



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

**Υλοποίηση και Αξιολόγηση Σημειακών Τελεστών για την
Αυτόματη Αραιή Συνταύτιση Εικόνας σε Στερεοζεύγη**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΛΩΡΙΔΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου οπλισμένοι με υπομονή και κατανόηση και συντέλεσαν με οποιοδήποτε τρόπο, είτε θεωρητικά είτε πρακτικά, στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γιώργο Καρρά για την πολύτιμη βοήθειά του, τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου, αλλά κυρίως για την υπομονή που επέδειξε και την υποστήριξη που μου προσέφερε. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας Χρήστο Στεντούμη, καθώς συντέλεσε καθοριστικά στην πραγματοποίηση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Περίληψη

Σε αυτή την διπλωματική εργασία προγραμματίστηκαν, διερευνήθηκαν και αξιολογήθηκαν ορισμένοι από τους πιο γνωστούς τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος μέσω του προσδιορισμού του σχετικού προσανατολισμού στερεοζευγών. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλοί διαφορετικοί ανιχνευτές και περιγραφείς σημείων ενδιαφέροντος. Δεν είναι πάντα σαφές ποιοι είναι πιο κατάλληλοι και σε ποιες περιπτώσεις εικόνων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν συνολικά επτά σημειακοί ανιχνευτές και ανιχνευτές περιοχών (blobs). Αυτοί είναι οι *Sift*, *Brisk*, *Mser*, *Mineigen*, *Fast*, *Surf* και *Asift* (φυσικά υπάρχουν και άλλοι τελεστές, όπως πχ. ο *ORB* των Rublee et al., 2011). Η εφαρμογή τους απαιτεί να επιλεγούν οι τιμές ορισμένων παραμέτρων τους. Συνεπώς η εφαρμογή τους στα ζεύγη των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκε μέσα σε ένα εύρος τιμών που προκαθορίστηκε για κάθε μια από τις εξετασθείσες παραμέτρους.

Οι διαδικασίες ψηφιακής συνταύτισης εικόνας που χρησιμοποιούνται στην Ψηφιακή Φωτογραμμετρία, αλλά κυρίως οι πιο πρόσφατοι αλγόριθμοι προερχόμενοι από το πεδίο της Όρασης Υπολογιστών, καταλήγουν γενικά στην εξαγωγή μεγάλου αριθμού σημείων ενδιαφέροντος, τα οποία πρέπει με κάποιο τρόπο να ελεγχθούν ώστε να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια. Η ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε βάσει της επιπολικής γεωμετρίας (επιπολικός πίνακας) και του γνωστού αλγορίθμου *RANSAC* ο οποίος, σε αντίθεση με την πλειονότητα των αντίστοιχων αλγορίθμων, χρησιμοποιεί κατά το δυνατόν λιγότερα δεδομένα. Στην συνέχεια, τα σημεία που πέρασαν το έλεγχο (inliers) χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων μέσω της συνθήκης συνεπιπεδότητας. Μέτρο για την τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ήταν το συνολικό γωνιακό σφάλμα του σχετικού προσανατολισμού που υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση, καθώς αυτό ενσωματώνει όλες τις βασικές πηγές σφάλματος (δηλαδή ακρίβεια, πλήθος και κατανομή ομολογιών σημείων).

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται και σχολιάζονται στο τέλος της εργασίας, όπου ακόμα παρατίθενται και κάποια τελικά συμπεράσματα και σκέψεις για πιθανή μελλοντική έρευνα. Η εργασία ολοκληρώνεται με την χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία. Για την υλοποίηση και αξιολόγηση όλων των ανωτέρω διαδικασιών συντάχθηκαν πολλοί κώδικες στο προγραμματιστικό περιβάλλον *Matlab*, ενώ βέβαια επίσης χρησιμοποιήθηκαν ορισμένοι κώδικες διαθέσιμοι ελεύθερα στο Διαδίκτυο.

Implementation and Evaluation of Point Operators for Automatic Sparse Stereo-Matching

V. Floridi

M.Sc. Diploma Thesis, Department of Surveying, National Technical University of Athens

October 2016

Abstract

In this Diploma Thesis, some of the well-known descriptors for automatic sparse stereo-matching have been implemented, investigated and evaluated via the determination of relative orientation. Among the many different descriptors proposed in the literature, the detectors used here were: *Sift*, *Brisk*, *Mser*, *Mineigen*, *Fast*, *Surf* and *Affine Sift*. These detectors are each controlled by certain parameters, which have been tested in a predetermined range of values.

The stereo-matching processes used in Digital Photogrammetry, but especially the most recent algorithms developed in the field of Computer Vision, generally produce a large number of interest points, which need to be checked. Gross error detection has been performed by combining epipolar geometry (fundamental matrix) with the well-known *RANSAC* algorithm, which allows identifying gross errors in a data set and estimating the desired model using data which do not contain such outliers. These data were then used to determine the five conventional relative orientation parameters. The final evaluation of results was performed by estimating a total angular error of relative orientation, as this incorporates all basic sources of error (i.e. accuracy as well as number and distribution of point correspondences).

The project concludes with the conclusions and certain thoughts regarding its possible extensions. Most algorithms have been implemented in Matlab by the author, but of course codes available freely on the Internet have also been exploited.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας	1
1.3	Δομή της Διπλωματικής εργασίας	1
2	Ψηφιακή συνταύτιση εικόνας.....	3
2.1	Συνταύτιση χαρακτηριστικών	4
2.2	Τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος	6
2.2.1	Sift.....	7
2.2.2	Surf	12
2.2.3	Fast (Features from Accelerated Segment Test)	14
2.2.4	Brisk	16
2.2.5	Mineigen.....	19
2.2.6	Mser (Maximally stable extremal regions).....	20
2.2.7	ASIFT (Affine Scale Invariant Feature Transform)	22
2.3	Παράμετροι Τελεστών.....	23
2.3.1	Sift.....	24
2.3.2	Brisk	24
2.3.3	Mser.....	25
2.3.4	Mineigen.....	25
2.3.5	Fast	25
2.3.6	Surf	26
3	Επιπολικός Πίνακας.....	27
3.1	RANSAC.....	27
3.2	Επιπολικές εικόνες	28
4	Σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους.....	31
4.1	Συνθήκη συνεπιπεδότητας.....	31
5	Θερμικές εικόνες.....	34
6	Τρόπος αξιολόγησης αποτελεσμάτων	36
7	Εφαρμογές και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	37
7.1	Πρώτο ζεύγος εικόνων	37
7.1.1	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Brisk.....	38
7.1.2	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Fast.....	40

7.1.3	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Mineigen	42
7.1.4	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Surf	44
7.1.5	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Mser	46
7.1.6	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Sift	48
7.1.7	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift	51
7.1.8	Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού	52
7.2	Δεύτερο ζεύγος εικόνων	55
7.2.1	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Brisk	56
7.2.2	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast	59
7.2.3	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen	62
7.2.4	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf	65
7.2.5	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser	68
7.2.6	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift	71
7.2.7	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift	74
7.2.8	Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού	76
7.3	Τρίτο ζεύγος εικόνων	79
7.3.1	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Brisk	80
7.3.2	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast	82
7.3.3	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen	84
7.3.4	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf	85
7.3.5	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser	87
7.3.6	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift	88
7.3.7	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift	90
7.3.8	Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού	91
7.4	Τέταρτο ζεύγος εικόνων	93
7.4.1	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf	94
7.4.2	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift	96
7.4.3	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift	98
7.4.4	Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού	100
7.5	Πέμπτο ζεύγος εικόνων	101
7.5.1	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast	102
7.5.2	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen	103
7.5.3	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf	105

7.5.4	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser.....	107
7.5.5	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift.....	109
7.5.6	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift	110
7.5.7	Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού	112
7.6	Έκτο ζεύγος εικόνων.....	114
7.6.1	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast	115
7.6.2	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen.....	116
7.6.3	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf.....	117
7.6.4	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser.....	118
7.6.5	Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift.....	119
7.6.6	Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift	120
8	Συμπεράσματα και Προτάσεις	122
8.1	Συμπεράσματα.....	122
8.2	Προτάσεις.....	124
	Βιβλιογραφία	125

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Ως άνθρωποι, αντιλαμβανόμαστε την τρισδιάστατη δομή του κόσμου γύρω μας με εμφανή ευκολία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για αυτό αποτελεί η άνεση με την οποία ο άνθρωπος μπορεί να αναγνωρίσει το σχήμα, το χρώμα, τις σκιές ενός αντικειμένου, ακόμα και να το διακρίνει αβίαστα από το υπόβαθρο στο οποίο εμφανίζεται. Στην ίδια λογική γίνεται, λοιπόν, προσπάθεια εδώ και δεκαετίες να προσομοιωθεί η διαδικασία αυτή από τον υπολογιστή. Όπως είναι προφανές, πρόκειται για μια ιδιαίτερα σύνθετη υπόθεση, καθώς ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής δεν αναγνωρίζει οντότητες, φυσικά χαρακτηριστικά ή χωρικές δομές στην εικόνα, ώστε να είναι σε θέση να προχωρήσει στην αναγνώριση προτύπων και, τελικά, στην ερμηνεία του περιεχομένου της εικόνας (Scharstein and Szeliski, 2002). Βασικό αντικείμενο της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας, αλλά βέβαια και της Όρασης Υπολογιστών, συνιστά αυτή ακριβώς η προσπάθεια προσομοίωσης της ανθρώπινης όρασης από υπολογιστικές διαδικασίες. Καίριο συστατικό στοιχείο αυτού του επιστημονικού πεδίου αποτελούν οι ποικίλες μέθοδοι της *Συνταύτισης Εικόνας* (image matching), οι οποίες κυρίως αποβλέπουν στην αυτόματη αλληλοαναφορά εικόνων (image registration) και την τρισδιάστατη ανακατασκευή των απεικονιζόμενων αντικειμένων (3D object reconstruction).

1.2 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Σε αυτό το πολύ γενικό πλαίσιο, σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ήταν ο προγραμματισμός, η εφαρμογή και η αξιολόγηση ορισμένων από τους πιο γνωστούς τελεστές εξαγωγής και συνταύτισης σημείων ενδιαφέροντος μέσω του υπολογισμού του σχετικού προσανατολισμού στερεοζευγών. Για το λόγο αυτό συντάχθηκαν κώδικες σε περιβάλλον Matlab για την εφαρμογή των τελεστών αυτών, την ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων μέσω του αλγορίθμου RANSAC και την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού μέσω της συνθήκης συνεπιπεδότητας. Χρησιμοποιήθηκαν 6 πολύ διαφορετικά στερεοζεύγη εικόνων, εκ των οποίων ένα ζεύγος αεροφωτογραφιών, τρία ζεύγη από πεντακάμερο σύστημα λήψης, ένα ζεύγος από επίγεια λήψη και ένα ζεύγος από θερμική κάμερα. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εκτιμήθηκε ένα συνολικό γωνιακό σφάλμα του σχετικού προσανατολισμού από τις αβεβαιότητες των τιμών των εκτιμώμενων κάθε φορά παραμέτρων.

1.3 Δομή της Διπλωματικής εργασίας

Μετά από την παρούσα εισαγωγή, η υπόλοιπη εργασία διαρθρώνεται ως εξής. Το Κεφάλαιο 2 εκθέτει συνοπτικά το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης δύο εικόνων, ενώ

γίνεται περαιτέρω ανάλυση του προβλήματος της συνταύτισης χαρακτηριστικών. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά και οι τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και οι παράμετροι που χρησιμοποιεί ο καθένας τους. Στο Κεφάλαιο 3 υπενθυμίζεται η έννοια του επιπολικού πίνακα (**F**) και οι ιδιότητές του, καθώς και ο αλγόριθμος *RANSAC* που χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση εσφαλμένων ομολογιών. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού του σχετικού προσανατολισμού στερεοζεύγους εικόνων μέσω της συνθήκης συνεπιπεδότητας. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται συνοπτική αναφορά στις εικόνες που προέρχονται από θερμικές κάμερες, καθώς πρόκειται για εικόνες με κάποιες ιδιαιτερότητες συγκριτικά με τα υπόλοιπα ζεύγη εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν εδώ. Το 6^ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αναλυτικά αποτελέσματα από την πρακτική εφαρμογή και αξιολόγηση όσων τελεστών και μεθόδων υλοποιήθηκαν και αναλύθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια. Η Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνεται στο 7^ο Κεφάλαιο με συμπεράσματα και ορισμένες σκέψεις για πιθανή περαιτέρω διερεύνηση, καθώς και με την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

2 Ψηφιακή συνταύτιση εικόνας

Το πρόβλημα της ψηφιακής συνταύτισης εικόνας ανάγεται, συνήθως, στην διαδικασία εύρεσης σε μια εικόνα (εικόνα αναζήτησης) του ομόλογου σημείου p' ενός σημείου p μιας άλλης εικόνας (εικόνα αναφοράς). Κάποιο σημείο του αντικειμένου σε μια ψηφιακή εικόνα αντιστοιχεί σε μια τουλάχιστον εικονοψηφίδα γνωστών συντεταγμένων εικόνας (i, j) . Το ίδιο σημείο είναι πιθανό να έχει προβληθεί και σε μια δεύτερη ή περισσότερες εικόνες. Το ζήτημα, λοιπόν, είναι η εύρεση του σημείου αυτού στις άλλες εικόνες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πρόβλημα περιορίζεται σε δύο εικόνες (stereo matching) και σε σημεία που “ξεχωρίζουν” από το περιβάλλον τους, δηλαδή στο ζήτημα της “αραιής συνταύτισης – sparse matching”, σε αντίθεση με εκείνο της “πυκνής συνταύτισης – dense matching” που αναφέρεται στο σύνολο των εικόνων (βλ. πχ. Φλωρίδη, 2013, Κάρκαλου, 2015). Η συγκεκριμένη περίπτωση εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αφορά ευρύ φάσμα εφαρμογών που βασίζονται σε στερεοσκοπικές λήψεις.

Ως γνωστόν, το πρόβλημα της συνταύτισης υπάγεται γενικά στην κατηγορία των “αντίστροφων” προβλημάτων ($2D \rightarrow 3D$, δηλαδή εικόνας-χώρου, ή και $2D \rightarrow 2D$, δηλαδή εικόνας-εικόνας) που είναι ελλιπώς ορισμένα (ill-posed), δηλαδή είναι δυνατόν να μην έχει (Heipke, 1992):

- λύση
- μοναδική λύση
- σταθερή λύση για μικρές μεταβολές των δεδομένων.

Έτσι, είναι δυνατόν το πρόβλημα της συνταύτισης να μην έχει λύση, πχ. λόγω αποκρύψεων. Η λύση ενδέχεται να μην είναι μοναδική, πχ. λόγω επαναλαμβανόμενων προτύπων. Τέλος, η λύση μπορεί να μην είναι σταθερή λόγω μη επαρκούς διακύμανσης της υψής στις εικόνες ή λόγω ύπαρξης έντονου θορύβου.

Προφανώς, ως πρότυπο συνταύτισης επιλέγεται γενικά ένα σύνολο εικονοψηφίδων που αποτελούν ένα προς συνταύτιση παράθυρο και όχι μια μόνη εικονοψηφίδα. Πέραν του προφανούς γεγονότος ότι μια εικονοψηφίδα περιέχει ως πληροφορία μόνο την ψηφιακή τιμή της (τιμή έντασης), την οποία ενδέχεται να έχουν και πολλές άλλες εικονοψηφίδες της ίδιας εικόνας, λόγω της διαφορετικής σχετικής θέσης του αντικειμένου κατά τη στιγμή της λήψης των εικόνων είναι δυνατόν το ίδιο σημείο να δίνει διαφορετική ένταση σήματος στις εικόνες λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών όσο και γιατί τα υλικά διαφέρουν σημαντικά από τα ιδεατά υλικά Lambert και δεν παρουσιάζουν ίδια σκέδαση φωτός προς όλες τις διευθύνσεις. Σε αυτό προστίθενται φυσικά και οι γεωμετρικές διαφορές λόγω προοπτικής. Το πρόβλημα, λοιπόν, ανάγεται τελικά στην χρήση ενός συνόλου εικονοψηφίδων στις εικόνες (Καρφής, 2009).

Ως πρότυπα αναζήτησης μπορούν να επιλέγονται και χαρακτηριστικά (features) – ση-

μεία, ευθείες, ακμές, γραμμές ή γενικότερα περιοχές – με την προϋπόθεση όμως ότι πληρούν κάποιες γενικές απαιτήσεις. Τέτοιες απαιτήσεις είναι η σταθερότητα σε σχέση με τον θόρυβο, η μοναδικότητα σε σύγκριση με άλλα πρότυπα, το αμετάβλητο από γεωμετρική και ραδιομετρική άποψη και, τέλος, το να είναι ευδιάκριτα ως προς το περιβάλλον τους.

Το πρόβλημα της αυτόματης ψηφιακής συνταύτισης που αφορά άμεσα αυτή την Διπλωματική Εργασία είναι εκείνο της συνταύτισης χαρακτηριστικών, και ειδικά της αυτόματης εξαγωγής και συνταύτισης σημείων ενδιαφέροντος (*interest points*), ώστε με την αποκατάσταση ομολογιών μεταξύ σημείων δύο εικόνων να είναι πλέον δυνατός ο αυτόματος προσανατολισμός τους, ενδεχομένως δε και η εν συνεχεία (αραιή) 3D ανακατασκευή της απεικονιζόμενης σκηνής.

2.1 Συνταύτιση χαρακτηριστικών

Η διατύπωση των πρώτων αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν για την συνταύτιση χαρακτηριστικών (*feature-based matching*) οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έγινε αντιληπτό πως ο ανθρώπινος εγκέφαλος συνταυτίζει οντότητες με βάση τα χαρακτηριστικά τους και όχι τους τόνους της απόχρωσής τους. Η προσέγγιση αυτή είναι συχνά πιο ανθεκτική σε παραμορφώσεις της προοπτικής (λόγω αναγλύφου, έντονων αλλαγών στις γεωμετρικές λήψεις και την κλίμακα των εικόνων) αλλά και του φωτισμού, ενώ δεν απαιτεί ιδιαίτερα ακριβείς αρχικές τιμές. Ακόμα, μπορεί κατά περίπτωση να εξασφαλίζει ισχυρότερες λύσεις αν ληφθούν υπόψη και πληροφορίες για τη δομή του χώρου (Αδάμ, 2011). Οι αλγόριθμοι αυτοί αφορούσαν κυρίως την “αραιή” συνταύτιση (*sparse matching*) των εικόνων, όχι μόνο λόγω υπολογιστικών περιορισμών αλλά και για περιορισμό των λύσεων και αύξηση της ακρίβειας. Στην περίπτωση σημείων ενδιαφέροντος (*interest points*), έτσι, το όφελος είναι ότι η αναζήτηση αφορά όχι οποιαδήποτε τυχαία οντότητα αλλά συγκεκριμένα σημεία που, κατά το δυνατόν, συγκεντρώνουν ορισμένες ιδιότητες προκειμένου να θεωρηθούν ως *σημεία ενδιαφέροντος*. Η τελική αντιστοίχιση (*correspondence*) μπορεί να πραγματοποιηθεί πχ. με ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους μεταξύ των διανυσμάτων των *περιγραφικών χαρακτηριστικών* (*descriptors*) που αποδίδονται στα σημεία ενδιαφέροντος και περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά κυρίως με τις παραγώγους της εικόνας σε διαφορετικές αναλύσεις. Έχουν προταθεί διάφοροι τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι από τους οποίους είναι αρχικά εκείνοι των *Moravec*, *Harris*, *Förstner* ή πιο πρόσφατα ο *SIFT* (Αδάμ, 2011). Οι προσεγγίσεις αραιής συνταύτισης (σημείων ενδιαφέροντος) αποσκοπούν κυρίως στην αυτοματοποίηση των διαδικασιών προσανατολισμού και φωτοτριγωνισμού/αυτοβαθμονόμησης, και ταυτόχρονα στην δημιουργία αδρών ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου ως υποβάθρων για πυκνότερη συνταύτιση. [Ας σημειωθεί παρενθετικά πως ο σημειακός τελεστής *Harris* είχε χρησιμοποιηθεί σε θέμα προπτυχιακού μαθήματος για την αρχική εξαγωγή “καλών” σημείων με στόχο τον αυτόματο σχετικό προσανατολισμό.]

Η συνταύτιση χαρακτηριστικών πραγματοποιείται ουσιαστικά σε δύο βήματα. Αρχικά εξάγονται οι οντότητες (σημεία, ακμές, γραμμές ή και επιφάνειες) και έπειτα αντιστοιχίζονται. Τα σημεία που εξάγονται με τη βοήθεια ειδικών σημειακών τελεστών (point operators) ονομάζονται “σημεία ενδιαφέροντος” (interest points) ή και απλώς “γωνίες” (corners). Να σημειωθεί εδώ ότι οι ανιχνευτές σημείων δεν είναι απαραίτητως και περιγραφείς. Ανάλογα με το είδος των σημείων που εξάγονται, επιλέγεται και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών που συνοδεύει κάθε σημείο ή περιοχή ενδιαφέροντος.

Η τελική αντιστοίχιση μπορεί να πραγματοποιηθεί και με την λεγόμενη επιφανειακή συνταύτιση (area-based matching), με την δημιουργία ενός παραθύρου περί το σημείο ενδιαφέροντος. Το όφελος στην περίπτωση αυτή είναι ότι η αναζήτηση αφορά ένα συγκεκριμένο σημείο που συγκεντρώνει ορισμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να θεωρηθεί ως σημείο ενδιαφέροντος και όχι οποιαδήποτε τυχαία οντότητα. Μπορεί, όμως, η αντιστοίχιση να πραγματοποιηθεί και με ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους μεταξύ των διανυσμάτων των περιγραφικών χαρακτηριστικών (descriptors) που αποδίδονται στα σημεία ενδιαφέροντος και περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την θέση, τον προσανατολισμό ή και την καμπυλότητα για γραμμικά στοιχεία, καθώς και την μέση φωτεινότητα ή το μέγεθος στην περίπτωση επιφανειών (Πρόκος & Καρράς, 2008). Ως συνάρτηση κόστους συχνά χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση (απόσταση Mahalanobis). Η προσέγγιση αυτή είναι απλή και γρήγορη. Στην ουσία πρόκειται μόνο για αντιστοίχιση μεταξύ δύο καταλόγων περιγραφικών χαρακτηριστικών, άρα δεν είναι υπολογιστικά απαιτητική.

