22723.789
20	8981.815	23554.924
21	9232.953	23808.830
22	11751.604	24279.092
23	10973.146	24564.469
24	9002.021	26272.605
25	4983.716	27142.686
28	22457.916	29455.176
30	22644.311	30383.547
31	19185.063	11322.734
32	4842.547	26821.664
33	11959.689	27115.033
34	19352.557	27084.031
35	21899.845	12897.462
36	24890.625	8624.125
37	23578.625	11667.125
38	21657.625	10084.125
39	17623.125	16300.625
40	20238.875	15676.125
41	22535.451	19430.092
43	15566.029	20932.551
44	14319.031	22279.369
45	20191.534	21591.676
46	18556.395	13159.091

Initial values of correction parameters

a[0]=1.5922

b[0]=-4.2663

Image ID = 3

Point ID	x	y
1	32203.094	3003.666
3	29236.125	3200.375
5	29007.249	7854.890
6	22176.933	8518.760
7	29180.031	8164.056
8	18731.598	10948.962
9	23461.705	11014.804
10	23664.000	11257.849
11	16953.125	13434.875
12	22402.125	13503.875
13	22644.182	13537.733
14	29380.031	13533.717
15	17718.660	13826.448
16	28637.625	14203.625
17	30325.844	15043.883
18	14940.766	21987.887
19	15077.546	21781.344
20	8800.532	22467.225
21	9046.544	22717.582
22	11513.485	23219.072
23	10750.735	23480.420
28	22002.404	28418.424
30	22184.881	29319.189
31	18799.893	10815.889
32	4744.695	25552.469
33	11716.661	25964.578
34	18959.930	26070.100
35	21460.125	12395.125
36	24392.875	8297.125
37	23106.138	11223.877
38	21220.665	9677.186
39	17263.436	15628.853
40	19832.152	15052.304
42	21419.397	20197.951
43	15250.331	20058.408
44	14029.716	21329.137
45	19781.959	20781.339
46	18184.646	12578.384

Initial values of correction parameters

a[0]=1.9847

b[0]=-5.6767

Coordinates of control points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
----------	---	---	---	---------

36	596208.8020	4099802.7100	0.7500	3
38	594577.5740	4099035.7400	121.9380	3
39	592543.4550	4095844.1160	146.5600	3
41	595056.3060	4094319.3510	29.4030	2
43	591497.9250	4093466.7320	53.6220	3
44	590858.8300	4092762.7640	5.1560	3
45	593873.1900	4093202.2350	72.8380	3
46	592986.1170	4097424.7120	1.9540	3

Coordinates of check points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
37	595552.2780	4098248.3160	10.5050	3
40	593864.7920	4096182.3450	35.3600	3
35	594707.3090	4097612.0890	68.0960	3
42	594720.9500	4093539.7050	49.0670	1

OUTPUT OF BUNDLE BLOCK REFINEMENT

iteration number = 1 unit-weight standard error = 0.3068
maximum correction of the object points =1.54931

iteration number = 2 unit-weight standard error = 0.3068
maximum correction of the object points =0.00000

Final adjustment parameters

Image ID = 1
a[0]=0.66246
b[0]=-1.5986
Image ID = 2
a[0]=1.5922
b[0]=-4.2663
Image ID = 3
a[0]=1.9847
b[0]=-5.6767

Adjustment parameter accuracy

Image ID = 1
sa[0]=0.15451
sb[0]=0.16843
Image ID = 2
sa[0]=0.15337
sb[0]=0.1554
Image ID = 3
sa[0]=0.15409
sb[0]=0.17193

Check point residuals

Point ID	rX	rY	rZ
37	-0.1898	0.5748	-1.0167
40	-0.0980	-0.1835	1.4546
35	-0.4283	0.1718	-0.7325
	meanX	meanY	meanZ
	-0.2387	0.1877	-0.0982
	rmseX	rmseY	rmseZ
	0.2763	0.3622	1.1085
	CE90	LE90	
	0.7368	2.2160	