Αυτά τα χαρακτηριστικά υπολογίζονται σε ορισμένες συγκεκριμένες διευθύνσεις μιας τετραγωνικής ή κυκλικής περιοχής που προσαρμόζεται περί το σημείο ενδιαφέροντος, και κυρίως αφορούν τις τοπικές κλίσεις της εικόνας. Ειδικότερα, η διαδικασία χωρίζεται σε δύο επιμέρους στάδια. Κατ’ αρχάς, πραγματοποιείται προκαταρκτική αντιστοίχιση, η οποία καταλήγει σε κατάλογο που περιλαμβάνει μόνο τα χαρακτηριστικά, τις θέσεις τους και τα βάρη αντιστοίχισής τους με άλλα χαρακτηριστικά, ώστε να μπορέσει κατόπιν να πραγματοποιηθεί ένας έλεγχος για την συμβατότητα της αντιστοίχισης ως προς ένα ορισμένο μαθηματικό μοντέλο, όπως πχ. το τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου ή ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την σχέση μεταξύ των εικόνων (ιδιαίτερα δε εκείνο του σχετικού προσανατολισμού ή της επιπολικής γεωμετρίας), συνήθως με τη βοήθεια του αλγορίθμου ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων RANSAC.

Προκειμένου να χαρακτηριστεί ένα σημείο ως σημείο ενδιαφέροντος οφείλει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις (Förstner, 1986):

- Η διακριτότητα (distinctness): Τα σημεία ενδιαφέροντος πρέπει να είναι ευκρινή και εύκολα διαχωρίσιμα από τα γειτονικά τους.
- Το αμετάβλητο (invariance): Τα σημεία πρέπει να είναι ανεξάρτητα από προο-

- πτικές και ραδιομετρικές παραμορφώσεις, πράγμα που μαζί με την διακριτότητα αντιπροσωπεύουν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους.
- Η σταθερότητα (stability): Τα επιλεγμένα σημεία πρέπει κατά το δυνατόν να εμφανίζονται σε όλες τις εμπλεκόμενες εικόνες και να είναι ανθεκτικά σε πιθανή παρουσία θορύβου.
 - Η σπανιότητα (seldomness): Τα σημεία ενδιαφέροντος πρέπει να είναι μοναδικά σε κάθε εικόνα. Αν και η διακριτότητα που προαναφέρθηκε διακρίνει το σημείο από τα γειτονικά του, η σπανιότητα αποσκοπεί σε επιλογή σημείων που δεν αποτελούν τμήμα επαναλαμβανόμενου μοτίβου.
 - Η ερμηνευσιμότητα (interpretability): Τα σημεία καλό θα ήταν να επιδέχονται και φυσική ερμηνεία, καθώς η συνταύτιση χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται ευρέως για να επιτευχθεί ανάλυση εικόνας (image analysis) και αναγνώριση αντικειμένων (object recognition).
 - Η ακρίβεια (precision): Οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος θα πρέπει να είναι ορισμένες με την εκάστοτε απαιτούμενη ακρίβεια.

2.2 Τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος, γραμμών και ακμών, οι οποίοι επικεντρώνονται στην ποιότητα των ομολογιών, την ακρίβεια υπολογισμού της θέσης κ.λπ. Όπως προαναφέρθηκε, οι πιο συχνά απαντώμενοι σημειακοί τελεστές ήταν αρχικά εκείνοι των Moravec, Harris και Förstner. Πιο πρόσφατα αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι οι οποίοι καθιστούν την συνταύτιση χαρακτηριστικών ολόενα και πιο ανθεκτική σε ραδιομετρικές και γεωμετρικές παραμορφώσεις, δηλαδή σε διάφορα είδη μετασχηματισμών. Τέτοιοι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν σε πρώτη φάση κυρίως από τους Lowe (2004) και Tuytelaars & van Gool (2004).

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων και των ομολογιών του. Η πρώτη βασίζεται στην εύρεση χαρακτηριστικών στην πρώτη εικόνα και την αναζήτηση των αντίστοιχων σημείων στην επόμενη εικόνα με τοπικές τεχνικές αναζήτησης, όπως είναι η συσχέτιση εικόνας. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στον εντοπισμό χαρακτηριστικών και στις δύο εικόνες ανεξάρτητα, τα οποία μετά θα πρέπει να αντιστοιχηθούν βάσει κάποιου μέτρου ομοιότητας των διανυσμάτων που τα περιγράφουν. Η πρώτη προσέγγιση είναι συνήθως πρόσφορη όταν οι εικόνες έχουν ληφθεί από κοντινά σημεία, ενώ η δεύτερη σε περιπτώσεις όπου αναμένεται μεγάλη κίνηση ή αλλαγή του σημείου λήψης. Την τελευταία δεκαετία η έρευνα έχει στραφεί στην δεύτερη προσέγγιση. Ο λόγος είναι ότι οι πρώτες προσεγγίσεις σχεδιάστηκαν για μικρής κλίμακας περιβάλλοντα, όπου οι εικόνες λαμβάνονταν από κοντινές αποστάσεις, ή για τυπικές αεροφωτογραφίες όπου οι εικόνες έχουν σχετικά μικρές διαφορές. Κατά το στάδιο της ανίχνευσης των χαρακτηριστικών, η εικόνα ερευνάται για εξέχοντα σημεία-κλειδιά (key points) που είναι πιθανό να βρεθούν και σε άλλες εικόνες. Ένα τοπικό χαρακτηριστικό είναι ένα μοτίβο σε μια εικόνα που διαφέρει από τα γειτονικά του

σε ένταση, χρώμα και υφή.

Υπάρχουν, όπως προαναφέρθηκε, αρκετοί σημειακοί τελεστές. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν συνολικά επτά σημειακοί ανιχνευτές και ανιχνευτές περιοχών (blobs), οι Sift, Brisk, Mser, Mineigen, Fast, Surf και Asift. Κάθε κατηγορία τελεστών παρουσιάζει, όπως είναι λογικό, κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι ανιχνευτές σημείων (*corner detectors*) είναι αρκετά γρήγοροι αλλά λιγότερο διακριτοί, ενώ οι ανιχνευτές περιοχών (*blob detectors*) είναι περισσότερο διακριτοί αλλά λιγότερο γρήγοροι. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά που εξάγονται στην πρώτη περίπτωση εντοπίζονται καλύτερα σε θέση, όχι όμως σε κλίμακα. Αυτό συνεπάγεται ότι τα χαρακτηριστικά αυτά δεν μπορούν να ανιχνευθούν τόσο συχνά όσο οι “άμορφες” περιοχές μετά από μεγάλες αλλαγές της κλίμακας ή του σημείου λήψης. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η χρήση ενός ανιχνευτή “άμορφων” περιοχών ενδείκνυται σε όλες τις περιπτώσεις. Για αυτούς τους λόγους, η επιλογή του κατάλληλου τελεστή πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη ανάλογα με τους υπολογιστικούς περιορισμούς, τις χρονικές απαιτήσεις, τον τύπο του περιβάλλοντος και την κίνηση κατά μήκος της βάσης, δηλαδή πόσο κοντά έχουν ληφθεί οι εικόνες (Fraundorfer & Scaramuzza, 2011).

2.2.1 Sift

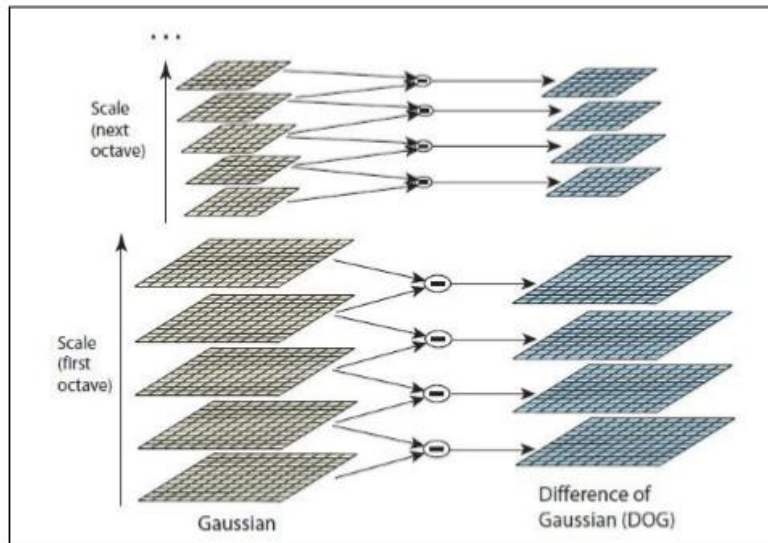
Η ανάγκη για την εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος αμετάβλητων σε μετασχηματισμούς κλίμακας, στροφές ή αλλαγές στη φωτεινότητα γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Για να επιτευχθεί μια τέτοια συνταύτιση ομόλογων σημείων αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος **Sift** (*Scale Invariant Feature Transform*) από τον Lowe (2004). Τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τον αλγόριθμο αυτό είναι ανθεκτικά σε αλλαγές κλίμακας και στροφής, καθώς εν μέρει και σε αφινικούς μετασχηματισμούς και έντονες αλλαγές του σημείου λήψης ή την ύπαρξη θορύβου.

Ο αλγόριθμος ακολουθεί ορισμένα βήματα μέχρι να καταλήξει στην εύρεση ομολογιών συνδυάζοντας την εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος με την δημιουργία ενός πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών (descriptors) για κάθε ένα από αυτά.

Αρχικά η ανίχνευση των σημείων πραγματοποιείται σε πυραμίδες εικόνων (χώρος κλιμάκων – scale space). Η πυραμίδα δημιουργείται με συνέλιξη με φίλτρο εξομάλυνσης **Gauss** με διάφορες τυπικές αποκλίσεις, ώστε να προκύψουν εικόνες διαφορετικής κλίμακας. Στην συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία ενός νέου επιπέδου με επανασύσταση της εικόνας, με επιλογή κάθε δεύτερης εικονοψηφίδας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, και συνέλιξη της νέας αυτής εικόνας με φίλτρα εξομάλυνσης Gauss διαφορετικών τυπικών αποκλίσεων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τρεις φορές, όπως αποφασίστηκε μετά από έρευνα. Έπειτα, για κάθε επίπεδο οι εικόνες διαφορετικής κλίμακας που έχουν δημιουργηθεί αφαιρούνται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να προκύπτει η πυραμίδα DoG – Difference of Gaussian) (Εικόνα 2.1). Στην ουσία η πυραμίδα αυτή υπολογίζεται από την αφαίρεση εικόνων διαδοχικών κλιμάκων που δια-

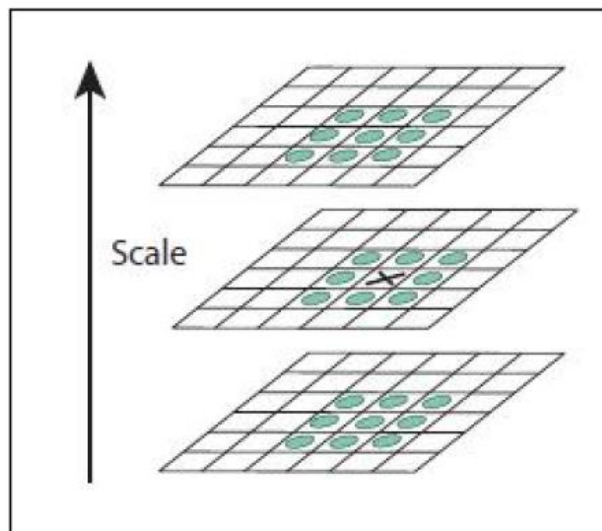
φέρουν κατά τη σταθερά k , όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k_{\sigma}) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k_{\sigma}) - L(x, y, \sigma)$$



Εικόνα 2.1. Πυραμίδες Γκαουσιανή και DoG (Lowe, 2004).

Στην νέα αυτή πυραμίδα γίνεται ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος με σύγκριση της τιμής κάθε εικονοψηφίδας με τις 8 γειτονικές (3×3), καθώς και με τις 9 τιμές που αντιστοιχούν στην αμέσως επόμενη και την αμέσως προηγούμενη εικόνα (Εικόνα 2.2). Σε περίπτωση όπου το σημείο αποτελεί μέγιστο ή ελάχιστο και εάν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από ένα προεπιλεγμένο κατώφλι, θεωρείται σημείο ενδιαφέροντος.



Εικόνα 2.2. Ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος με σύγκριση της τιμής κάθε εικονοψηφίδας με τις 8 γειτονικές, και με τις 9 τιμές που αντιστοιχούν στην αμέσως επόμενη και την αμέσως προηγούμενη εικόνα (Lowe, 2004).

Η ανίχνευση των σημείων είναι προτιμότερο να πραγματοποιείται στην πυραμίδα DoG, καθώς η εύρεσή τους στην πυραμίδα αυτή είναι ανεξάρτητη της κλίμακας της εικόνας, όπως φαίνεται από την μαθηματική σχέση που ακολουθεί, αφού η διαφορά των εικόνων περιλαμβάνει το σ^2 , παράγοντα που απαιτείται για να κανονικοποιηθεί η κλίμακα σε όλα τα επίπεδα της πυραμίδας:

$$G(x, y, k_\sigma) - G(x, y, \sigma) \approx (k - 1)\sigma^2 \nabla^2 G^2$$

Τέλος, η διαδικασία δεν είναι υπολογιστικά απαιτητική, διότι ένα σημείο που δεν αποτελεί μέγιστο ή ελάχιστο θα απορριφθεί αμέσως ύστερα από κάποιες αρχικές συγκρίσεις με τα 26 γειτονικά του στοιχεία.

Τα εν λόγω σημεία συνήθως βρίσκονται ανάμεσα σε ακέραιες τιμές εικονοψηφίδων, συνεπώς απαιτείται υπολογισμός της θέσης τους με ακρίβεια καλύτερη του pixel. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση του πολυωνύμου Taylor. Στην κλίμακα λοιπόν όπου εντοπίστηκε το σημείο ενδιαφέροντος χρησιμοποιείται το πολυώνυμο:

$$D(x) = D + \frac{\partial D^T}{\partial x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} x$$

το οποίο παραγωγίζεται και τίθεται ίσο με το μηδέν προκειμένου να εντοπιστεί η απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από το εγγύτερο ακέραιο pixel με βάση την σχέση:

$$\hat{x} = - \frac{\partial^2 D^{-1} \partial D}{\partial x^2 \partial x}$$

Στην περίπτωση όπου $x > 0.5$, τότε το σημείο ενδιαφέροντος βρίσκεται πιο κοντά σε άλλο pixel και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Στο βήμα αυτό απορρίπτονται και σημεία που βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλή αντίθεση και συνεπώς δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως σημεία ενδιαφέροντος με βάση το κριτήριο $|D(\hat{x})| < 0.03$, όπου

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \hat{x}.$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να απομακρυνθούν και τα σημεία κατά μήκος ακμών, τα οποία κατά κανόνα αποκρίνονται στην παραπάνω διαδικασία και επιλέγονται ως σημεία ενδιαφέροντος. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον ακόλουθο πίνακα στην αντίστοιχη θέση και κλίμακα:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix}$$

Οι ιδιοτιμές του πίνακα εκφράζουν τις κύριες καμπυλότητες του σημείου. Στα σημεία κατά μήκος ακμών παρατηρείται μια μεγάλη καμπυλότητα και μια μικρή. Στον πίνακα \mathbf{H} δεν απαιτείται υπολογισμός των ιδιοτιμών του παρά μόνο ο λόγος των δύο καμπυλοτήτων. Διαιρώντας το ίχνος του πίνακα με την οριζουσά του και υποθέτοντας ότι α είναι

η μεγάλη και β η μικρή ιδιοτιμή, συνεπώς $\alpha = r\beta$ με $r \geq 1$, παίρνει κανείς:

$$\frac{Tr(H)^2}{Det(H)} = \frac{(\alpha + \beta)^2}{\alpha\beta} = \frac{(r\beta + \beta)^2}{r\beta^2} = \frac{(r + 1)^2}{r}$$

Μετά από δοκιμές σε πειραματικά δεδομένα, εκτιμήθηκε κατάλληλη τιμή ορίου $r = 10$. Συνεπώς πραγματοποιείται έλεγχος με βάση την προηγούμενη σχέση, και τα σημεία που απομακρύνονται είναι εκείνα με λόγο μεταξύ των κύριων καμπυλοτήτων μεγαλύτερο αυτής της τιμής (Αδάμ, 2011).

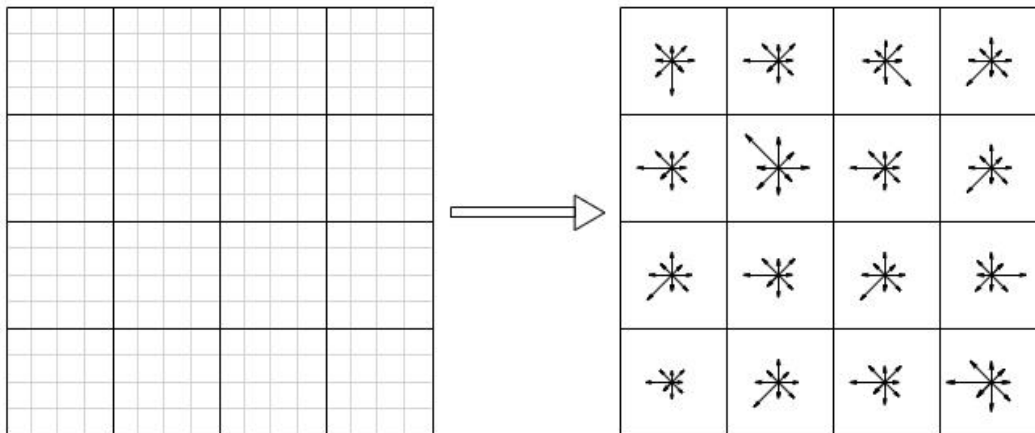
Μετά από την διαδικασία της απαλοιφής όσων σημείων ενδιαφέροντος δεν συγκέντρωναν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, υπολογίζεται η μεταβολή της έντασης m και η γωνία προσανατολισμού θ για κάθε σημείο στο επίπεδο όπου εντοπίστηκε, προκειμένου να μην υπάρχει εξάρτηση από την κλίμακα, βάσει των εξής σχέσεων:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2}$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right)$$

Αφού υπολογιστούν οι ποσότητες αυτές, δημιουργείται ένα ιστόγραμμα ανά 10° , που επομένως χωρίζεται σε 36 τμήματα, και σε αυτά απεικονίζεται η μεταβολή της έντασης με συνυπολογισμό με την βοήθεια βαρών της κλίμακας στην οποία ανιχνεύθηκε το σημείο. Το μέγιστο του ιστογράμματος ορίζει τον προσανατολισμό του σημείου. Εάν υπάρχουν περισσότερες της μίας κορυφές μεγαλύτερες από το 80% του μεγίστου του ιστογράμματος, δημιουργούνται περισσότερα του ενός σημεία ενδιαφέροντος, τα οποία διαφέρουν μόνο κατά προσανατολισμό. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσανατολισμό του σημείου πραγματοποιείται παρεμβολή μεταξύ των τριών κοντινότερων τιμών της κορυφής. Τελικά, με τον τρόπο αυτό έχει υπολογιστεί η ακριβής θέση, η κλίμακα και ο προσανατολισμός του σημείου.

Ακολουθεί η δημιουργία ενός διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών για κάθε σημείο ενδιαφέροντος. Τα διανύσματα αυτά στρέφονται κατά την γωνία του προσανατολισμού που έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα, ώστε η συνταύτιση να είναι ανεξάρτητη από πιθανές στροφές μεταξύ των εικόνων. Για τον υπολογισμό του διανύσματος αυτού επιλέγεται περιοχή με διαστάσεις 4×4 περί το σημείο ενδιαφέροντος στην κλίμακα όπου αυτό έχει εντοπιστεί (Εικόνα 2.3). Εκεί υπολογίζονται οι μεταβολές της έντασης σε 8 διευθύνσεις, με αποτέλεσμα ένα διάνυσμα $4 \times 4 \times 8 = 128$ στοιχείων για κάθε σημείο ενδιαφέροντος. Για τον υπολογισμό των τιμών πραγματοποιείται παρεμβολή αφού τα σημεία ενδιαφέροντος βρίσκονται μεταξύ διαδοχικών pixels. Προκειμένου να αποφευχθούν έντονες αλλαγές στο διάνυσμα των περιγραφικών χαρακτηριστικών, που είναι πιθανές λόγω μικρών αλλαγών στην θέση του παραθύρου, οι τιμές της έντασης συσχετίζονται με βάρη, εξαρτώμενα από την απόσταση από το σημείο ενδιαφέροντος.



Εικόνα 2.3. Ο υπολογισμός των περιγραφικών χαρακτηριστικών (Καλησπεράκης, 2010).

Τα διανύσματα αυτά δεν πρέπει να είναι ευαίσθητα σε αλλαγές φωτεινότητας και για τον λόγο αυτό κανονικοποιούνται στο διάστημα $[0, 1]$. Με τον τρόπο αυτό, οποιαδήποτε γραμμική αλλαγή, όπως ο πολλαπλασιασμός κάθε pixel με σταθερά, δεν επηρεάζει την συνταύτιση. Στη συνέχεια, στο νέο διάνυσμα εφαρμόζεται ένα μέγιστο κατώφλι ίσο με 0.2 και έπειτα κανονικοποιείται εκ νέου στο διάστημα $[0, 1]$. Έτσι, ο αλγόριθμος γίνεται ανθεκτικός και σε αλλαγές φωτεινότητας που έχουν προκύψει με μη γραμμικό τρόπο, όπως αυτές που συμβαίνουν σε μια τρισδιάστατη επιφάνεια.