The image residuals of measured check points

Point	Image	Vx	Vy
37	1	0.258	1.116
37	2	-0.288	1.339
37	3	0.318	1.582

Point	Image	Vx	Vy
40	1	0.660	-0.375
40	2	0.756	-0.346
40	3	0.316	-1.225

Point	Image	Vx	Vy
35	1	0.835	0.715
35	2	1.225	-0.319
35	3	-0.158	1.130

Mean error of 9 image points: $a_x=0.436$, $a_y=0.402$

RMSE of 9 image points: $m_x=0.631$, $m_y=1.011$

Control point residuals

Point ID	rX	rY	rZ
36	-0.0250	-0.3427	-0.0848
38	0.1139	0.0840	-0.0473
39	-0.2395	0.3626	-0.3903
41	-0.0618	0.0527	0.2563
43	0.1465	-0.2869	0.1977
44	-0.0988	0.2577	-0.2651
45	-0.3080	-0.8932	0.0547
46	0.4726	0.7639	0.2761
	meanX	meanY	meanZ
	-0.0000	-0.0003	-0.0003
	rmseX	rmseY	rmseZ
	0.2303	0.4729	0.2281
	CE90	LE90	
	0.8066	0.4007	

The difference of intersected and measured control points

Point ID	rX	rY	rZ
36	-0.1980	-0.5527	-1.3552
38	0.1751	0.1299	0.2061
39	-0.5613	0.2443	-2.3627
41	0.3090	0.2279	3.5499
43	0.2953	-0.2664	1.0445
44	-0.2758	0.2014	-1.3961
45	-0.7171	-1.3608	-2.4618
46	0.4726	0.7639	0.2761
meanX	meanY	meanZ	
-0.0625	-0.0766	-0.3124	
rmseX	rmseY	rmseZ	
0.4155	0.6104	1.9118	
CE90	LE90		
1.1786	3.2714		

The image residuals of intersected GCP

Point	Image	Vx	Vy
36	1	0.234	-0.024
36	2	-0.368	0.121
36	3	0.135	-0.099

Point	Image	Vx	Vy
38	1	0.876	0.225
38	2	0.179	-0.039
38	3	-1.082	-0.195

Point	Image	Vx	Vy
39	1	0.518	0.189
39	2	-0.364	-0.279
39	3	-0.162	0.089

Point	Image	Vx	Vy
41	1	-0.070	-0.016
41	2	0.071	0.016

Point	Image	Vx	Vy
43	1	0.250	0.049
43	2	-0.074	-0.000
43	3	-0.182	-0.052

Point	Image	Vx	Vy
44	1	-0.688	-0.025
44	2	0.210	-0.293
44	3	0.491	0.329

Point	Image	Vx	Vy
45	1	-0.988	-0.193
45	2	0.445	0.029
45	3	0.561	0.173

Point	Image	Vx	Vy
46	1	-0.375	1.835
46	2	-0.164	-0.592
46	3	-0.102	-0.240

Mean error of 23 image points: $a_x=-0.028$, $a_y=0.044$

RMSE of 23 image points: $m_x=0.473$, $m_y=0.431$

Object point coordinates				
Point ID	X	Y	Z	Overlap
36	596208.7770	4099802.3673	0.6652	3
38	594577.6879	4099035.8240	121.8907	3
39	592543.2155	4095844.4786	146.1697	3
41	595056.2442	4094319.4037	29.6593	2
43	591498.0715	4093466.4451	53.8197	3
44	590858.7312	4092763.0217	4.8909	3
45	593872.8820	4093201.3418	72.8927	3
46	592986.5896	4097425.4759	2.2301	3
37	595552.0882	4098248.8908	9.4883	3
40	593864.6940	4096182.1615	36.8146	3
35	594706.8807	4097612.2608	67.3635	3
42	594720.9500	4093539.7050	49.0670	1
1	600259.4280	4102743.0058	10.0971	3
3	598715.6398	4102574.2320	20.0433	3
5	598617.0187	4100145.7446	23.6368	3
6	595056.5342	4099640.0716	23.1435	3
7	598706.8102	4099985.9619	12.2841	3
8	593264.6696	4098287.6677	1.6260	3
9	595737.6207	4098367.6219	15.7715	3
10	595843.1023	4098243.9653	8.0016	3
11	592356.6652	4096963.0309	61.6672	3
12	595199.3537	4097049.8739	36.1797	3
13	595323.2742	4097034.1919	19.5935	3
14	598838.2235	4097197.3779	32.1912	3
15	592754.1280	4096770.4289	33.0638	3
16	598452.4256	4096828.0938	19.3601	3
17	599336.6464	4096430.7433	23.6326	3
18	591339.3166	4092442.9352	11.1015	3
19	591410.7764	4092555.3330	17.2936	3
20	588127.2252	4092043.0644	-0.2302	3
21	588257.5339	4091918.6241	0.9874	3
22	589552.7801	4091717.9535	8.6261	3
23	589154.4405	4091562.3746	4.6216	3
24	588161.0473	4090680.0543	66.1387	2

25	586094.1071	4090175.6212	3.4147	2
28	595060.4834	4089257.6964	5.9022	3
30	595159.6303	4088791.2879	0.4619	3
31	593303.7965	4098364.2216	26.8523	2
32	586019.3495	4090335.2226	-0.1599	2
33	589672.4151	4090288.6097	0.0562	2
34	593461.3471	4090411.1085	15.1013	2

Total number of object points = 41

Image point residuals

Point	Image	Vx	Vy
36	1	0.320	-0.517
36	2	-0.369	0.021
36	3	0.082	0.035

Point	Image	Vx	Vy
38	1	0.807	0.331
38	2	0.129	-0.013
38	3	-1.121	-0.217

Point	Image	Vx	Vy
39	1	0.736	-0.156
39	2	-0.282	-0.018
39	3	-0.164	0.702

Point	Image	Vx	Vy
41	1	-0.134	0.519
41	2	0.231	-0.455

Point	Image	Vx	Vy
43	1	0.137	0.137
43	2	-0.128	-0.173
43	3	-0.199	-0.374

Point	Image	Vx	Vy
44	1	-0.581	-0.200
44	2	0.239	-0.120
44	3	0.472	0.703

Point	Image	Vx	Vy
45	1	-0.691	-1.273
45	2	0.567	-0.265
45	3	0.575	0.349

Point	Image	Vx	Vy
46	1	-0.375	1.835
46	2	-0.164	-0.592
46	3	-0.102	-0.240

Point	Image	Vx	Vy
37	1	0.102	0.012
37	2	-0.374	-0.056
37	3	0.276	0.045

Point	Image	Vx	Vy
40	1	0.158	-0.088
40	2	0.163	0.364
40	3	-0.326	-0.284

Point	Image	Vx	Vy
35	1	0.142	0.404
35	2	0.591	-0.859
35	3	-0.749	0.462

Point	Image	Vx	Vy
42	3	0.394	-0.597

Point	Image	Vx	Vy
1	1	0.261	0.079
1	2	-0.258	-0.114
1	3	-0.006	0.034

Point	Image	Vx	Vy
3	1	-0.168	-0.048
3	2	-0.016	0.026
3	3	0.189	0.024

Point	Image	Vx	Vy
5	1	0.288	-0.197
5	2	-0.124	0.668
5	3	-0.167	-0.482

Point	Image	Vx	Vy
6	1	-0.062	-0.053
6	2	0.035	0.114
6	3	0.028	-0.061

Point	Image	Vx	Vy
7	1	-0.008	-0.011
7	2	-0.021	0.021
7	3	0.029	-0.009

Point	Image	Vx	Vy
8	1	-0.037	-0.036
8	2	-0.039	0.065
8	3	0.078	-0.029

Point	Image	Vx	Vy
9	1	-0.105	-0.042

9	2	-0.003	0.049
9	3	0.111	-0.007

Point	Image	Vx	Vy
10	1	-0.073	-0.027
10	2	-0.033	0.020
10	3	0.109	0.007

Point	Image	Vx	Vy
11	1	-0.070	-0.201
11	2	0.205	0.539
11	3	-0.135	-0.345

Point	Image	Vx	Vy
12	1	0.096	-0.065
12	2	-0.144	0.197
12	3	0.048	-0.136

Point	Image	Vx	Vy
13	1	-0.054	-0.039
13	2	-0.049	0.062
13	3	0.105	-0.023

Point	Image	Vx	Vy
14	1	-0.086	-0.030
14	2	0.010	0.031
14	3	0.078	-0.000

Point	Image	Vx	Vy
15	1	-0.000	-0.019
15	2	-0.040	0.041
15	3	0.041	-0.023

Point	Image	Vx	Vy
16	1	-0.070	-0.100
16	2	0.011	0.227
16	3	0.061	-0.129

Point	Image	Vx	Vy
17	1	-0.160	-0.028
17	2	0.030	-0.014
17	3	0.134	0.044

Point	Image	Vx	Vy