Το τελικό στάδιο για την συνταύτιση είναι η αντιστοίχιση των διανυσμάτων των περιγραφικών χαρακτηριστικών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εύρεση του πλησιέστερου γείτονα, ο οποίος προκύπτει με υπολογισμό της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ των διανυσμάτων και επιλογή εκείνου που δίνει τη μικρότερη τιμή. Για να ορισθούν δύο σημεία ως ομόλογα θα πρέπει η απόσταση να είναι μικρότερη από ένα κατώφλι, ενώ αξιόπιστο μέσο ελέγχου αποτελεί και ο λόγος της μικρότερης απόστασης με την αμέσως επόμενη. Αν η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι τα σημεία θεωρούνται ομόλογα.

Η διαδικασία αυτή είναι υπολογιστικά απαιτητική και χρονοβόρα, για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος “Best-Bin-First”, ο οποίος επιστρέφει τον κοντινότερο γείτονα με μεγάλη πιθανότητα και σταματά την αναζήτηση για αυτόν, ύστερα από έρευνα στους πρώτους 200 υποψηφίους κάθε σημείου. Τελικά, το αποτέλεσμα του αλγορίθμου *SIFT* είναι η αυτόματη αποκατάσταση ομολογιών σημείων, οι οποίες μπορούν πλέον να ελεγχθούν περαιτέρω με βάση γεωμετρικές δεσμεύσεις μεταξύ των εικόνων (πχ. επιπολικός πίνακας, σχετικός προσανατολισμός).

Μια σημαντική πτυχή αυτής της προσέγγισης είναι ότι δημιουργεί μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών που καλύπτουν πυκνά την εικόνα σε ολόκληρο το φάσμα των κλιμάκων

και θέσεων. Μια τυπική εικόνα μεγέθους 500x500 pixels θα οδηγήσει τυπικά σε περίπου 2000 σταθερά χαρακτηριστικά (αν και αυτός ο αριθμός εξαρτάται βέβαια τόσο από το περιεχόμενο της εικόνας όσο και τις επιλογές για διάφορες παραμέτρους). Το πλήθος των χαρακτηριστικών είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αναγνώριση αντικειμένων, όπου η ικανότητα για την ανίχνευση μικρών αντικειμένων σε “γεμάτα” υπόβαθρα απαιτεί να ταιριάζουν σωστά τουλάχιστον 3 χαρακτηριστικά από κάθε αντικείμενο για αξιόπιστη ταυτοποίηση.

Για τη διαδικασία δημιουργίας των διανυσμάτων περιγραφικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται ο **HOG** –*Histogram of Oriented Gradients* (Dalal & Triggs, 2005). Πρόκειται για έναν περιγραφέα χαρακτηριστικών που βασίζεται στην δημιουργία ιστογραμμάτων προσανατολισμένων κλίσεων σε τμήματα της εικόνας και χρησιμοποιείται στην υπολογιστική όραση και την επεξεργασία εικόνας με σκοπό την ανίχνευση αντικειμένων.

Η βασική σκέψη πίσω από την τεχνική αυτή είναι ότι η τοπική εμφάνιση και το σχήμα των αντικειμένων μέσα σε μια εικόνα μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή κλίσεων της έντασης ή των διευθύνσεων των ακμών. Για το λόγο αυτό, λοιπόν, η εικόνα διαιρείται σε μικρές συνδεδεμένες περιοχές που ονομάζονται κελιά, και για κάθε εικονοψηφίδα μέσα σε κάθε κελί συντίθεται ένα τέτοιο ιστόγραμμα. Για βελτιωμένη ακρίβεια, τα τοπικά ιστογράμματα μπορούν να κανονικοποιηθούν ως προς την αντίθεση (contrast-normalized) με το να υπολογίζεται ένα μέτρο της έντασης κατά μήκος μιας μεγάλης περιοχής της εικόνας, η οποία ονομάζεται μπλοκ, και στη συνέχεια με χρήση αυτής της τιμής για κανονικοποίηση όλων των κελιών μέσα στο μπλοκ. Αυτή η κανονικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε αλλαγές φωτισμού και σκίασης. Ο περιγραφέας HOG έχει κάποια πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλους περιγραφείς, ενώ, δεδομένου ότι λειτουργεί σε τοπικά κελιά, είναι αμετάβλητος σε γεωμετρικούς και ραδιομετρικούς μετασχηματισμούς, εκτός από τον προσανατολισμό των αντικειμένων.

2.2.2 Surf

Πρόκειται για έναν υψηλής απόδοσης αλγόριθμο ανίχνευσης και περιγραφής σημείων ενδιαφέροντος, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναγνώριση αντικειμένων ή εγγραφή/καταχώρηση ή ταξινόμηση ή ανακατασκευή. Είναι εν μέρει εμπνευσμένος από τον αρχικό τελεστή, τον Sift, του οποίου αποτελεί παραλλαγή, με καλύτερες όμως επιδόσεις σύμφωνα με τους δημιουργούς του (Bay et al., 2006).

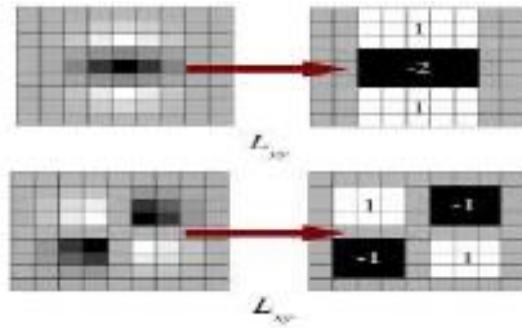
Ο τελεστής αυτός συνίσταται από τα ακόλουθα βήματα:

- Ανίχνευση σημείων-κλειδιά (keypoint detection)

Για την ανίχνευση σημείων-κλειδιά (keypoints) χρησιμοποιεί έναν ανιχνευτή “άμορφων περιοχών” (blobs) βάσει του Εσσιανού πίνακα (Hessian), ο οποίος εφαρμόζεται σε εικόνες που έχουν υποστεί κάποια επεξεργασία και είναι γνωστές με τον όρο *integral images*. Ο όρος αυτός εισήχθη πρώτη φορά στον τομέα της Όρασης Υπολογιστών από

τους Viola & Jones (2001) και αναφέρεται σε εικόνες όπου κάθε κελί περιέχει όχι μόνο την τιμή έντασης της συγκεκριμένης εικονοψηφίδας αλλά και το άθροισμα των τιμών των εντάσεων γειτονικών κελιών, βάσει κάποιου παραθύρου που ορίζεται. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται με σκοπό την μείωση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την εφαρμογή του τελεστή στις αρχικές εικόνες.

Η ανίχνευση που πραγματοποιείται ορίζεται ως η αλλαγή του τοπικού μεγίστου γύρω από μια περιοχή. Ο Surf αναζητεί την κλίμακα του σημείου βάσει ενός φίλτρου διαστάσεων 9×9 .



Εικόνα 2.4. Εύρεση κλίμακας σημείου ενδιαφέροντος, βάσει ενός φίλτρου διαστάσεων 9×9 .

- Διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών για τα σημεία-κλειδιά (keypoint descriptor)

Το διάνυσμα των περιγραφικών χαρακτηριστικών βασίζεται στο άθροισμα της απόκρισης κυματιδίων Haar (Haar wavelet response) περί το σημείο ενδιαφέροντος. Ειδικότερα, μετά την εξαγωγή των σημείων ενδιαφέροντος ακολουθεί η δημιουργία ενός διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών για μια κυκλική περιοχή περί κάθε τέτοιο σημείο. Τα διανύσματα αυτά στρέφονται κατά τη γωνία του κυρίαρχου προσανατολισμού που έχει υπολογιστεί, ώστε η συνταύτιση να είναι ανεξάρτητη από πιθανές στροφές μεταξύ των εικόνων. Η ακτίνα της περιοχής αυτής ορίζεται βάσει της κλίμακας στην οποία ανιχνεύθηκε το σημείο.

Για την εξαγωγή του περιγραφέα, το πρώτο βήμα αποτελεί η κατασκευή μιας τετραγωνικής περιοχής περί το σημείο ενδιαφέροντος και με προσανατολισμό που καθορίζεται από τον βασικό προσανατολισμό που ορίστηκε προηγουμένως. Η περιοχή αυτή χωρίζεται στην συνέχεια σε μικρότερες υποπεριοχές διαστάσεων 4×4 . Για κάθε υποπεριοχή υπολογίζονται κάποια απλά χαρακτηριστικά σε τυχαία σημεία του δείγματος, τα οποία λαμβάνονται σε τακτά διαστήματα 5×5 . Αυτά τα χαρακτηριστικά σχετίζονται με την θέση και την πολικότητα των αλλαγών της έντασης στις περιοχές αυτές. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ένα διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών για όλες τις υποπεριοχές διαστάσεων 4×4 , συνολικού μήκους 64 θέσεων.

Το διάνυσμα που προκύπτει είναι ανθεκτικό στις αλλαγές κλίμακας και στροφών μεταξύ των εικόνων, καθώς και σε αλλαγές φωτισμού και αντίθεσης. Το γεγονός αυτό προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ συνθετότητας των χαρακτηριστικών και ανθεκτικότητας σε συχνά εμφανιζόμενες παραμορφώσεις.

2.2.3 Fast (Features from Accelerated Segment Test)

Πρόκειται για έναν αλγόριθμο εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος με χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, ο οποίος προτάθηκε αρχικά από τους Rosten & Drummond (2005) για τον προσδιορισμό σημείων ενδιαφέροντος σε μια εικόνα. Το πρόβλημα ελαχιστοποιείται υπολογιστικά μέσω υποθέσεων σχετικά με την ανεξαρτησία μεταξύ τυχαίων συνόλων χαρακτηριστικών, ενώ αντιμετωπίζεται ως ένα γενικό πρόβλημα ταξινόμησης.

Η μέθοδος έχει αποδειχθεί αποτελεσματική ακόμα και σε εικόνες με μεγάλες διαφορές προοπτικής.

1. Το κριτήριο κατάτμησης λειτουργεί με την εξέταση ενός κύκλου 16 εικονοψηφίδων περί το υποψήφιο σημείο (corner point) P (Εικόνα 2.5).
2. Ο αρχικός ανιχνευτής ταξινομεί το p ως corner point αν υπάρχει ένα σετ n συνεχόμενων pixel μέσα στον κύκλο που είναι όλα πιο φωτεινά από την ένταση του υποψήφιου pixel (I_p) λαμβάνοντας υπόψη και ένα όριο t , δηλαδή $I_p + t$, ή όλα πιο σκούρα από αυτό, δηλαδή $I_p - t$.
3. Μετά από δοκιμές που έχουν γίνει, ο αριθμός n επιλέγεται ίσος με 12, καθώς επιτρέπει ένα τεστ υψηλών ταχυτήτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποκλείσει έναν πολύ μεγάλο αριθμό σημείων που δεν αντιπροσωπεύουν γωνίες (corner points).
4. Αρχικά, λοιπόν, εξετάζονται οι εικονοψηφίδες 1 και 9 και ελέγχεται αν οι τιμές των εντάσεων τους είναι εντός του ορίου που έχει καθοριστεί, βάσει της τιμής έντασης της κεντρικής εικονοψηφίδας και του ορίου t .
5. Αν ισχύει η υπόθεση αυτή, τότε η υπό εξέταση εικονοψηφίδα δεν αποτελεί σημείο ενδιαφέροντος, διαφορετικά εξετάζονται οι τιμές της έντασης των εικονοψηφίδων 5 και 13.
6. Αν τουλάχιστον τρία από τα τέσσερα pixel δεν έχουν τιμή έντασης μεγαλύτερη από $I_p + t$ ή μικρότερη από $I_p - t$, τότε το υπό εξέταση pixel δεν είναι σημείο ενδιαφέροντος. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν το pixel p απορρίπτεται ως πιθανό σημείο ενδιαφέροντος. Σε αντίθετη περίπτωση ελέγχονται και τα 16 pixel, και ελέγχεται αν υπάρχουν 12 συνεχόμενα pixel που εμπίπτουν στο κριτήριο αυτό.
7. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα pixel της εικόνας.

		16	1	2		
	15				3	
14						4
13						5
12						6
	11				7	
		10	9	8		

Εικόνα 2.5. Κύκλος 16 εικονοψηφίδων που αναπτύσσεται περί το σημείο ενδιαφέροντος.

Αυτό το είδος της ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος οδηγεί φυσικά στην χρήση των εντάσεων των εικονοψηφίδων από έναν κύκλο 16 pixel ως ενός διανύσματος χαρακτηριστικών. Από αυτό προκύπτει ότι τα χαρακτηριστικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως θετικά, όπου οι τιμές έντασης των pixel είναι μεγαλύτερες από το κεντρικό, και σε αρνητικά. Αυτός ο διαχωρισμός είναι χρήσιμος δεδομένου ότι τα θετικά χαρακτηριστικά δεν χρειάζεται να συγκριθούν με τα αρνητικά.

Ο ανιχνευτής εμφανίζεται ανθεκτικός σε αλλαγές του σημείου λήψης και του φωτισμού, και σημειώνει υψηλές επιδόσεις, εμφανίζει όμως και αδυναμίες:

- Δεν απορρίπτει πολλούς υποψηφίους για $n < 12$, δεδομένου ότι το σημείο μπορεί να είναι corner point αν μόνο τρία από τα 4 pixel είναι σημαντικά πιο φωτεινά ή πιο σκούρα από το p . Απαιτούνται πρόσθετες δοκιμές για να διαπιστωθεί αν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί πλήρης έλεγχος για να έχουμε έναν φωτεινό ή σκούρο δακτύλιο.
- Η απόδοση του ανιχνευτή εξαρτάται από την σειρά με την οποία θα «ερωτηθούν» (queried) τα 16 pixel του κύκλου.
- Πολλαπλά χαρακτηριστικά ανιχνεύονται το ένα δίπλα στο άλλο. Το corner point επιλέγεται αν το τόξο περνάει από 12 συνεχόμενα ή γειτονικά pixel, πιο φωτεινά ή πιο σκούρα από το κεντρικό.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών επιλέγεται βάσει του είδους των σημείων που εξάγονται. Ο ανιχνευτής Fast εξάγει corner points ως σημεία ενδιαφέροντος. Για τον λόγο αυτό, για την δημιουργία του διανύσματος των περιγραφικών χαρακτηριστικών των εν λόγω σημείων χρησιμοποιείται ο περιγραφέας Freak, ο οποίος θα εξηγηθεί στην συνέχεια (ενότητα 2.2.5).

2.2.4 Brisk

Με την έλευση των ολοένα και πιο μεγάλων εικόνων που πρέπει να αντιμετωπιστούν με την σχετικά χαμηλή ισχύ των φορητών συσκευών, τα σύγχρονα συστήματα όρασης δεν πρέπει να είναι μόνο ακριβή αλλά και υπολογιστικά αποδοτικά. Για το σκοπό αυτό, δυαδικοί (binary) περιγραφείς εικόνας παρέχουν μια ελκυστική εναλλακτική λύση απέναντι στα ευρέως χρησιμοποιούμενα σημεία του SIFT και του SURF, η οποία προσφέρει παρόμοια απόδοση αναγνώρισης με μικρότερες απαιτήσεις αποθήκευσης και υπολογιστικού κόστους.

Ο SIFT και ο SURF χρησιμοποιούν το HOG (*Histogram of Oriented Gradients*) για την εξαγωγή των διανυσμάτων των περιγραφικών χαρακτηριστικών, όπως προαναφέρθηκε. Πρόκειται για μια διαδικασία που βασίζεται στον υπολογισμό των προσανατολισμένων κλίσεων κάθε στοιχείου, γεγονός το οποίο την καθιστά αρκετά απαιτητική σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ. Η κωδικοποίηση της πληροφορίας με την χρήση απλών συγκρίσεων φωτεινότητας θα μπορούσε να είναι πιο αποτελεσματική. Οι δυαδικοί περιγραφείς, όπως ο Brisk (*Binary Robust Invariant Scalable Keypoints*), βασίζονται σε αυτή την σκέψη.

Η μεθοδολογία εντοπισμού σημείων ενδιαφέροντος που χρησιμοποιείται έχει ως άξονα την καλή υπολογιστική απόδοση, ενώ είναι εμπνευσμένη από το έργο των Mair et al. (2010). Πρόκειται ουσιαστικά για μια προσπάθεια βελτίωσης και επέκτασης του γνωστού αλγορίθμου Fast, ο οποίος έχει αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικός στην εξαγωγή χαρακτηριστικών. Με στόχο την επίτευξη αποτελεσμάτων ανθεκτικών σε αλλαγές κλίμακας, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος υψηλής ποιότητας, ο ανιχνευτής Brisk κάνει εκτίμηση της πραγματικής κλίμακας κάθε σημείου ενδιαφέροντος σε μια αναπαράσταση χώρου κλιμάκων (scale space), η οποία υλοποιείται μέσω της πυραμίδας της εικόνας.

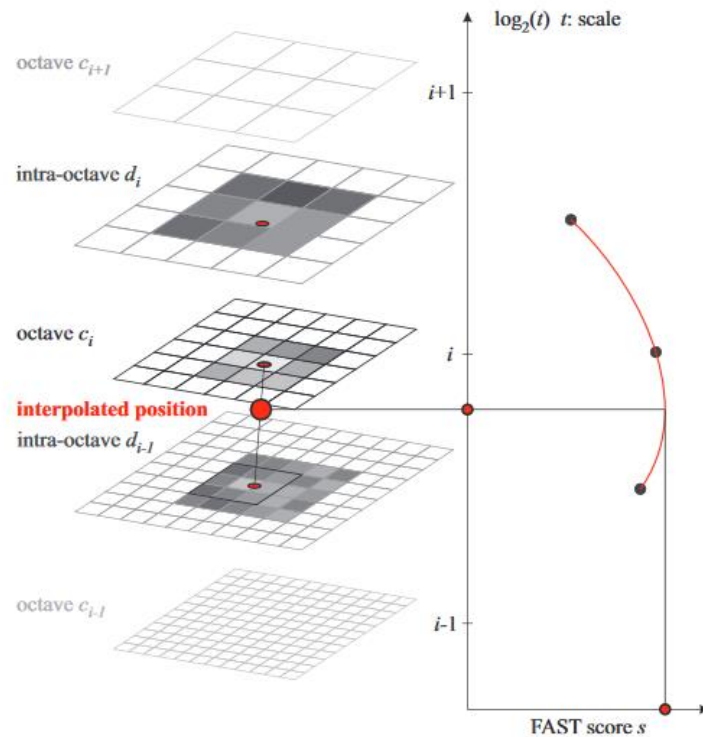
Η πυραμίδα χώρου κλιμάκων που δημιουργείται για κάθε εικόνα αποτελείται από n οκτάβες c_i και n ενδο-οκτάβες d_i , με $n = 4$. Κάθε οκτάβα δημιουργείται με κατάλληλη εξομάλυνση και υποδιπλασιασμό, σε κάθε επίπεδο, της χωρικής ανάλυσης της αρχικής εικόνας, ενώ κάθε ενδο-οκτάβα περιέχεται ανάμεσα στις οκτάβες c_i και c_{i+1} . Η πρώτη ενδο-οκτάβα δημιουργείται με μείωση της δειγματοληψίας της αρχικής εικόνας κατά έναν συντελεστή 1.5, ενώ τα υπόλοιπα στρώματα προέρχονται από διαδοχική μείωση της δειγματοληψίας κατά το ήμισυ. Συνεπώς αν t είναι η κλίμακα και i ο αριθμός κάθε οκτάβας ή ενδο-οκτάβας, τότε $t(c_i) = 2^i$ είναι ο συντελεστής της εν λόγω οκτάβας και $t(d_i) = 2^i * 1.5$ της ενδο-οκταβας αντίστοιχα.

Η εξαγωγή, λοιπόν, σημείων ενδιαφέροντος πραγματοποιείται βάσει του 'Fast skor' ως κριτηρίου σημαντικότητας. Αρχικά ο ανιχνευτής Fast 9-16 εφαρμόζεται σε κάθε οκτάβα και ενδο-οκτάβα ξεχωριστά με βάση το ίδιο όριο για τον εντοπισμό πιθανών περιοχών ενδιαφέροντος. Ο έλεγχος που πραγματοποιείται απαιτεί τουλάχιστον 9 διαδοχικές ει-

κονοψηφίδες να είναι επαρκώς πιο φωτεινές ή πιο σκούρες από αυτό, ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο Fast. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται σε έναν κύκλο 16 pixel που δημιουργείται περί την κεντρική εικονοψηφίδα.

Το υποψήφιο σημείο πρέπει να ικανοποιεί το μέγιστο όριο συγκρινόμενο με τα 8 γειτονικά του στο ίδιο επίπεδο.

- Το σκορ αυτό ορίζεται ως το μέγιστο όριο και συγκρίνεται με τα αντίστοιχα σκορ στο πάνω και το κάτω επίπεδο, τα οποία πρέπει να είναι μικρότερα
- Δεδομένου ότι τα γειτονιά επίπεδα, και κατ' επέκταση και τα *Fast scores*, παρουσιάζονται με διαφορετική “διακριτοποίηση”, εφαρμόζεται παρεμβολή στα όρια του προτύπου.
- Για κάθε μέγιστο που έχει ανιχνευθεί πραγματοποιείται υποψηφιακή βελτιστοποίηση και βελτιστοποίηση της συνεχούς κλίμακας.
- Αυτά τα βελτιωμένα σκορ χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή μιας 1D παραβολής κατά μήκος του άξονα κλίμακας, αποδίδοντας την τελική εκτίμηση του σκορ και της κλίμακας στο μέγιστο
- Οι συντεταγμένες της εικόνας παρεμβάλλονται εκ νέου μεταξύ των παραθύρων (patches) στα επίπεδα δίπλα στην καθορισμένη κλίμακα.