18	1	0.055	0.013
18	2	-0.091	-0.022
18	3	0.036	0.009

Point	Image	Vx	Vy
19	1	-0.010	-0.020

19	2	-0.047	0.036
19	3	0.057	-0.017
Point	Image	Vx	Vy
20	1	-0.032	-0.015
20	2	-0.039	0.012
20	3	0.073	0.004
Point	Image	Vx	Vy
21	1	0.044	0.004
21	2	-0.014	0.013
21	3	-0.030	-0.017
Point	Image	Vx	Vy
22	1	-0.009	-0.006
22	2	-0.022	0.006
22	3	0.033	0.000
Point	Image	Vx	Vy
23	1	-0.167	-0.050
23	2	-0.010	0.032
23	3	0.181	0.020
Point	Image	Vx	Vy
24	1	-0.028	-0.006
24	2	0.029	0.006
Point	Image	Vx	Vy
25	1	-0.125	-0.028
25	2	0.126	0.028
Point	Image	Vx	Vy
28	1	-0.078	-0.041
28	2	-0.020	0.059
28	3	0.101	-0.017
Point	Image	Vx	Vy
30	1	-0.024	-0.036
30	2	-0.039	0.073
30	3	0.064	-0.038
Point	Image	Vx	Vy
31	2	-0.052	-0.012
31	3	0.053	0.012
Point	Image	Vx	Vy
32	2	-0.005	-0.001
32	3	0.005	0.001
Point	Image	Vx	Vy

33	2	0.018	0.004
33	3	-0.019	-0.004

Point	Image	Vx	Vy
34	2	0.002	0.000
34	3	-0.002	-0.000

Control point image residuals

The image ID = 1

Point ID	Vx	Vy
36	0.320	-0.517
38	0.807	0.331
39	0.736	-0.156
41	-0.134	0.519
43	0.137	0.137
44	-0.581	-0.200
45	-0.691	-1.273
46	-0.375	1.835

meanx=0.028, meany=0.084
rmsex=0.535, rmsey=0.845

The image ID = 2

Point ID	Vx	Vy
36	-0.369	0.021
38	0.129	-0.013
39	-0.282	-0.018
41	0.231	-0.455
43	-0.128	-0.173
44	0.239	-0.120
45	0.567	-0.265
46	-0.164	-0.592

meanx=0.028, meany=-0.202
rmsex=0.297, rmsey=0.290

The image ID = 3

Point ID	Vx	Vy
36	0.082	0.035
38	-1.121	-0.217
39	-0.164	0.702
43	-0.199	-0.374
44	0.472	0.703
45	0.575	0.349
46	-0.102	-0.240

meanx=-0.065, meany=0.137
rmsex=0.520, rmsey=0.440

Total number of all control image points = 23

Total meanx = -0.001, meany = 0.001

Total rmsex = 0.461, rmsey = 0.580

Check point image residuals

The image ID = 1

Point ID	Vx	Vy
37	0.102	0.012
40	0.158	-0.088
35	0.142	0.404

meanx=0.134, meany=0.109
rmsex=0.136, rmsey=0.239

The image ID = 2

Point ID	Vx	Vy
37	-0.374	-0.056
40	0.163	0.364
35	0.591	-0.859

meanx=0.126, meany=-0.184
rmsex=0.414, rmsey=0.540

The image ID = 3

Point ID	Vx	Vy
37	0.276	0.045
40	-0.326	-0.284
35	-0.749	0.462
42	0.394	-0.597

meanx=-0.101, meany=-0.093
rmsex=0.474, rmsey=0.404

Total number of all check image points = 10

Total meanx = 0.037, meany = -0.060

Total rmsex = 0.383, rmsey = 0.412