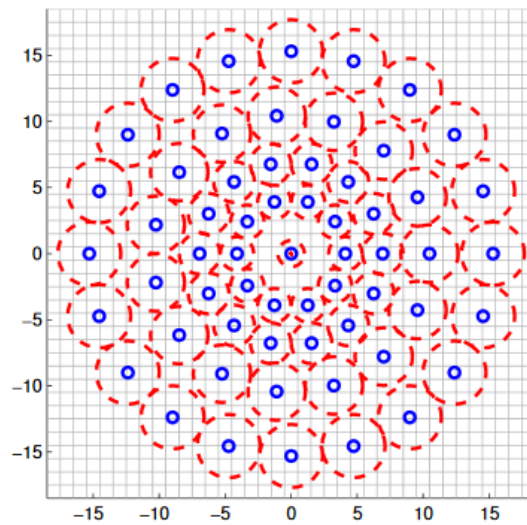
Εικόνα 2.6. Διαδικασία ανίχνευσης σημείου ενδιαφέροντος στον χώρο κλίμακας.

Να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, ότι η ανίχνευση των μεγίστων σε ολόκληρη την κλίμακα του άξονα στην οκτάβα c_0 αποτελεί ειδική περίπτωση. Με σκοπό τον υπολογισμό των *σکور Fast* για μια εικονική ενδο-οκτάβα $d-1$ κάτω από την c_0 , εφαρμόζεται η μάσκα *Fast* (5-8) στο c_0 . Ωστόσο, οι βαθμολογίες στο patch $d-1$ σε αυτή την περίπτωση δεν χρειάζεται να είναι χαμηλότερες από τα *σکور* των εξεταζόμενων σημείων στην *octave* 0.

Το διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών συντίθεται ως ένα δυαδικό αλφαριθμητικό (*binary string*) από τη συνένωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από απλές συγκρίσεις φωτεινότητας. Πιο συγκεκριμένα, από τον n αριθμό ζευγών σημείων που επιλέγονται κατά τη δειγματοληψία συγκρίνεται η ένταση ενός σημείου με όλα τα υπόλοιπα. Αν η πρώτη τιμή είναι μεγαλύτερη από τη δεύτερη σημειώνεται ο αριθμός 1, διαφορετικά ο αριθμός 0. Όπως είναι λογικό, πρόκειται για μια διαδικασία η οποία δεν απαιτεί ούτε χρόνο ούτε υπολογιστική μνήμη.

Δειγματοληψία σημείων

Με σκοπό την αποφυγή ανεπιθύμητων δευτερογενών σχηματισμών (*aliasing*) κατά την δειγματοληψία των εντάσεων των σημείων σε ένα *pattern* της εικόνας, εφαρμόζεται εξομάλυνση με φίλτρο *Gauss* τυπικής απόκλισης ανάλογης με την απόσταση μεταξύ των σημείων στον αντίστοιχο κύκλο.



Εικόνα 2.6. Πρότυπο δειγματοληψίας 60 σημείων που χρησιμοποιείται από το *Brisk*. Οι μικροί μπλε κύκλοι δηλώνουν την θέση του δείγματος, οι μεγαλύτεροι κόκκινοι κύκλοι με τη διακεκομμένη γραμμή σχεδιάζονται σε μια ακτίνα σ που αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση του πυρήνα *Gauss* που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των τιμών έντασης των σημείων δειγματοληψίας. Το πρότυπο της εικόνας εφαρμόζεται σε κλίμακα με $t = 1$.

Ο Brisk χρησιμοποιεί ένα ντετερμινιστικό πρότυπο δειγματοληψίας με αποτέλεσμα μια ομοιομορφία στην πυκνότητα των σημείων σε μια δεδομένη ακτίνα περί τα σημεία ενδιαφέροντος. Συνεπώς, η εξομάλυνση που εφαρμόζει δεν θα στρεβλώσει το περιεχόμενο μιας σύγκρισης φωτεινότητας, θολώνοντας δύο κοντινά (στην δειγματοληψία) σημεία σε μια σύγκριση.

Τα σημεία που χρησιμοποιούνται στην δειγματοληψία είναι σχετικά λίγα, καθώς ένα σημείο συμμετέχει σε περισσότερες από μια συγκρίσεις, περιορίζοντας έτσι την πολυπλοκότητα για υψηλότερες τιμές έντασης.

Τέλος, οι συγκρίσεις περιορίζονται χωρικά έτσι ώστε οι διακυμάνσεις φωτεινότητας που απαιτούνται να είναι τοπικά συνεπείς. Με δεδομένο λοιπόν πρότυπο δειγματοληψίας και το όριο της απόστασης όπως αυτά περιεγράφηκαν παραπάνω, προκύπτει τελικά ένα διάνυσμα μήκους 512 ψηφίων.

Το διάνυσμα που προκύπτει είναι ανθεκτικό σε αλλαγές κλίμακας και στροφών, γεγονός που οφείλεται στην εκ των προτέρων εφαρμογή κλίμακας και στροφής στο πρότυπο δειγματοληψίας.

Η αντιστοίχιση των διανυσμάτων περιγραφικών χαρακτηριστικών υπολογίζεται απλά από την απόσταση Hamming.

2.2.5 Mineigen

Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως γνωστή ως μέθοδος Shi - Tomasi (Shi & Tomasi, 1994), ενώ βασίζεται στον ανιχνευτή σημείων Harris. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο ανιχνευτών εντοπίζεται στην συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό ενός σημείου ως σημείου ενδιαφέροντος. Αυτή είναι μια υπολογιστικά απαιτητική μέθοδος που βασίζεται στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα των τετραγώνων των διαφορών της έντασης. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή δεν είναι ανθεκτική σε αλλαγές κλίμακας.

Πιο συγκεκριμένα:

- Τα σημεία ενδιαφέροντος (corner points) ανιχνεύονται βάσει των ελάχιστων ιδιοτιμών του πίνακα των διαφορών των εντάσεων μεταξύ των εικόνων.
- Το διάνυσμα των περιγραφικών χαρακτηριστικών που συνοδεύει κάθε σημείο ενδιαφέροντος εξάγεται βάσει του αλγορίθμου Freak.

Ο Freak είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μιας αλληλουχίας δυαδικών αλφαριθμητικών (strings) μέσω αποτελεσματικών συγκρίσεων των εντάσεων της εικόνας πάνω σε ένα μοτίβο “αμφιβληστροειδούς δειγματοληψίας”. Ο περιγραφέας αυτός είναι εμπνευσμένος από το ανθρώπινο οπτικό σύστημα και πιο συγκεκριμένα από τον αμφιβληστροειδή. Το διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών λαμ-

βάνεται από την σύγκριση των εντάσεων 512 ζευγών εικονοψηφίδων αφού έχει προηγηθεί εξομάλυνση με φίλτρο Gauss με σκοπό την μείωση της ευαισθησίας στον θόρυβο. Οι θέσεις των εικονοψηφίδων έχουν προεπιλεγεί τυχαία σύμφωνα με την κατανομή Gauss περί το κέντρο της περιοχής (patch). Το διάλυμα περιγραφικών χαρακτηριστικών που προκύπτει δεν είναι ανθεκτικό σε αλλαγές κλίμακας και στροφής, εκτός και αν συνδυάζεται με κάποιον ανιχνευτή που δείχνει ανθεκτικότητα σε τέτοιες αλλαγές.

2.2.6 Mser (Maximally stable extremal regions)

Ένα βασικό πρόβλημα στην εύρεση ομολογιών είναι αυτό της αποκατάστασης αντιστοιχιών μεταξύ ενός ζεύγους εικόνων που έχουν ληφθεί από διαφορετικό σημείο.

Στο πλαίσιο της προσπάθειας επίλυσης του προβλήματος αυτού χρησιμοποιήθηκε ένα νέο σύνολο στοιχείων της εικόνας που τίθενται προς αντιστοιχία και αναφέρεται με τον όρο *extremal regions*. Οι περιοχές αυτές έχουν ιδιαίτερα επιθυμητές ιδιότητες, καθώς το σύνολο αυτών βρίσκονται κάτω από:

- Συνεχή (και ως εκ τούτου προβολικό) μετασχηματισμό των συντεταγμένων της εικόνας
- Μονοτονικό μετασχηματισμό των εντάσεων της εικόνας.

Ο Mser προτάθηκε από τους Matas et al. (2002) – βλ. και Donoser & Bischof (2006) – ως αποτελεσματικός (με σχεδόν γραμμική πολυπλοκότητα) και πρακτικά γρήγορος αλγόριθμος ανίχνευσης αφινικά αμετάβλητων περιοχών (*maximally stable extremal regions*).

Η εύρεση αξιόπιστων αντιστοιχιών σε δυο εικόνες, οι οποίες έχουν ληφθεί από αυθαίρετα σημεία λήψης, με διαφορετικές κάμερες και σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, είναι ένα δύσκολο και κρίσιμο βήμα προς την πλήρως αυτοματοποιημένη τρισδιάστατη ανακατασκευή. Ένα κρίσιμο ζήτημα είναι η επιλογή των στοιχείων των οποίων ζητείται η αντιστοίχιση. Σε περιπτώσεις στερεοζεύγους με μεγάλη βάση δεν μπορεί να γίνει ρεαλιστική προσέγγιση των τοπικών παραμορφώσεων της εικόνας με απλή μετάθεση ή μετάθεση και στροφή, καθώς απαιτείται ένα πλήρως αφινικό μοντέλο. Η αντιστοίχιση, λοιπόν, δεν μπορεί να καθοριστεί από τη σύγκριση περιοχών σταθερού σχήματος, όπως ορθογώνια ή κύκλοι, δεδομένου ότι τα σχήματα δεν διατηρούνται στον αφινικό μετασχηματισμό.

Τα στερεοσκοπικά συστήματα δημιουργούν ένα παραμορφωμένο και πολύπλοκο πεδίο βάθους, και ανάλογα με την βάση μεταξύ των καμερών και της απόστασης του αντικειμένου από την κάμερα πρέπει να αντισταθμίζονται διάφορες γεωμετρικές συνέπειες. Σε στερεοσκοπικά συστήματα με μεγάλη βάση, τα χαρακτηριστικά που βρίσκονται κοντά στην κάμερα παραμορφώνονται από αφινικούς μετασχηματισμούς, δυσχεραίνοντας τη διαδικασία εύρεσης ομολογιών μεταξύ της δεξιάς και της αριστερής εικόνας του ζεύγους. Η προσέγγιση, λοιπόν, του Mser επιχειρεί να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα με την αντιστοίχιση χαρακτηριστικών, όπως είναι οι “άμορφες” περιοχές (blobs). Οι περιο-

χές που εξάγονται από τον Mser είναι παρόμοιες με “άμορφες μάζες” και είναι αρκετά ανθεκτικές στην παραμόρφωση και την αλλαγή φωτεινότητας. Στον τομέα της όρασης υπολογιστών, η ανίχνευση “άμορφων” περιοχών (blobs) αναφέρεται σε μαθηματικές μεθόδους που στοχεύουν στον εντοπισμό περιοχών σε μια ψηφιακή εικόνα που διαφέρουν ως προς τις ιδιότητες, όπως η φωτεινότητα ή το χρώμα, σε σύγκριση με περιοχές γύρω από αυτές.

Ο τελεστής αυτός, λοιπόν, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση “άμορφων” περιοχών ή κηλίδων (blobs) σε εικόνες. Στην υπολογιστική όραση, η μέθοδος ανίχνευσης άμορφων περιοχών στοχεύει στην ανίχνευση περιοχών σε μια ψηφιακή εικόνα, οι οποίες διαφέρουν σε ιδιότητες όπως φωτεινότητα ή χρώμα, συγκρινόμενα με τις περιοχές που τα περιβάλλουν. Στην ουσία έχει επικρατήσει ότι πρόκειται για περιοχές της εικόνας όπου κάποια χαρακτηριστικά παραμένουν σταθερά ή σχεδόν σταθερά. Όλα τα σημεία μέσα σε μια τέτοια περιοχή μπορεί να θεωρηθεί κατά κάποιο τρόπο ότι είναι παρόμοια μεταξύ τους.

Ο ανιχνευτής Mser “κινείται” μέσα στο εύρος των εντάσεων της εικόνας εισόδου, με σκοπό την ανίχνευση σταθερών περιοχών. Οι περιοχές που εντοπίζονται από τον Mser είναι κλειστές υπό συνεχείς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ενώ παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε αφινικές αλλαγές. Επιπλέον, η ανίχνευσή τους πραγματοποιείται σε διαφορετικές κλίμακες.

Ο Mser επιστρέφει περιοχές ενδιαφέροντος στις οποίες προσαρμόζονται ελλείψεις και κεντροειδή περί το κέντρο της μάζας. Παρ’ όλα αυτά πρόκειται για μια μέθοδο που δεν είναι ανθεκτική σε αλλαγές της κλίμακας, καθώς δεν προσομοιάζει την θολότητα που δημιουργείται από την αυξανόμενη απόσταση από το αντικείμενο. Από την άλλη μεριά, παρουσιάζει καλές επιδόσεις στις περιπτώσεις αλλαγής φωτεινότητας μεταξύ των εικόνων.

Η μέθοδος Mser περιλαμβάνει ταξινόμηση των εικονοψηφίδων που βρίσκονται σε ένα σύνολο περιοχών, βάσει ενός δυαδικού ορίου έντασης. Περιοχές με παρόμοια τιμή εικονοψηφίδας σε ένα εύρος τιμών κατωφλίου, οι οποίες βρίσκονται σε ένα πρότυπο συνδεδεμένων στοιχείων (*connected component pattern*), θεωρούνται ως σταθερά μεγιστά (*maximally stable*). Για τον υπολογισμό τέτοιων περιοχών, οι εικονοψηφίδες ταξινομούνται σε ένα βρόχο δυαδικού ορίου έντασης, ο οποίος σαρώνει τις τιμές έντασης από την μικρότερη στην μεγαλύτερη. Αρχικά, το δυαδικό όριο έντασης ορίζεται σε χαμηλή τιμή όπως το μηδέν σε ένα κανάλι της εικόνας, σε εκείνο της έντασης (luminance) για παράδειγμα. Οι εικονοψηφίδες με τιμή έντασης μικρότερη από την τιμή του ορίου εμφανίζονται μαύρες, διαφορετικά εμφανίζονται λευκές. Σε κάθε επίπεδο κατωφλίου, φυλάσσεται ένας κατάλογος με συνδεδεμένα στοιχεία ή pixels. Το όριο της τιμής έντασης αυξάνεται από το μηδέν ως την μέγιστη τιμή που εμφανίζει κάποιο pixel. Περιοχές που δεν αναπτύσσονται ή συρρικνώνονται ή μεταβάλλονται καθώς η ένταση διαφοροποιείται, θεωρούνται σταθερές (*maximally stable*). Για τις περιοχές αυτές ο περιγρα-

φάας Mser καταγράφει τις θέσεις τους και τα αντίστοιχα όρια (κατώφλια).

Σε διεικονικές εφαρμογές επιλέγονται μικρότερες περιοχές Mser και η συσχέτιση χρησιμοποιείται για τις τελικές αντιστοιχίσεις, ενώ η ομοιότητα υπολογίζεται μέσα σε ένα σύνολο κυκλικών περιοχών Mser με δεδομένα διαστήματα στροφής. Ο ανιχνευτής αυτός για την εξαγωγή του διανύσματος των περιγραφικών χαρακτηριστικών κάθε περιοχής που εξάγει χρησιμοποιεί τον τελεστή Surf.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο Mser:

- Ανίχνευση σε πολλαπλές κλίμακες και χαρακτηριστικά σε πολλαπλές κλίμακες. Δεδομένου ότι τα χαρακτηριστικά Mser δεν απαιτούν καμία εξομάλυνση της εικόνας ή δημιουργία αναπαράστασης χώρου κλιμάκων, μπορούν να ανιχνευτούν τόσο χονδροειδή όσο και λεπτά χαρακτηριστικά.
- Σημαντικού μεγέθους χαρακτηριστικά υπολογίζονται συνεχώς κατά μήκος μιας ολόκληρης περιοχής, καθώς δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του προτύπου ή παραθύρου αναζήτησης.
- Παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε αφινικούς μετασχηματισμούς.
- Παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε αλλαγές σχήματος και σταθερότητα στην ανίχνευση, δεδομένου ότι οι “extrema” περιοχές τείνουν να ανιχνεύονται κατά μήκος ενός μεγάλου εύρους μετασχηματισμών της εικόνας.

2.2.7 ASIFT (Affine Scale Invariant Feature Transform)

Ο αλγόριθμος SIFT είναι ουσιαστικά η μόνη μέθοδος που είναι πλήρως ανεξάρτητη των διαφορικών μεταβολών κλίμακας που εμφανίζονται μεταξύ των εικόνων. Ωστόσο, δεδομένου ότι δεν έχει σχεδιαστεί με σκοπό να καλύπτει ολόκληρο τον αφινικό χώρο, η απόδοσή του μειώνεται γρήγορα για έντονες μεταβολές του σημείου λήψης. Για τον λόγο αυτό προτάθηκε τους (Morel & Yu, 2011) ένας νέος αλγόριθμος, ο οποίος αποτελεί επέκταση του SIFT και είναι πλήρως ανεξάρτητος από αφινικούς μετασχηματισμούς.

Εάν ένα αντικείμενο έχει εξομαλυμένα ή σχεδόν εξομαλυμένα όρια, οι εικόνες που λαμβάνονται από την κάμερα σε διάφορες θέσεις θα παρουσιάζουν εμφανείς παραμορφώσεις. Αυτές οι παραμορφώσεις προσεγγίζονται τοπικά με αφινικούς μετασχηματισμούς της επίπεδης εικόνας. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα αναγνώρισης του στερεού αντικειμένου συχνά έχει οδηγήσει στην αναζήτηση τοπικών χαρακτηριστικών της εικόνας αμετάβλητων σε αφινικές παραμορφώσεις. Τέτοια αμετάβλητα χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να ληφθούν με μεθόδους κανονικοποίησης, αλλά δεν υπάρχει καμία μέθοδος πλήρους αφινικής κανονικοποίησης προς το παρόν. Ακόμα και η ανθεκτικότητα σε αλλαγές κλίμακας αντιμετωπίζεται με αυστηρότητα μόνο με την μέθοδο SIFT.

Ο αλγόριθμος SIFT είναι αμετάβλητος σε τέσσερις από τις έξι παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού. Ο Affine Sift προσομοιώνει όλες τις όψεις της εικόνας μεταβάλ-

λοντας τις παραμέτρους των δύο αξόνων προσανατολισμού της κάμερας, δηλαδή τις γωνίες του γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Οι δύο αυτές γωνίες ορίζουν την διεύθυνση στον χώρο του άξονα της μηχανής που απεικονίζει ένα τοπικά επίπεδο αντικείμενο. Αυτές οι δύο παράμετροι εισάγουν την αφινική παραμόρφωση και επιτρέπουν σε κάθε τέτοια απεικόνιση να εφαρμόζεται πλέον κανονικά ο αλγόριθμος SIFT. Η μέθοδος που προκύπτει μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά ότι είναι πλήρως ανεπηρέαστη από αφινικές παραμορφώσεις.

Η ιδέα του συνδυασμού προσομοίωσης και κανονικοποίησης είναι το κύριο στοιχείο στην μέθοδο **Asift**.

Οι δημιουργοί του αλγορίθμου εισήγαγαν μια κρίσιμη παράμετρο για την αξιολόγηση της απόδοσης της αφινικής αναγνώρισης, την μετάβαση/μετάπτωση κλίσης (*transition tilt*). Η μετάβαση κλίσης μετράει το βαθμό αλλαγής του σημείου λήψης από την μια εικόνα στην άλλη.

Η κύρια παραμόρφωση/μεταβολή από μια εικόνα σε άλλη που οφείλεται στην εφαρμογή αφινικών μετασχηματισμών μπορεί να μετρηθεί με τον όρο αυτό. Η μετάβαση κλίσης χρησιμοποιείται ουσιαστικά για την μέτρηση της ποσότητας της κλίσης μεταξύ δύο τέτοιων εικόνων, ενώ είναι ισοδύναμη με την γωνία του γεωγραφικού πλάτους και μήκους της κάμερας.

Με τον όρο “απόλυτη κλίση” (*absolute tilt*) χαρακτηρίζεται η κλίση μεταξύ της εμπρόσθιας/μετωπιαίας όψης και της κεκλιμένης.

Οι δύο αυτοί όροι απεικονίζουν γιατί η προσομοίωση μεγάλων κλίσεων και στις δύο εικόνες αποδεικνύεται απαραίτητη για την επίτευξη μιας πλήρως αφινικής αναγνώρισης. Η μετάβαση των κλίσεων μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από τις απόλυτες κλίσεις. Στην πραγματικότητα μπορούν να συμπεριφέρονται όπως το τετράγωνο των απόλυτων κλίσεων. Η απόδοση των γνωστότερων αφινικά αμετάβλητων μεθόδων μπορεί να αξιολογηθεί από την εφικτή μετάβαση των κλίσεων.

2.3 Παράμετροι Τελεστών

Οι τελεστές χρησιμοποιούν ορισμένες παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν τον αριθμό αλλά και την ποιότητα των σημείων ενδιαφέροντος που εξάγονται. Οι παράμετροι αυτές κυμαίνονται μεταξύ ενός εύρους τιμών. Όπως είναι λογικό, η μεταβολή της τιμής μιας παραμέτρου επιφέρει και μεταβολή στην κατανομή των σημείων ενδιαφέροντος που εξάγονται, το οποίο κατ' επέκταση οδηγεί και σε μεταβολή των αποτελεσμάτων των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού που υπολογίζονται στην συνέχεια. Για τον λόγο αυτό λοιπόν θα πρέπει κανείς να καταλήξει, ύστερα από δοκιμές, στις τιμές αυτές των παραμέτρων για τις οποίες κάθε τελεστής αποδίδει καλύτερα στο υπό εξέταση ζεύγος εικόνων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι κυριότερες από τις παραμέτρους των τελεστών που προαναφέρθηκαν, οι οποίες παρουσιάζονται για κάθε τελεστή στην συνέχεια.

2.3.1 Sift

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν για τον αλγόριθμο Sift είναι οι εξής δύο:

- *PeakThreshold* (0:5:15)

Η παράμετρος αυτή φιλτράρει τις κορυφές της πυραμίδας DoG που έχουν πολύ μικρές τιμές (σε απόλυτη τιμή). Συνεπώς σημεία-κλειδιά με χαμηλή τιμή έντασης (*low contrast keypoints*) συγκριτικά με τις γειτονικές εικονοψηφίδες απορρίπτονται. Οι κορυφές που εμφανίζουν μικρή διαφορά έντασης είναι πιθανό να έχουν δημιουργηθεί από θόρυβο και για αυτό τον λόγο απορρίπτονται. Αύξηση της τιμής της παραμέτρου συντελεί στην εξαγωγή λιγότερων χαρακτηριστικών.

- *EdgeThreshold* (3,5:1,5:11)

Τα σημεία συχνά παράγονται από ακμές και δεν αποδίδουν σταθερά χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, προκειμένου να αυξηθεί η σταθερότητα πρέπει να εξαλειφθούν τα σημεία ενδιαφέροντος τα οποία έχουν ανεπαρκώς προσδιοριζόμενες θέσεις αλλά υψηλή απόκριση σε ακμές. Το όριο αυτό εξαλείφει τις κορυφές της πυραμίδας με πολύ μικρή καμπυλότητα. Η αύξηση της τιμής επιφέρει εξαγωγή περισσότερων χαρακτηριστικών.

2.3.2 Brisk

Για τον αλγόριθμο Brisk εξετάστηκαν οι εξής δύο παράμετροι:

- *MinContrast*

Η παράμετρος αυτή ορίζει την ελάχιστη τιμή διαφοράς έντασης που μπορεί να έχει το κεντρικό pixel (*corner point*) από τα γειτονικά του. Αύξηση της τιμής αυτής συνεπάγεται μείωση του αριθμού των σημείων που εξάγονται.

Η προκαθορισμένη τιμή που έχει επιλεγεί για την παράμετρο αυτή είναι το 0.2, ενώ το εύρος αποδεκτών τιμών είναι από 0 έως 1. Στην παρουσία εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα υποσύνολο του εύρους που αναφέρθηκε, με τιμές από 0.1 έως 0.6 και βήμα 0.05.

- *MinQuality*

Η συγκεκριμένη παράμετρος ορίζει την ελάχιστη αποδεκτή ποιότητα των γωνιών και αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό της μέγιστης μετρικής τιμής του *corner point* στην εικόνα. Η αύξηση της τιμής συντελεί στην απομάκρυνση λανθασμένων *corner points*.

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι 0.1 για εύρος τιμών 0.1 έως 1. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 0.1 έως 0.6 με βήμα 0.05.

2.3.3 Mser

Για τον αλγόριθμο αυτό εξετάστηκαν οι παρακάτω δύο παράμετροι:

- *ThresholdDelta*

Η παράμετρος αυτή ορίζει το βήμα (όριο έντασης) βάσει του οποίου θα εξεταστεί η εικόνα με σκοπό την εύρεση σταθερών περιοχών. Συνεπώς μείωση της τιμής της παραμέτρου συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των περιοχών.

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι η τιμή 2 για εύρος τιμών 0 έως 100. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 0.4 έως 4 με βήμα 0.4.

- *MaxAreaVariation*

Ορίζει την μέγιστη τιμή διακύμανσης έντασης μεταξύ των περιοχών ανά εύρος, δηλαδή ανά κατηγορία εντάσεων. Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου έχει ως αποτέλεσμα να επιστρέφονται περισσότερες περιοχές, οι οποίες όμως ενδέχεται να είναι λιγότερο σταθερές.

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι η τιμή 0.25 για εύρος τιμών 0.1 έως 1. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 0.1 έως 1 με βήμα 0.1.

2.3.4 Mineigen

Για τον αλγόριθμο αυτό εξετάστηκε η εξής παράμετρος:

- *minQuality*

Ορίζει την ελάχιστη αποδεκτή ποιότητα των γωνιών και αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό της μέγιστης μετρικής τιμής του corner point στην εικόνα. Η αύξηση της τιμής συντελεί στην απομάκρυνση λανθασμένων corner points.

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι 0.01 για εύρος τιμών 0 έως 1. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 0.01 έως 0.91 με βήμα 0.1.

2.3.5 Fast

Οι δύο παράμετροι που εξετάστηκαν είναι οι εξής:

- *MinContrast*

Ορίζει την ελάχιστη τιμή διαφοράς έντασης που μπορεί να έχει το κεντρικό pixel (corner point) από τα γειτονικά του. Αύξηση της τιμής αυτής συνεπάγεται μείωση του αριθμού των γωνιών.

θμού των corner points που εξάγονται.

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι 0.2 για εύρος τιμών 0 έως 1. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 0.1 έως 0.6 με βήμα 0.05.

- *MinQuality*

Ορίζει την ελάχιστη αποδεκτή ποιότητα των γωνιών και αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό της μέγιστης μετρικής τιμής του corner point στην εικόνα. Η αύξηση της τιμής συντελεί στην απομάκρυνση λανθασμένων corner points.

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι 0.01 για εύρος τιμών 0 έως 1. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 0.1 έως 0.6 με βήμα 0.05.

2.3.6 Surf

Για τον αλγόριθμο αυτό εξετάστηκε η παράμετρος:

- *MetricThreshold*

Η παράμετρος αυτή ορίζει μια τιμή για την επιλογή των ισχυρότερων χαρακτηριστικών. Με την μείωση της τιμής του ορίου επιστρέφονται περισσότερες περιοχές (*blobs*).

Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου είναι η τιμή 1000 για ένα εύρος θετικών αριθμών. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε εδώ είναι από 100 έως 1600 με βήμα 100.

3 Επιτολικός Πίνακας

Με την αυτόματη εξαγωγή ομόλογων σημείων δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του επιτολικού πίνακα (F) μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών, ο οποίος εκφράζει την δισδιάστατη επιτολική γεωμετρία. Την ανάλογη έρευνα στο πεδίο της φωτογραμμετρίας επικαιροποίησε ο Bender το 1971, αναφερόμενος για πρώτη φορά στην έννοια του “γενικευμένου σχετικού προσανατολισμού”, αφού είχαν προηγηθεί ορισμένες σημαντικές θεωρητικές διατυπώσεις από τον φωτογραμμέτη S. Finsterwalder στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Η έρευνα ολοκληρώθηκε με την διατύπωση, θεωρητική θεμελίωση και διερεύνηση του επιτολικού πίνακα, που όμως προήλθε από το πεδίο της όρασης υπολογιστών (Καλησπεράκης, 2010).

Ο Torr & Murray (1997) χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά τον αλγόριθμο RANSAC των Fischler & Bolles (1981), που πραγματοποιεί ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων, για την βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού του F , πράγμα που μπορεί να αποτελέσει μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία εάν βασιστεί στον αυτόματο εντοπισμό ομολογιών σημείων, όπως θα αναφερθεί στην συνέχεια.

Μέσω του επιτολικού πίνακα είναι δυνατόν να υπολογιστεί η θέση των πόλων του ζεύγους, οι ομόλογες επιτολικές ευθείες, η επιτολική ευθεία που αντιστοιχεί σε εικονοσημείο καθώς και να δημιουργηθούν επιτολικές εικόνες. Εδώ ενδιαφέρει ο επιτολικός πίνακας επειδή ακριβώς μέσω αυτού αξιολογούνται οι επιδόσεις των εξεταζόμενων σημειακών τελεστών.

3.1 RANSAC

Για ακριβή και σωστό υπολογισμό του F απαιτείται οι ομολογίες σημείων να είναι σωστές, διαφορετικά θα οδηγήσουν σε εσφαλμένους υπολογισμούς. Πιθανές αιτίες κακών ομολογιών είναι ο θόρυβος της εικόνας, οι αποκρύψεις, η “θολότητα” και αλλαγές στο σημείο λήψης και τον φωτισμό, για τα οποία τα μαθηματικά μοντέλα των ανιχνευτών χαρακτηριστικών ή των περιγραφέντων δεν έχουν μεριμνήσει. Για παράδειγμα, οι περισσότερες τεχνικές αντιστοίχισης χαρακτηριστικών μπορούν να αντιμετωπίσουν τις γραμμικές αλλαγές φωτισμού, τις απλές στροφές της κάμερας και αλλαγής της κλίμακας ή την αφινική παραμόρφωση. Ωστόσο, αυτά είναι απλά μαθηματικά μοντέλα που προσεγγίζουν την πολύπλοκη πραγματικότητα (κορεσμός της εικόνας, προοπτικές παραμορφώσεις κ.λπ.). Την αυτόματη συνταύτιση ομόλογων σημείων, λοιπόν, ακολουθεί η ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων, με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού. Ο διαθέσιμος αριθμός ομολογιών συνήθως είναι αρκετά μεγάλος, συνεπώς η ανίχνευση χονδροειδών σφαλμάτων γίνεται συνήθως μέσω του αλγορίθμου RANSAC.

Πρόκειται ουσιαστικά για μια τεχνική δειγματοληψίας που παράγει υποψήφιες λύσεις χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αριθμό παρατηρήσεων (δεδομένα σημείων) που απαιτούνται για τον υπολογισμό των υποκείμενων παραμέτρων του μοντέλου. Όπως επισημαίνεται από τους Fischler & Bolles (1981), σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές δει-

γματοληψίας οι οποίες χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων ώστε να προκύψει μια αρχική λύση και στην συνέχεια προχωρούν στην απομάκρυνση των ακραίων τιμών, ο RANSAC χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν μικρότερο σύνολο και προχωράει στην μεγέθυνση αυτού του συνόλου με συμβατά δεδομένα σημείων.

Η εφαρμογή του για τον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα έγινε, όπως σημειώθηκε, για πρώτη φορά από τους Torr & Murray (1997). Τα βασικά βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος συνοψίζονται παρακάτω:

1. Επιλέγει τυχαία τον μικρότερο δυνατό αριθμό σημείων που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου. Το κάθε δείγμα, λοιπόν, αποτελείται από 7 ομολογίες σημείων.
2. Από κάθε δείγμα υπολογίζεται ο επιπολικός πίνακας F με βάση τον αλγόριθμο των 7 σημείων. Μειονέκτημα αποτελεί πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος πιθανώς να επιστρέψει τρεις επιπολικούς πίνακες, οι οποίοι θα πρέπει να ελεγχθούν περαιτέρω.
3. Για κάθε επιπολικό πίνακα υπολογίζεται η απόσταση Sampson από την αντίστοιχη επιπολική ευθεία για όλες τις ομολογίες σημείων που έχουν αναγνωριστεί από τον αλγόριθμο συνταύτισης. Εάν η τιμή που προκύπτει είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, η ομολογία θεωρείται έγκυρη (inliers), διαφορετικά θεωρείται άκυρη (outliers).
4. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων, ώστε να εξασφαλιστεί η επιδιωκόμενη ακρίβεια.
5. Ο αριθμός N των δειγμάτων, δηλαδή των επαναλήψεων που απαιτούνται ώστε κάποιο από αυτά να περιλαμβάνει μόνο inliers με πιθανότητα p , δίνεται από την εξής σχέση (Καλησπεράκης, 2010):

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - \epsilon)^s)}$$

όπου s ο αριθμός των ελάχιστων σημείων που απαιτούνται σε κάθε δείγμα και ϵ η εκτίμηση του ποσοστού των χονδροειδών σφαλμάτων.

6. Τελικά, επιλέγεται ο επιπολικός πίνακας με τον οποίο συμβαδίζει ο μεγαλύτερος αριθμός inliers, και όλα πλέον τα σημεία αυτά συγκροτούν ένα νέο δείγμα βάσει του οποίου γίνεται εκ νέου υπολογισμός του επιπολικού πίνακα.

3.2 Επιπολικές εικόνες

Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται εδώ ότι η έννοια της επιπολικής γεωμετρίας περιγράφει την προβολική σχέση που ενυπάρχει μεταξύ ζεύγους επικαλυπτόμενων εικόνων (Schenk, 1999, Hartley & Zisserman, 2003, Kraus, 2003, Καλησπεράκης, 2010, Αδάμ, 2011). Για την ερμηνεία της είναι απαραίτητοι οι ακόλουθοι ορισμοί (Σχ. 3.1):

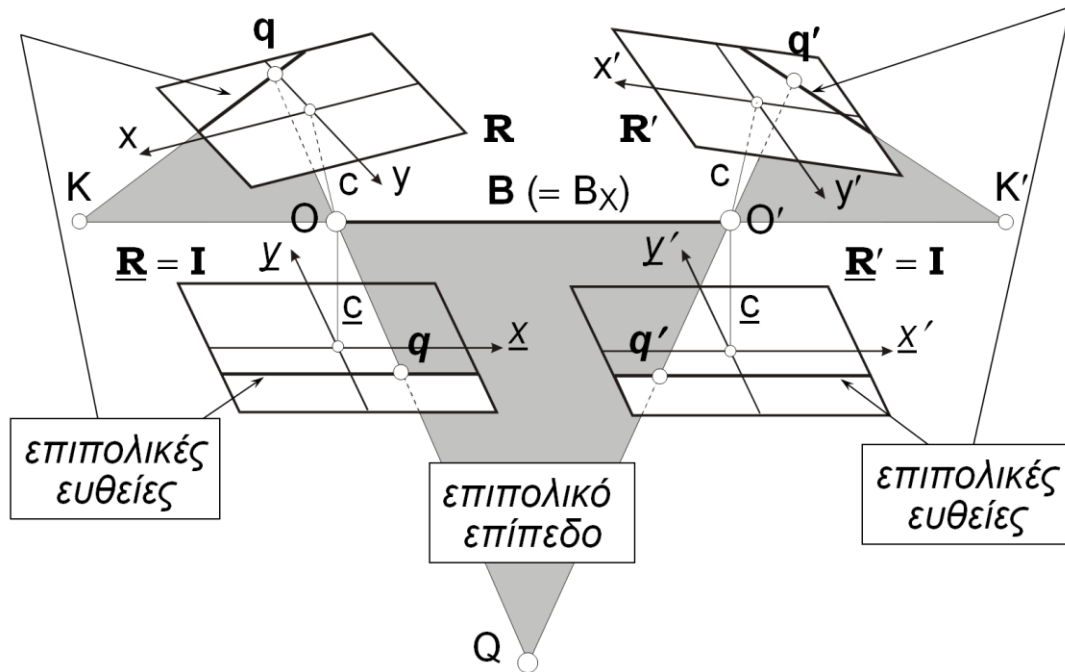
- *Βάση του στερεοζεύγους*: η ευθεία του χώρου (ή κατά περίπτωση το ευθύγραμ-

μο τμήμα) που ορίζεται από τα δύο προβολικά κέντρα O και O' των δύο εικόνων, οι οποίες έχουν αντίστοιχους πίνακες στροφής \mathbf{R} , \mathbf{R}' και έχουν ληφθεί με σταθερά μηχανής c .

- *Επιπολικό επίπεδο* σημείου Q του χώρου: ορίζεται ως το επίπεδο που περιλαμβάνει το Q , τη βάση B και συγχρόνως τα ομόλογα εικονοσημεία q και q' .
- *Επιπολική γραμμή*: η τομή του επιπολικού επιπέδου με κάθε ένα από τα επίπεδα των δύο εικόνων.
- *Πόλοι του στερεοζεύγους* (K και K'): τα σημεία τομής της βάσης με τα επίπεδα των εικόνων (οι πόλοι είναι, ταυτόχρονα, και σημεία σύγκλισης των επιπολικών γραμμών στην αντίστοιχη εικόνα του ζεύγους). Σε κάθε στερεοζεύγος υπάρχουν επομένως δυο πόλοι, ένας σε κάθε εικόνα, οι οποίοι στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών βρίσκονται πολύ έξω από τα όρια των εικόνων. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις όπου οι εικόνες του στερεοζεύγους έχουν μικρή σύγκλιση μεταξύ τους, δηλαδή μικρή σχετική γωνία ϕ (ή πολύ μικρή συνιστώσα B_z).

Όπως είναι γνωστό, κατά τη στιγμή της λήψης οι εικόνες (και συγκεκριμένα τα συστήματα αναφοράς τους xy και $x'y'$) βρίσκονται γενικά σε τυχαία θέση ως προς την βάση του ζεύγους, πράγμα που ισχύει συνεπώς και για την θέση και τον προσανατολισμό των επιπολικών ευθειών. Ζητούμενο κατά την διαδικασία επιπολικής επανασύστασης στερεοζεύγους είναι ακριβώς η δημιουργία ζεύγους εικόνων (από τα ίδια σημεία λήψης) οι οποίες θα είναι συνεπίπεδες, και επιπλέον οι ομόλογες επιπολικές γραμμές θα συμπίπτουν με τις ομόλογες γραμμές της εικόνας, δηλαδή οι επιπολικές γραμμές θα είναι συνευθειακές κατά μήκος του άξονα x των εικόνων (Θεοφάνους, 2004). Αυτό σημαίνει ότι οι πίνακες στροφής των νέων εικόνων θα είναι $\mathbf{R} = \mathbf{R}' = \mathbf{I}$, ενώ η βάση του ζεύγους θα είναι παράλληλη στον άξονα X του συστήματος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται “κανονικοποίηση στερεοζεύγους”. Στο Σχ. 3.1 φαίνεται η περίπτωση της θέσης δύο εικόνων κατά τη στιγμή της λήψης και η θέση τους μετά από την διαδικασία της κανονικοποίησης (επιπολικής επανασύστασης). Στο σχήμα αυτό έχει θεωρηθεί η απλή περίπτωση όπου οι κατά Y και Z συνιστώσες της βάσης του ζεύγους είναι μηδενικές ($B_y = B_z = 0$), δηλαδή για την βάση της λήψης είναι εξαρχής $B = B_x$.

Για να γίνει εφικτή αυτή η διαδικασία, τα εικονοσημεία πρέπει να μετασχηματιστούν έτσι ώστε οι άξονες x των συστημάτων αναφοράς τους να ταυτίζονται και να είναι παράλληλοι στην βάση του ζεύγους. Αντίστοιχα, οι άξονες y των δύο συστημάτων πρέπει να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι οι μετασχηματισμένες εικόνες είναι πλέον συνεπίπεδες, παράλληλες στην βάση και οι κατά x άξονές τους συμπίπτουν.



Εικόνα 3.1. Επιπολική γεωμετρία εικόνων.

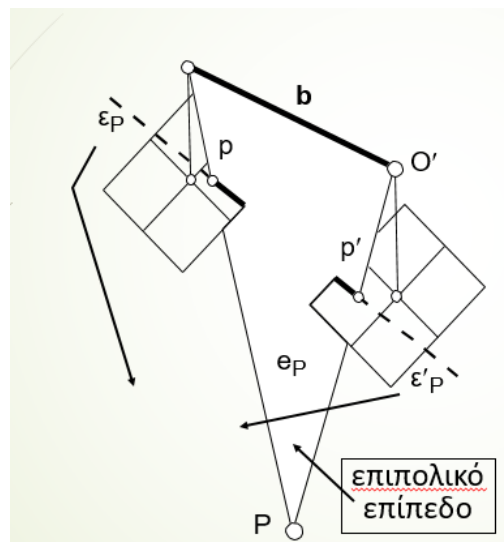
Η χρησιμότητα της επιπολικής επανασύστασης στερεοζευγών είναι μεγάλη στην ψηφιακή φωτογραμμετρία, κατ' αρχάς επειδή αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για στερεοσκοπική παρατήρηση στους ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς. Η χρησιμότητα όμως της δημιουργίας επιπολικών εικόνων στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά και γενικότερα σε διαδικασίες αυτοματισμού, έγκειται σε μια άλλη βασική ιδιότητά τους, δηλαδή στην διευκόλυνση που προσφέρουν κατά τη διαδικασία εύρεσης ομόλογων σημείων, ιδίως με σκοπό την υλοποίηση πυκνής συνταύτισης μεταξύ εικόνων. Όπως είναι γνωστό, για την εύρεση ομόλογων σημείων ακολουθείται συνήθως μια διαδικασία αναζήτησης της "ομόλογης εικονοψηφίδας" στην δεξιά εικόνα, η οποία στο επιπολικό ζεύγος περιορίζεται κατ' αρχήν κατά μήκος μιας και μόνο γραμμής.

4 Σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους

Την διαδικασία ανίχνευσης χονδροειδών σφαλμάτων μέσω του αλγορίθμου *RANSAC* ακολουθεί ο τελικός προσδιορισμός του σχετικού προσανατολισμού του στερεοζεύγους.

Κατά την λήψη, κάθε σημείο του αντικειμένου ορίζει μια ακτίνα προβολής με καθένα από τα δύο σημεία λήψης, οπότε για την παραγωγή ενός μοντέλου του αντικειμένου αρκεί να φέρουμε τις δύο εσωτερικά προσανατολισμένες δέσμες σε σωστή σχετικά θέση ώστε να τέμνονται όλες οι ομόλογες ακτίνες (Εικόνα 4.1). Το σχετικά προσανατολισμένο μοντέλο σημαίνει τα εξής ισοδύναμα:

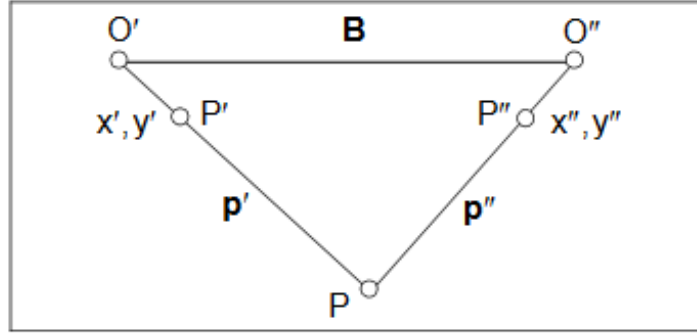
- Δημιουργία ≥ 5 επιπολικών επιπέδων
- Τομή των ομόλογων ακτίνων, πράγμα που εξασφαλίζεται με την τομή ≥ 5 ομόλογων ακτίνων
- Άρση της ασυμβατότητας ≥ 5 ομόλογων ακτίνων
- Εξάλειψη της κατά γ παράλλαξης των εικόνων
- Δημιουργία στερεομοντέλου.



Εικόνα 4.1.Επιπολικές εικόνες όπου φαίνεται η τομή στο χώρο δύο ακτίνων που προέρχονται από δύο ομόλογα σημεία.

4.1 Συνθήκη συνεπιπεδότητας

Η συνθήκη συνεπιπεδότητας αποτελεί την αναλυτική έκφραση του σχετικού προσανατολισμού. Στην προκειμένη περίπτωση η συνθήκη αυτή εξασφαλίζει ότι για κάθε σημείο P που απεικονίζεται στο επικαλυπτόμενο τμήμα του ζεύγους ισχύει πως το διάνυσμα B της βάσης και τα δύο ομόλογα διανύσματα p' (αριστερή ακτίνα προβολής) και p'' (δεξιά ακτίνα προβολής) είναι συνεπίπεδα (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2. Παρουσιάζεται οπτικά η αναλυτική έκφραση του σχετικού προσανατολισμού, η οποία εκφράζεται μέσω της συνθήκης συνεπιπεδότητας.

Η συνεπιπεδότητα των τριών διανυσμάτων ισοδυναμεί με τον μηδενισμό του ακόλουθου μικτού γινομένου:

$$B \cdot (p' \times p'') = B \cdot d = 0$$

Το εξωτερικό γινόμενο ορίζει ένα διάνυσμα d που είναι κάθετο στο επίπεδο ϵ (επιπολικό επίπεδο) που ορίζουν τα p' , p'' . Δεδομένου ότι και η βάση ανήκει στο επίπεδο αυτό, το d είναι κάθετο και σε αυτήν, άρα το εσωτερικό του γινόμενο με την βάση οφείλει να μηδενίζεται αφού εκφράζει το συνημίτονο της γωνίας των δύο διανυσμάτων. Οπότε πρέπει να ισχύει:

$$\begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ p'_x & p'_y & p'_z \\ p''_x & p''_y & p''_z \end{vmatrix} = 0$$

όπου θεωρώντας τους λόγους

$$\beta_x = \frac{B_y}{B_x} \beta_z = \frac{B_z}{B_x}$$

προκύπτει:

$$B_x \begin{vmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ p'_x & p'_y & p'_z \\ p''_x & p''_y & p''_z \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow \begin{vmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ p'_x & p'_y & p'_z \\ p''_x & p''_y & p''_z \end{vmatrix} = 0$$

Τα διανύσματα των ακτίνων προβολής μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$p' = \overrightarrow{O'P} = k' \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix} = k' \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix} \quad p'' = \overrightarrow{O''P} = \begin{bmatrix} p''_x \\ p''_y \\ p''_z \end{bmatrix} = k'' R_{\Sigma}^T \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ -c \end{bmatrix} = k'' \begin{bmatrix} x''_{\delta} \\ y''_{\delta} \\ -c_{\delta} \end{bmatrix}$$

όπου ο πίνακας στροφής R_{Σ} περιγράφει την σχετική στροφή της δεξιάς εικόνας ως προς την αριστερή, περιγράφει δηλαδή τον προσανατολισμό της στο σύστημα της αρι-

στερής εικόνας. Οι συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται θεωρείται ότι έχουν αναχθεί στα πρωτεύοντα σημεία των εικόνων.

Έτσι, με αντικατάσταση προκύπτει το εξής:

$$\begin{vmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ x' & y' & -c \\ x'' & y'' & -c_\delta \end{vmatrix} = 0$$

και με χρήση των στοιχείων r_{ij} του πίνακα στροφής R_Σ τελικά:

$$\begin{aligned} & c(x''r_{12} + y''r_{22} - cr_{32}) + y'(x''r_{13} + y''r_{23} - cr_{33}) \\ & - \beta_y[x'(x''r_{13} + y''r_{23} - cr_{33}) + c(x''r_{11} + y''r_{21} - cr_{31})] \\ & + \beta_z[x'(x''r_{12} + y''r_{22} - cr_{32}) - y'(x''r_{11} + y''r_{21} - cr_{31})] = 0 \end{aligned}$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί την τελική έκφραση της συνθήκης συνεπιπεδότητας που χρησιμοποιείται για να βρεθούν τα πέντε στοιχεία του σχετικού προσανατολισμού, δηλαδή οι δύο σχετικές συνιστώσες β_y και β_z της βάσης και οι τρεις γωνίες στροφής ω_Σ , φ_Σ , κ_Σ της δεξιάς εικόνας ως προς την αριστερή.

Η περίσσεια των παρατηρήσεων επιβάλλει να προκύψουν οι τιμές των παρατηρήσεων με συνόρθωση με την ΜΕΤ. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την ύπαρξη αρχικών τιμών για τις 5 παραμέτρους της μη γραμμικής ως προς τους αγνώστους εξίσωσης. Η επιλογή των αρχικών τιμών αποτελεί μια διαδικασία, η δυσκολία της οποίας ποικίλει ανάλογα με το είδος των εικόνων του στερεοζεύγους. Στην αεροφωτογραμμετρία, για παράδειγμα, η επιλογή τους είναι κατά βάση απλή, καθώς οι αρχικές τιμές μπορούν να είναι μηδενικές, ενώ βέβαια σε περιπτώσεις επίγειων ζευγών με μεγάλες στροφές η επιλογή αρχικών τιμών είναι πιο σύνθετη υπόθεση.

Η συνθήκη συνεπιπεδότητας είναι μη γραμμική όχι μόνο ως προς τις άγνωστες παραμέτρους β_y , β_z , ω_Σ , φ_Σ , κ_Σ αλλά και ως προς τα παρατηρούμενα μεγέθη x' , y' και x'' , y'' . Κάθε ομόλογο σημείο δίνει μια συνθήκη, στην οποία εμπλέκονται και οι τέσσερις παρατηρήσεις του σημείου.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η γενική μέθοδος, όπου ως παρατηρήσεις θεωρούνται τα άμεσα μετρημένα μεγέθη, δηλαδή οι τέσσερις εικονοσυντεταγμένες ανά σημείο. Τα ομόλογα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν ως παρατηρήσεις για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας είναι αυτά που προέκυψαν από την εφαρμογή των τελεστών, μετά την απομάκρυνση των χονδροειδών σφαλμάτων με την βοήθεια του αλγορίθμου RANSAC.

5 Θερμικές εικόνες

Δεδομένου ότι ένα από τα ζεύγη εικόνων που εξετάστηκε προέρχεται από θερμικές μηχανές, θα γίνει εδώ συνοπτική αναφορά στις θερμικές εικόνες, δεδομένου ότι η χρήση τους στην φωτογραμμετρία είναι (προς το παρόν τουλάχιστον) πολύ περιορισμένη.

Η υπολογιστική όραση είναι ένα ισχυρό εργαλείο που αποκρυπτογραφεί σημαντικές πληροφορίες από ψηφιακές εικόνες. Αυτή η αυτοματοποιημένη διαδικασία είναι πρόσφορη για τον εντοπισμό κίνησης, ανίχνευση γεγονότων, αναγνώριση αντικειμένων, οργάνωση βάσεων δεδομένων εικόνων, και ανακατασκευή εικόνων με ακρίβεια και ορθότητα. Το εύρος των εφαρμογών κυμαίνεται από την ανάλυση ιατρικών εικόνων, μέσω των οποίων εντοπίζονται όγκοι, μέχρι την παρακολούθηση και εποπτεία πεζών. Από την άλλη μεριά, η υπολογιστική όραση με την χρήση θερμικών εικόνων είναι χρήσιμη σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν διαφορές θερμοκρασίας. Οι πιο ευρέως γνωστές εφαρμογές συναντώνται γενικά στην ιατρική, την βιομηχανία, την ασφάλεια και την επιτήρηση (Lee, 2008).

Η διαδικασία απεικόνισης του υπέρυθρου τμήματος του φωτός παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με εκείνη της απεικόνισης του ορατού τμήματος. Αν οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τα οπτικά κανάλια στην υπολογιστική όραση μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε υπέρυθρες εικόνες με καθόλου ή μικρές παραμορφώσεις θα λυνόταν το πρόβλημα του επαναπρογραμματισμού (ανάπτυξης από την αρχή) ενός ολόκληρου συνόλου τεχνικών. Ωστόσο σημειώνονται σημαντικές διαφορές στις πρακτικές περιβαλλοντικές παραμέτρους μεταξύ των υπέρυθρων καναλιών, που ακυρώνουν πολλές υποθέσεις που χρησιμοποιούνται για το υπόβαθρο, οι οποίες είναι εγγενείς με τις τεχνικές των ορατών καναλιών στην υπολογιστική όραση (Lim, 2001).

Η υπολογιστική όραση, και ειδικά το μέρος που ασχολείται με την ανθρώπινη όραση, όπως η επεξεργασία εικόνας, αναπτύσσεται περισσότερο γύρω από την λήψη εικόνων στην ορατή ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το περιβάλλον που ζούμε παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή αυτής της φασματικής ζώνης ως “ορατής” στους ανθρώπους. Η βασική πηγή ενέργειας, ο Ήλιος, εκπέμπει όλες τις συχνότητες της ακτινοβολίας με αιχμή γύρω από την ορατή ζώνη. Η θερμοκρασία της Γης και η σύνθεση της ατμόσφαιρας έχουν ως αποτέλεσμα ένα περιβάλλον όπου η ακτινοβολία στην ορατή ζώνη μπορεί να ταξιδέψει με μεγάλες αποστάσεις με σχετικά χαμηλή εξασθένηση. Σύμφωνα με το επίπεδο θερμοκρασίας γύρω από την επιφάνεια της Γης, τα περισσότερα υλικά εκπέμπουν λίγη ποσότητα ενέργειας στο ορατό κανάλι από μόνα τους. Έτσι χρησιμοποιώντας το ορατό τμήμα έχουμε ένα καλό παθητικό τρόπο ανίχνευσης μακρινών γεγονότων με λίγες σχετικά περιβαλλοντικές παρεμβολές.

Ένα μειονέκτημα της χρήσης των οπτικών καναλιών, ωστόσο, είναι ότι την μισή ημέρα ο Ήλιος δεν λάμπει πάνω από τα κεφάλια μας, οπότε το σήμα από τα ορατά κανάλια πέφτει κάτω από το επίπεδο της αξιόπιστης ανίχνευσης.

Για το μέσο εύρος θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης, ωστόσο, τα πλέον κοινά υλικά εκπέμπουν 'αυθόρμητα' σημαντικές ποσότητες ακτινοβολίας σε ένα κανάλι που έχει ονομαστεί υπέρυθρο.

Το υπέρυθρο κανάλι ακτινοβολίας ανακαλύφθηκε πρώτη φορά σε ένα πείραμα από τον Sir William Herschel. Η ακτινοβολία ανιχνεύθηκε έμμεσα με θέρμανση που σχετίζεται με την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η αρχή αυτή είναι σε χρήση ακόμα και σήμερα με τους τελευταίους μη "ψυχόμενους" υπέρυθρους ανιχνευτές. Αν και η ανίχνευση της υπέρυθρης ενέργειας γίνεται εδώ και δύο αιώνες, η ακριβής ποσοτική μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι δύσκολη και η ανάπτυξή της υστερεί σε σχέση με τους ανιχνευτές του ορατού φωτός. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ο θόρυβος. Στο ορατό κανάλι η βασική πηγή ενέργειας είναι ο Ήλιος ή μια ανθρώπινα ελεγχόμενη πηγή φωτός. Από την άλλη μεριά, στο υπέρυθρο κανάλι τα πάντα γύρω μας είναι μια πιθανή πηγή φωτός. Ένα άλλο εμπόδιο στην ανάπτυξη της υπέρυθρης απεικόνισης είναι τα υλικά που απαιτούνται για τους υπέρυθρους φακούς. Εκτός από τα κανάλια που είναι πολύ κοντά στις ορατές μπάντες, τα συνηθισμένα οπτικά γυαλιά είναι αδιαφανή στα περισσότερα υπέρυθρα κανάλια.

Ημιαγωγοί και τεχνολογία μικρομηχανικής βελτιώνουν σημαντικά τις ιδιότητες και την απόδοση των υπέρυθρων ανιχνευτών, καθώς επίσης και την μείωση του κόστους. Τα υλικά των φακών αυτών, αν και ακόμα είναι λίγα συγκριτικά με τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ορατά κανάλια, ήδη διαθέτουν ορισμένα εμπορικά προϊόντα. Με την ραγδαία εξέλιξη των απεικονίσεων στις υπέρυθρες κάμερες, οι απαιτήσεις για τους αλγόριθμους της υπολογιστικής όρασης στην αυτόματη ανάλυση υπέρυθρων εικόνων αυξάνονται.

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στην υπολογιστική όραση επεκτείνονται ορισμένες φορές και στις υπέρυθρες εικόνες, με την βοήθεια όμως κάποιων παραδοχών. Η σχετική απόδοση ωστόσο διαφέρει λόγω του ότι οι υπέρυθρες εικόνες έχουν γενικά μικρότερη ανάλυση, ενώ περιέχουν και περισσότερο θόρυβο. Αυτό βέβαια μπορεί να βελτιωθεί στο μέλλον.

6 Τρόπος αξιολόγησης αποτελεσμάτων

Μετά από την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας και την εξαγωγή των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού πρέπει βέβαια να ελεγχθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων αυτών, και ταυτόχρονα με αυτόν τον τρόπο να αξιολογηθούν συγκριτικά οι διαφορετικοί τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους, καθώς και οι διαφορετικές τιμές των παραμέτρων κάθε τελεστή.

Για τον λόγο αυτό λοιπόν, υπολογίζεται ένα *ολικό γωνιακό σφάλμα* ($\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}$) του σχετικού προσανατολισμού βάσει των σφαλμάτων των τιμών των παραμέτρων του όπως αυτές προκύπτουν από την συνθήκη συνεπιπεδότητας. Η βασική λογική εδώ είναι ότι για να δημιουργηθεί ένα μοναδικό μέτρο για την αξιολόγηση της ακρίβειας του σχετικού προσανατολισμού, θα πρέπει να υιοθετηθούν εκφράσεις των παραμέτρων που είναι συμβατές μεταξύ τους. Μπορεί να θεωρηθεί, λοιπόν, ότι οι παράμετροι του σχετικού προσανατολισμού είναι 5 *γωνιακά* μεγέθη, αφού αντί μέσω των παραμέτρων b_y , b_z η *διεύθυνση* της βάσης στον χώρο του μοντέλου μπορεί να οριστεί με δύο γωνίες. Έτσι:

- Γίνεται μετατροπή των γραμμικών μεγεθών b_y , b_z σε γωνιακά από τις ακόλουθες σχέσεις, όπου $b_x = 1$:

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{b_y}{b_x}\right) \quad \delta = \tan^{-1}\left(\frac{-b_z}{\sqrt{b_x^2 + b_y^2}}\right)$$

- Τα σφάλματα των μεγεθών που υπολογίζονται προκύπτουν μέσω του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων ως εξής από τα σφάλματα των παραμέτρων b_y , b_z (που είναι τα πρωτογενή εξαγόμενα της συνόρθωσης):

$$\sigma_\gamma = \frac{1}{1+b_y^2} \sigma_{b_y} \quad \sigma_\delta = \frac{1}{1+\left(\frac{b_z}{\sqrt{1+b_y^2}}\right)} \sigma_{b_z}$$

- Τελικά, λοιπόν, ο υπολογισμός του μέσου συνολικού γωνιακού σφάλματος προκύπτει πλέον από τη σχέση:

$$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}} = \sqrt{\frac{\sigma_\gamma^2 + \sigma_\delta^2 + \sigma_\omega^2 + \sigma_\phi^2 + \sigma_\kappa^2}{5}}$$

Με το μέτρο αυτό έχει, έτσι, κανείς μια *ενιαία* έκφραση για την *συνολική* ακρίβεια του σχετικού προσανατολισμού, η οποία για κάθε επίλυση μέσω κάθε σημειακού τελεστή ενσωματώνει ταυτόχρονα τις επιδράσεις τόσο των τυχαίων σφαλμάτων (ακρίβεια συνταύτισης σημείων) όσο και της γεωμετρίας της συνόρθωσης (πλήθος και κατανομή ομολογιών σημείων).

7 Εφαρμογές και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την εφαρμογή και αξιολόγηση των τελεστών εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν κατά το δυνατόν διαφορετικά ζεύγη εικόνων, όπως αεροφωτογραφίες, ένα σετ δεδομένων από την ISPRS (πεντακάμερο με διαφορετικές γωνίες λήψης), εικόνες από επίγεια λήψη καθώς και εικόνες από θερμικές κάμερες.

7.1 Πρώτο ζεύγος εικόνων

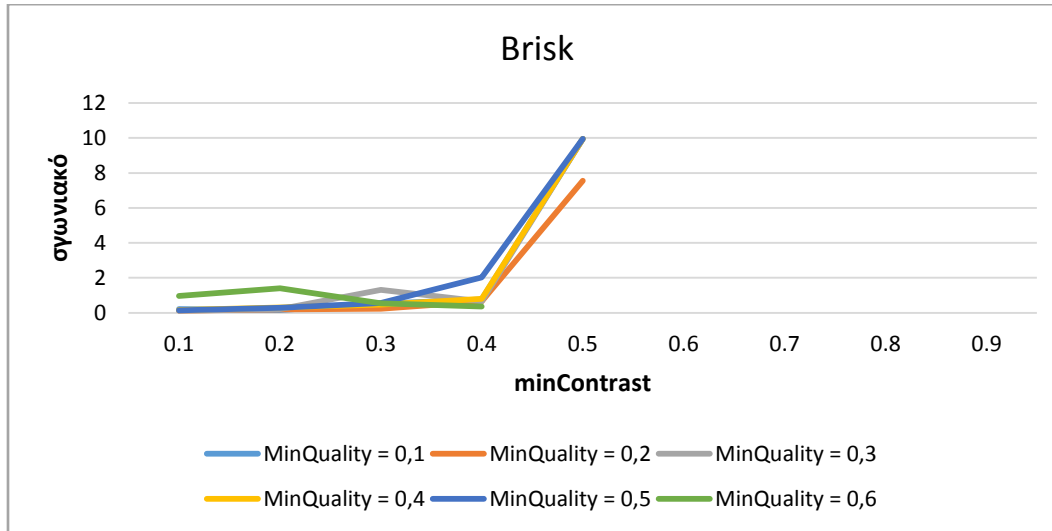
Το πρώτο ζεύγος εικόνων είναι από την περιοχή των Βιλίων. Το συγκεκριμένο στερεοζεύγος εικόνων από UAV, καθώς και τα αποτελέσματα που το συνοδεύουν, είχε χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο του μαθήματος «Ψηφιακές Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι» του προηγούμενου εξαμήνου και παρατίθενται εδώ για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τα νέα ζεύγη εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν.



7.1. Στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών από τα Βίλια (1152x864).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (παντού σε μοίρες) συναρτήσεως των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε τελεστή.

7.1.1 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Brisk



7.2. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Brisk.

Από τη μορφή του παραπάνω διαγράμματος συμπεραίνει κανείς ότι για όλες τις τιμές της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκαν, το μικρότερο σφάλμα εντοπίζεται σε αυτές με την μικρότερη τιμή minContrast. Η παράμετρος αυτή, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως, ορίζει την ελάχιστη τιμή διαφοράς έντασης που μπορεί να έχει το υπό εξέταση pixel από τα γειτονικά του. Η αύξηση της τιμής αυτής συνεπάγεται την μείωση του αριθμού των corner points που εξάγονται. Συνεπώς το γεγονός ότι τα μικρότερα σφάλματα εντοπίζονται στις περιπτώσεις εκείνες όπου η παράμετρος minContrast έχει την μικρότερη τιμή από το εύρος τιμών που εξετάστηκε, οφείλεται προφανώς στην περίσσεια των σημείων που εξήχθησαν και, ενδεχομένως, κατ' επέκταση στην καλή κατανομή των σημείων αυτών στην εικόνα. Τέλος, παρατηρείται ότι για τιμές μεγαλύτερες από 0.5 τα σημεία που εξάγονται δεν επαρκούν για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας και συνεπώς ο προσδιορισμός του συνολικού γωνιακού σφάλματος καθίσταται αδύνατος.

Από την άλλη μεριά, η παράμετρος minQuality, ορίζει την ελάχιστη αποδεκτή ποιότητα των σημείων και αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ελάχιστης μετρητικής τιμής τους.

Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου συντελεί θεωρητικά στην απομάκρυνση λανθασμένων corner point, γεγονός λοιπόν που ενισχύει την άποψη ότι τα μικρότερα σφάλματα εντοπίζονται στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των σημείων που εξάγονται είναι μεγάλος. Να σημειωθεί εδώ ότι το εύρος τιμών που εξετάστηκε για την παράμετρο αυ-

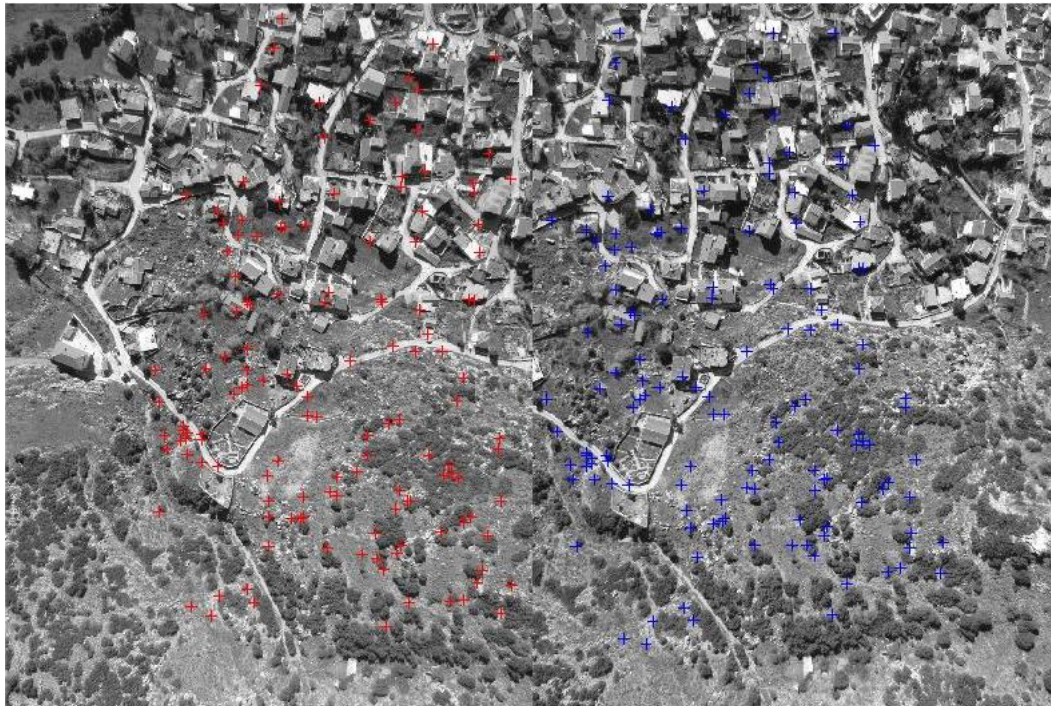
τή είναι από 0.1 έως και 0.9. Για τιμές μεγαλύτερες του 0.6 οι καμπύλες δεν αποδόθηκαν καθώς ο αριθμός των σημείων που εξήχθησαν δεν ήταν επαρκής.

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Brisk στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων $MinQuality = 0.2$ και $MinContrast = 0.1$.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
-0.426	-0.088	2.7490	-3.2513	-11.3698	0.24	0.1149

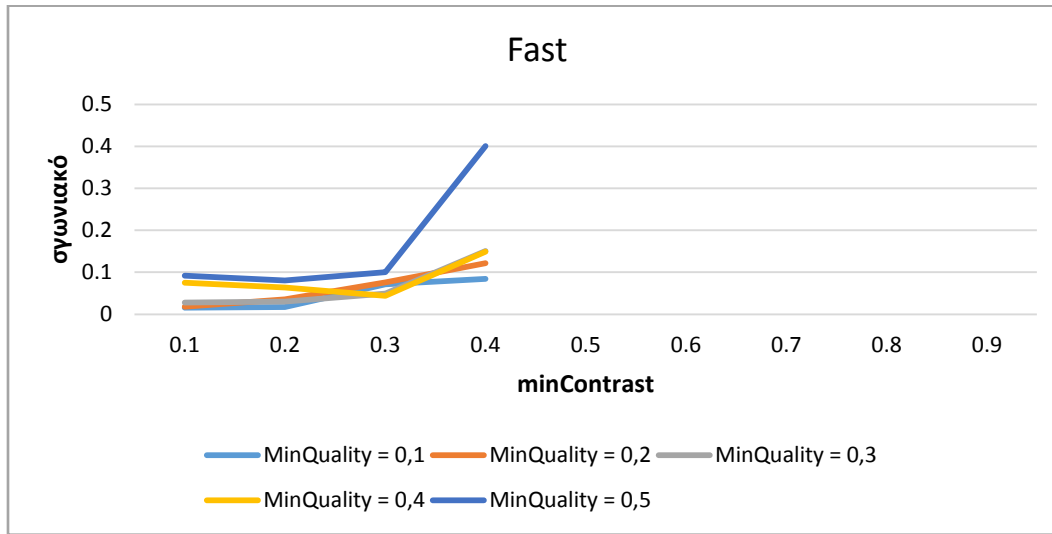
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
8257	188	146

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Brisk για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.3. Επιτολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Brisk στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (μπλε χρώμα) εικόνα.

7.1.2 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Fast



7.4. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast* για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Fast*.

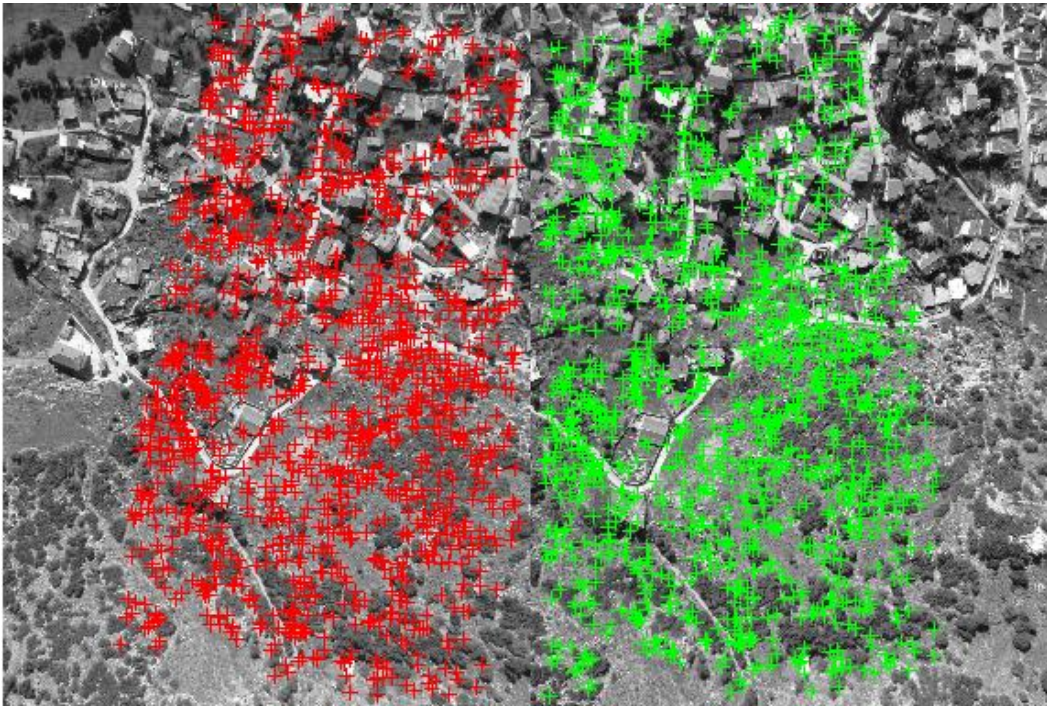
Οι παράμετροι που εξετάστηκαν για τον τελεστή *Fast* είναι οι ίδιοι με εκείνους που χρησιμοποιήθηκαν και στον αλγόριθμο *Brisk*. Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι και στην περίπτωση αυτή η μεταβολή του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων είναι η ίδια ή σχεδόν ίδια. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η μείωση των τιμών των παραμέτρων συνεπάγεται την μείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Στην περίπτωση του τελεστή *Fast* η εξαγωγή επαρκούς, για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού, αριθμού σημείων ενδιαφέροντος σημειώνεται για τιμές από 0.1 έως 0.4 για την παράμετρο *minContrast* και 0.1 έως 0.5 για την παράμετρο *minQuality*. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος που προκύπτουν είναι πολύ μικρότερες (μικρότερες από το 1/10) από εκείνες που προκύπτουν στην περίπτωση του συντελεστή *Brisk*, γεγονός που υποδηλώνει ότι για το συγκεκριμένο εύρος τιμών των παραμέτρων και τις συγκεκριμένες εικόνες ο τελεστής *Fast* αποδίδει πολύ καλύτερα συγκριτικά με τον *Brisk*.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Fast* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων *MinQuality* = 0.1 και *MinContrast* = 0.1.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\kappa} (^{\circ})$
-0.427	-0.092	2.7699	-3.1942	-11.4179	0.19	0.0157

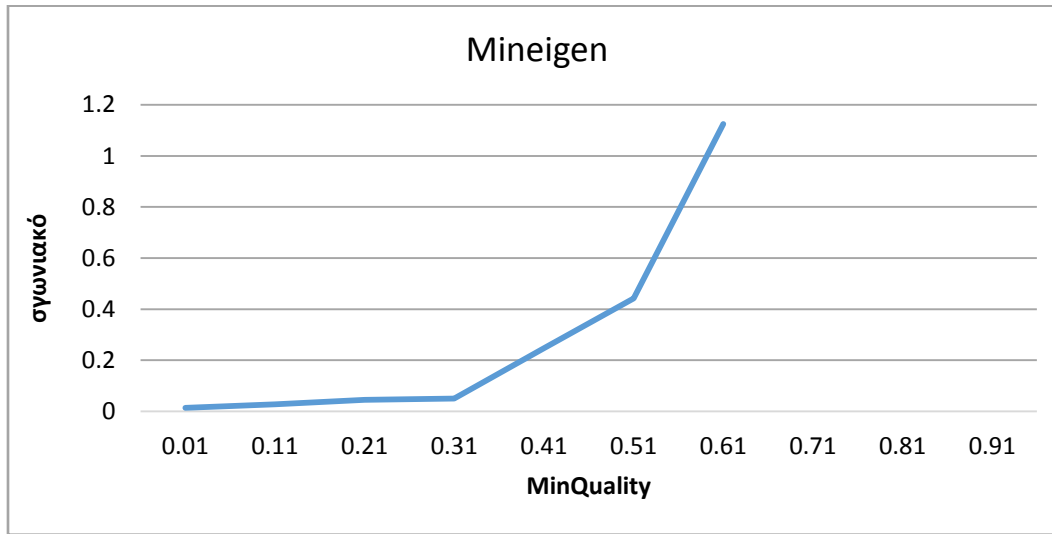
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
31329	1403	1061

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Fast για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.5. Επιτολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Fast στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.1.3 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Mineigen



7.6. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MinQuality*. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Mineigen*.

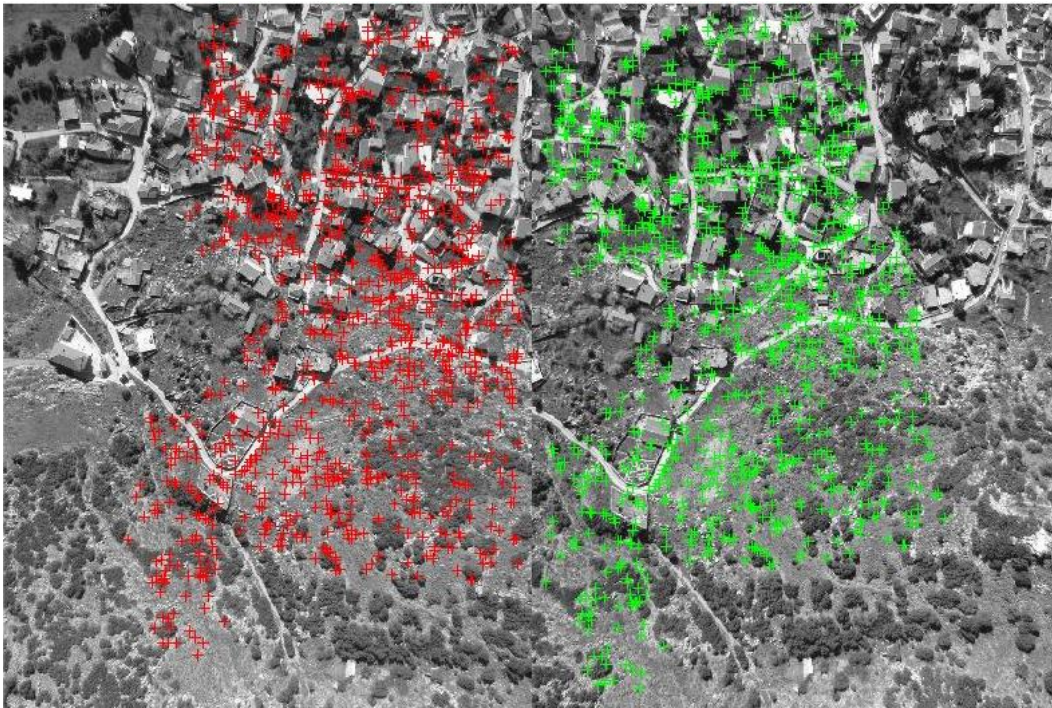
Ο αλγόριθμος *Mineigen* εξετάστηκε βάσει της παραμέτρου *minQuality*. Το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε είναι από 0.01 έως και 0.91 με βήμα 0.1. Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου συνεπάγεται και αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Για τιμές μεγαλύτερες του 0.61 ο αριθμός των εξαγόμενων σημείων δεν επαρκεί για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας (και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού και τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος). Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου *minQuality* οδηγεί σε απομάκρυνση λανθασμένων *corner points*, όπως προκύπτει από την βιβλιογραφία, γεγονός όμως που συντελεί στην μείωση του συνολικού αριθμού των σημείων και την αύξηση του συνολικού γωνιακού σφάλματος λόγω της κακής, πιθανότατα, κατανομής των σημείων στην εικόνα. Τέλος, από το διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόδοση του τελεστή *Mineigen* πλησιάζει εκείνη του τελεστή *Fast*.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Mineigen* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις παρουσιάζονται για τιμή *MinQuality* = 0.01.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\iota\alpha\kappa\omicron} (^{\circ})$
-0.425	-0.092	2.7362	-3.2350	-11.4150	0.18	0.0135

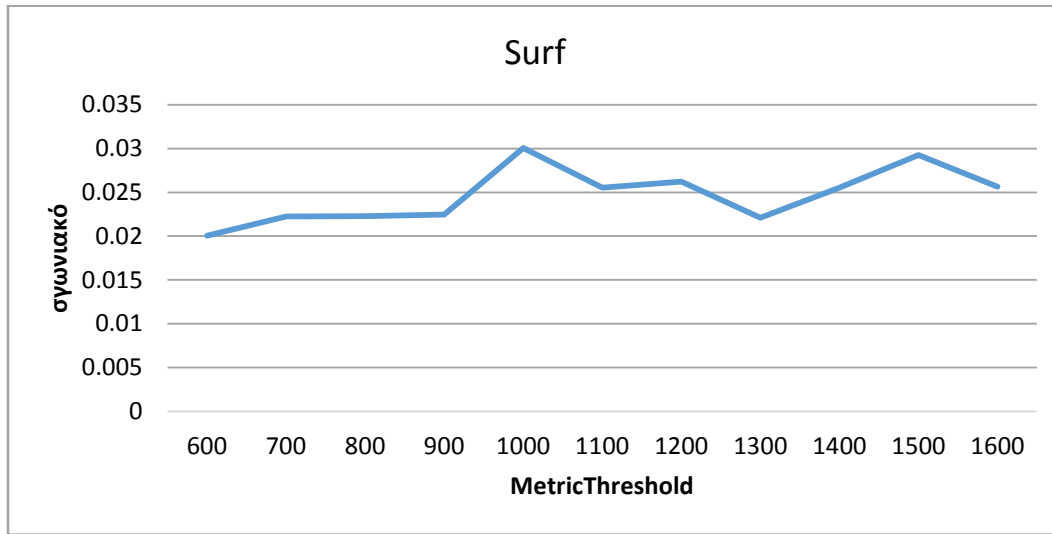
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
20624	1368	1083

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen για την βέλτιστη τιμή της παραμέτρου παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



7.7. Επιτολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.1.4 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Surf



7.8. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MetricThreshold*. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Surf*.

Ο τελεστής *Surf* εξετάστηκε βάσει της παραμέτρου *MetricThreshold*, η οποία ορίζει μια τιμή για την επιλογή των ισχυρότερων χαρακτηριστικών. Μείωση της τιμής αυτής συνεπάγεται θεωρητικά την εξαγωγή περισσότερων περιοχών. Για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε είναι από 600 έως 1600 με βήμα 100.

Από την μορφή του ανωτέρω διαγράμματος δεν παρατηρούνται αξιόλογες μεταβολές στο συνολικό γωνιακό σφάλμα συναρτήσει της μεταβολής της τιμής της παραμέτρου *MetricThreshold*. Η μικρότερη τιμή σφάλματος εμφανίζεται για τιμή παραμέτρου ίση με 600, γεγονός που δικαιολογείται από τον μεγάλο αριθμό περιοχών που εξάγονται και προφανώς την καλή κατανομή τους στην εικόνα.

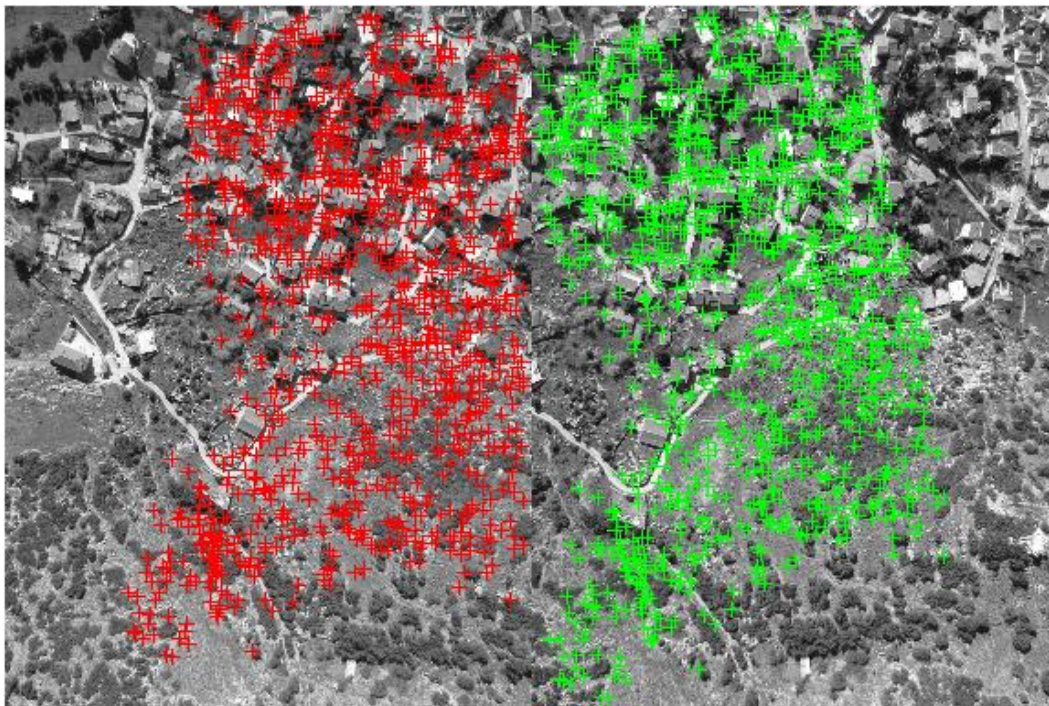
Οι τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος που προκύπτουν για κάθε τιμή παραμέτρου κυμαίνονται μεταξύ $0.02^\circ - 0.03^\circ$. Συνεπώς η απόδοση του εν λόγω τελεστή πλησιάζει εκείνη του τελεστή *Fast*.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Surf* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμή παραμέτρου *MetricThreshold* = 600.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\kappa} (^{\circ})$
-0.425	-0.091	2.7405	-3.2028	-11.4230	0.322	0.0201

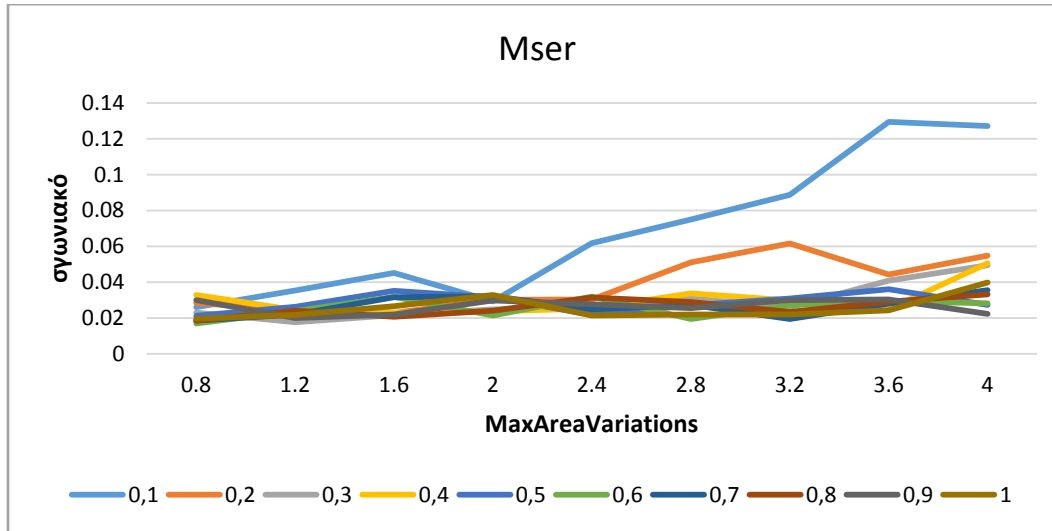
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
7317	1619	1210

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Surf για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.9. Επιπολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Surf στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.1.5 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Mser



7.10. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου MaxAreaVariation για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Mser.

Ο αλγόριθμος Mser εξετάστηκε βάσει των παραμέτρων του ThresholdDelta και MaxAreaVariations. Η παράμετρος ThresholdDelta ορίζει ουσιαστικά το βήμα, βάσει του οποίου επιλέγονται οι κατηγορίες όπου κατατάσσονται οι περιοχές ενδιαφέροντος. Με αύξηση, λοιπόν, της τιμής της παραμέτρου μειώνεται ο αριθμός των περιοχών που θα εξαχθούν, καθώς αυξάνεται και το εύρος μέσα στο οποίο πρέπει να βρίσκεται μια περιοχή ώστε να ανήκει σε μια συγκεκριμένη κατηγορία. Η παράμετρος MaxAreaVariation ορίζει την μέγιστη τιμή διακύμανσης έντασης μεταξύ των περιοχών ανά εύρος, δηλαδή ανά κατηγορία εντάσεων. Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου έχει ως αποτέλεσμα να επιστρέφονται περισσότερες περιοχές, οι οποίες όμως ενδέχεται να είναι λιγότερο σταθερές.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του διαγράμματος δεν είναι απολύτως σαφή, καθώς οι τιμές του συνολικού σφάλματος παρουσιάζουν μια επαναλαμβανόμενη αυξομείωση, χωρίς να δείχνουν κάποια προφανή τάση. Πάντως οι μικρότερες τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος παρατηρούνται για μικρές τιμές της παραμέτρου MaxAreaVariation, που όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως δικαιολογείται καθώς μικρές τιμές παραμέτρου επιστρέφουν λιγότερες αλλά πιο σταθερές περιοχές.

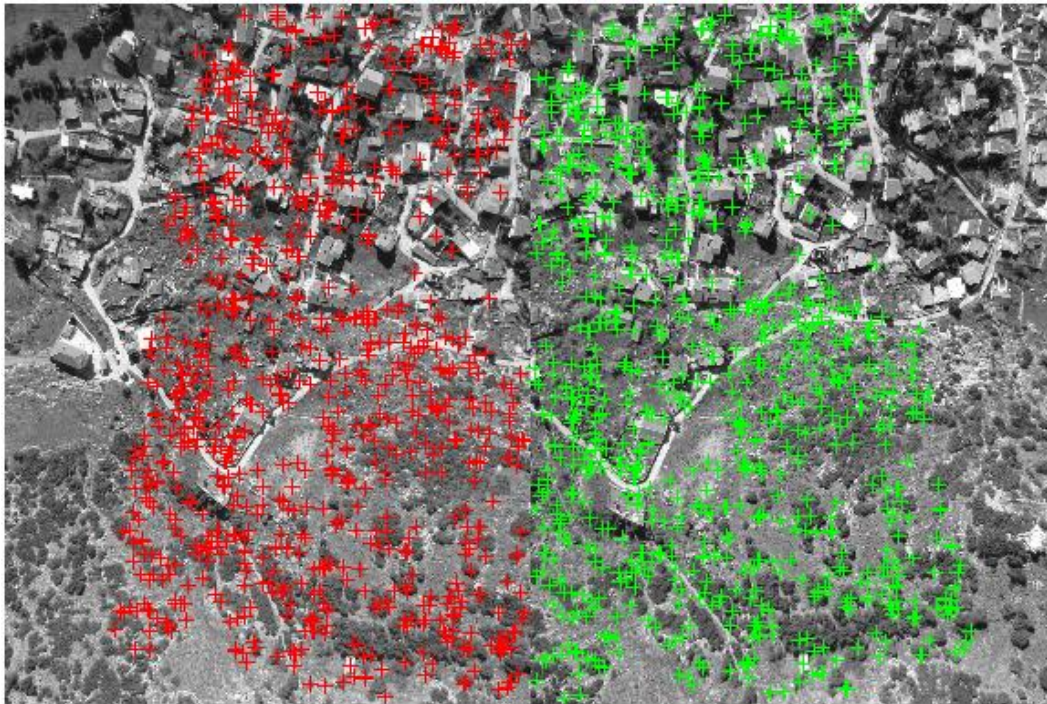
Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Mser στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απο-

μάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων $\text{MaxAreaVariation} = 0.6$ και $\text{ThresholdDelta} = 0.8$.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.425	-0.092	2.7391	-3.2283	-11.4079	0.271	0.0168

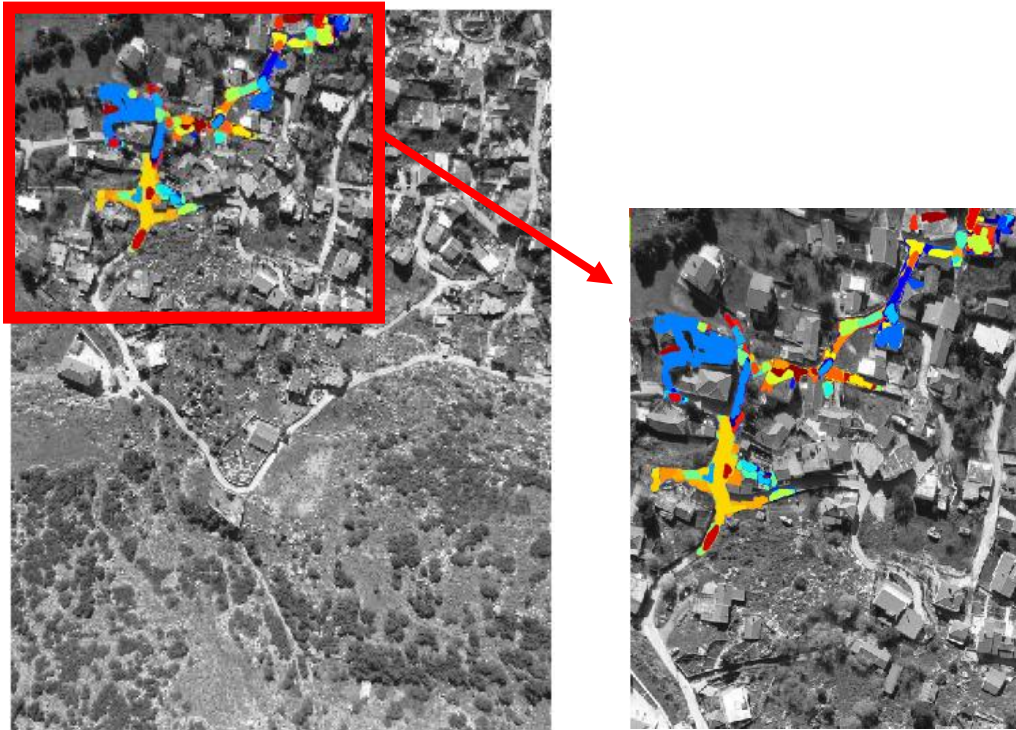
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
8688	1137	1029

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Mser για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



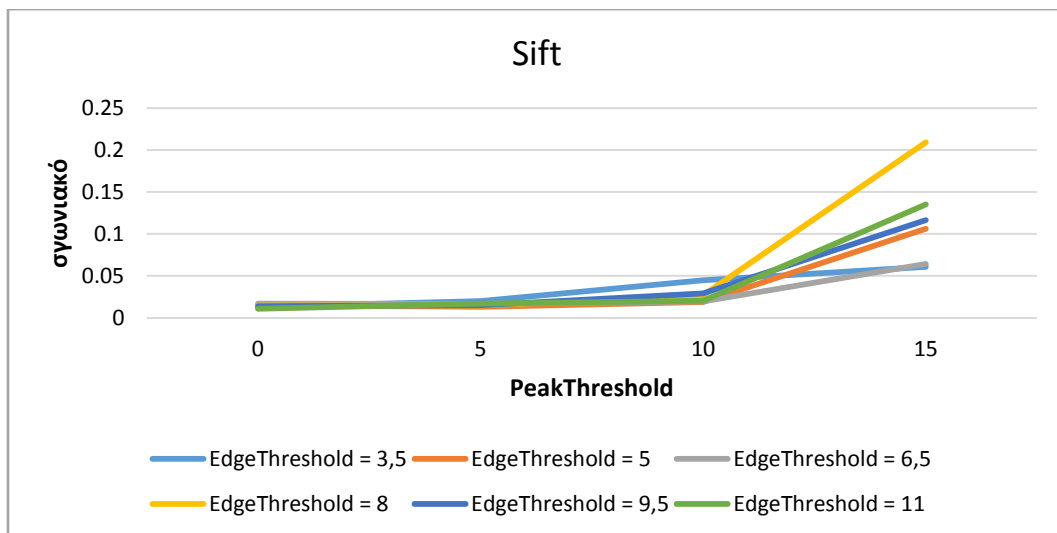
7.11. Επιπολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Mser στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Όπως είχε αναφερθεί στην αρχή (ενότητα 2.2.6) ο τελεστής Mser αναζητεί αφινικά αμετάβλητες περιοχές στην εικόνα, οι οποίες έχουν την ιδιότητα να διατηρούν κάποια χαρακτηριστικά σταθερά ή σχεδόν σταθερά σύμφωνα πάντα με τις τιμές των παραμέτρων που επιλέγονται. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα ανίχνευσης άμορφων περιοχών.



7.12. Αριστερή εικόνα του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται κάποιες “άμορφες” περιοχές (blobs) που έχουν εξαχθεί από τον τελεστή MSer.

7.1.6 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Sift



7.13. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^{\circ}$) συναρτήσει της παραμέτρου PeakThreshold για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Sift.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και εξετάστηκαν για τον αλγόριθμο Sift είναι η παράμετρος PeakThreshold και η παράμετρος (non) EdgeThreshold. Η πρώτη είναι υπεύθυνη για το φιλτράρισμα των κορυφών της πυραμίδας DoG με πολύ μικρές τιμές συγκριτικά με εκείνες των γειτονικών σημείων, ενώ η δεύτερη εξαλείφει κορυφές της πυραμίδας με πολύ μικρή καμπυλότητα, γεγονός που δυσχεραίνει τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των σημείων αυτών.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι τα μικρότερα γωνιακά σφάλματα εμφανίζονται για μικρές τιμές της παραμέτρου PeakThreshold (από 0 έως 10), το οποίο εξηγείται αν σκεφτεί κανείς ότι μείωση της τιμής αυτής συντελεί στην εξαγωγή περισσότερων χαρακτηριστικών που μπορεί να υστερούν σε σταθερότητα, καλύπτουν όμως μεγάλο τμήμα της εικόνας (πιθανόν ομοιόμορφα). Για το διάστημα αυτό οι τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές για τις διάφορες τιμές της παραμέτρου Edgethreshold που εξετάστηκαν. Μεγάλες διαφορές αντιθέτως εμφανίζονται στο διάστημα PeakThreshold (10, 15), όπου παρατηρείται αύξηση του γωνιακού σφάλματος για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου EdgeThreshold (8, 9.5, 11).

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Sift στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων PeakThreshold = 0 και EdgeThreshold = 11.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
-0.425	-0.091	2.7593	-3.1761	-11.4303	0.242	0.0107

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
5425	2198	1838

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Sift για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, καθώς και τα σημεία ενδιαφέροντος που ανιχνεύονται μέσω του HoG (*histogram of oriented gradients*).



7.14. Επιπολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.



7.15. Αριστερή εικόνα στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου φαίνεται το πρότυπο που δημιουργείται περί σημεία ενδιαφέροντος που εξάγεται από τον τελεστή Sift.

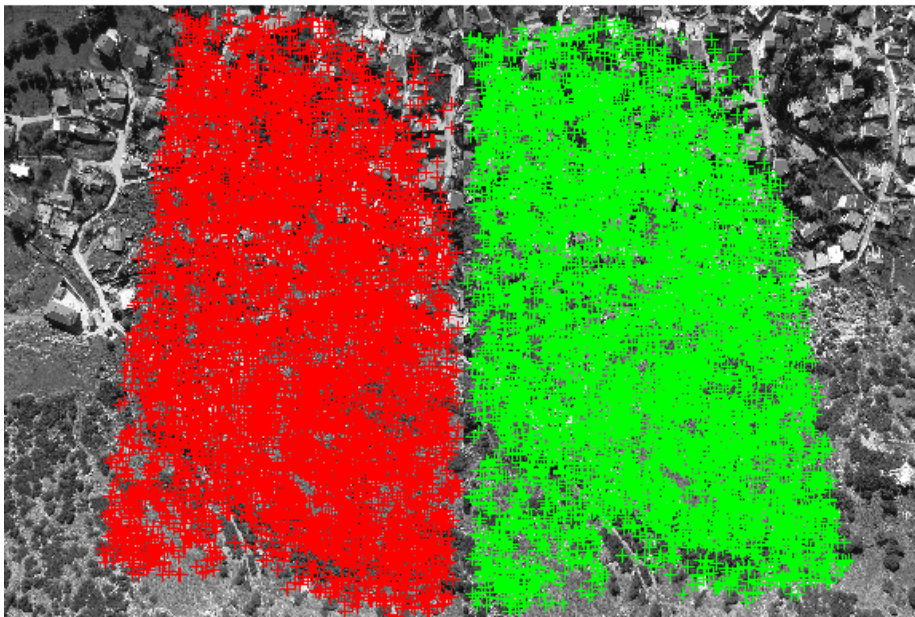
7.1.7 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\gamma\iota\alpha\kappa\omicron}(^{\circ})$
-0.429	-0.099	2.8276	-3.0789	-11.4232	0.33	0.0222

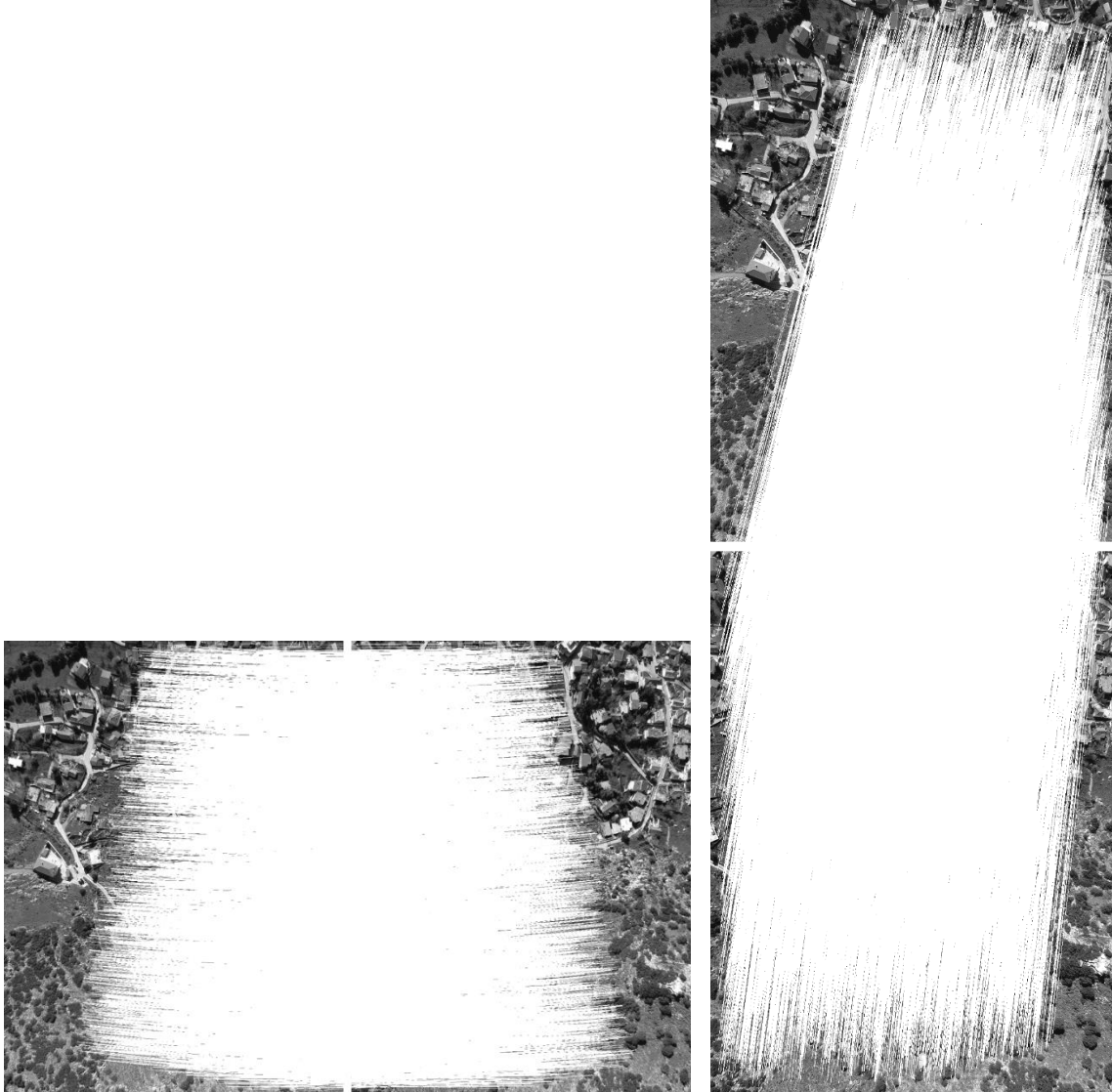
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από <i>RANSAC</i>
144682	12979	8895

Ο αλγόριθμος *Asift* εφαρμόστηκε σε εικόνες με ανάλυση στο 1/5 της αρχικής ανάλυσης των εικόνων. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε με τις προκαθορισμένες τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιεί. Συνεπώς δεν εξετάστηκε κάποιο εύρος τιμών ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία διαγράμματος του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει των διάφορων τιμών των παραμέτρων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του εν λόγω τελεστή παρουσιάζονται παρακάτω (ενότητα. 7.1.8). Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *Asift* παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



7.16. Επιπολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή *Asift* στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες των σημείων, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη.



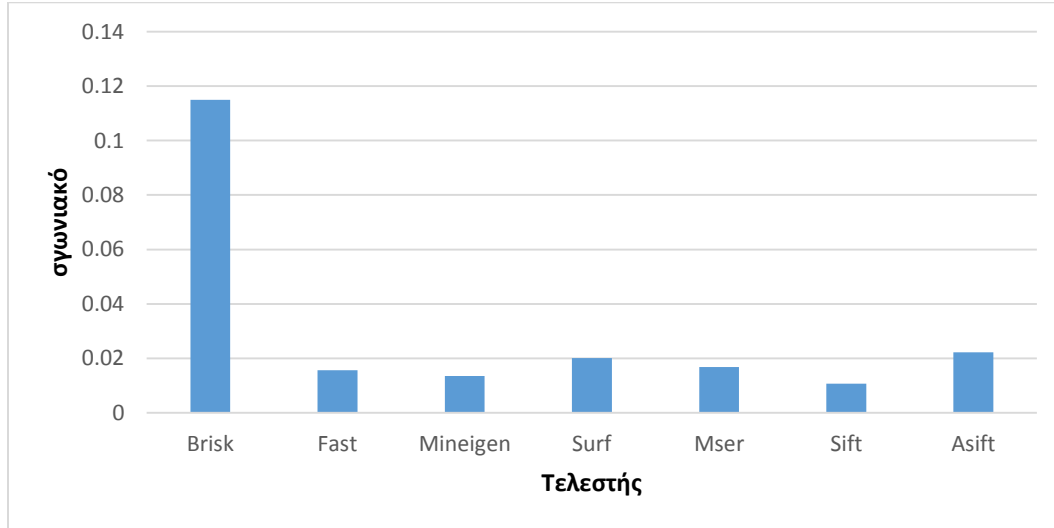
7.17. Επιπολικές εικόνες του στερεοζεύγους από τα Βίλια, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες των σημείων, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε οριζόντια (αριστερή εικόνα) όσο και σε κατακόρυφη (δεξιά εικόνα) διάταξη.

7.1.8 Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού

Παρουσιάζονται εδώ συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε τελεστή, καθώς

και το αντίστοιχο διάγραμμα με την καλύτερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος για κάθε τελεστή (Εικόνα 7.18).

Τελεστής	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
Brisk	-0.426	-0.088	2.7490	-3.2513	-11.3698	0.1149
Fast	-0.427	-0.092	2.7699	-3.1942	-11.4179	0.0157
Mineigen	-0.425	-0.092	2.7362	-3.2350	-11.4150	0.0135
Surf	-0.425	-0.091	2.7405	-3.2028	-11.4230	0.0201
Mser	-0.425	-0.092	2.7391	-3.2283	-11.4079	0.0168
Sift	-0.425	-0.091	2.7593	-3.1761	-11.4303	0.0107
Asift	-0.429	-0.099	2.8276	-3.0789	-11.4232	0.0222



7.18. Διάγραμμα της καλύτερης τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^{\circ}$) για κάθε τελεστή.

Για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων για κάθε τελεστή παρουσιάζεται παρακάτω και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν ύστερα και από την εφαρμογή του αλγορίθμου *RANSAC*.

Τελεστής	Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
Brisk	8257	188	146
Fast	31329	1403	1061
Mineigen	20624	1368	1083
Surf	7317	1619	1210
Mser	8688	1137	1029
Sift	5425	2198	1838
Asift	144682	12979	8895

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι η μικρότερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος εμφανίζεται για τον τελεστή Sift, ενώ η μεγαλύτερη (με σημαντική διαφορά από όλους τους άλλους) για τον τελεστή Brisk. Ο Asift δεν παρουσιάζει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, γεγονός που πιθανόν οφείλεται και στο συγκεκριμένο ζεύγος αεροφωτογραφιών. Η δοκιμή πάντως πολλών δυνατών αφινικών παραμορφώσεων τού προσφέρει την δυνατότητα να εξάγει πολλά σημεία, αρκετά όμως από τα οποία απορρίπτονται ως γεωμετρικά ασύμβατα. Παρ' ό,τι λοιπόν εξάγει πολύ περισσότερα σημεία από τον Sift, το τελικό σφάλμα που δίνει είναι μεγαλύτερο. Επιπλέον ο Sift εμφανίζεται πιο εύστοχος στην εύρεση σημείων ενδιαφέροντος, καθώς το ποσοστό των ομολογιών του βρίσκεται στο 50% έναντι 10% των άλλων. Από τους τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν μόνο στους Sift, Mineigen και Brisk ήταν εμφανής η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν, ενώ οι υπόλοιποι τελεστές απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Οι αλγόριθμοι Mineigen, Brisk, Fast έδωσαν γενικά πολύ λίγες ομολογίες σημείων, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστούν αδύνατο τον προσδιορισμό του σχετικού προσανατολισμού.

7.2 Δεύτερο ζεύγος εικόνων



7.19. Στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών της Πολυτεχνειούπολης από πεντακάμερο (8176x6132).

Οι εικόνες έχουν ληφθεί με διαφορετικό σύστημα αναφοράς. Συνεπώς για την χρήση του εν λόγω στερεοζεύγους έγινε αρχικά στροφή τους κατά 90° , ενώ πραγματοποιήθηκε και μεταφορά των αξόνων ώστε να ισχύει:

$$X = Y$$

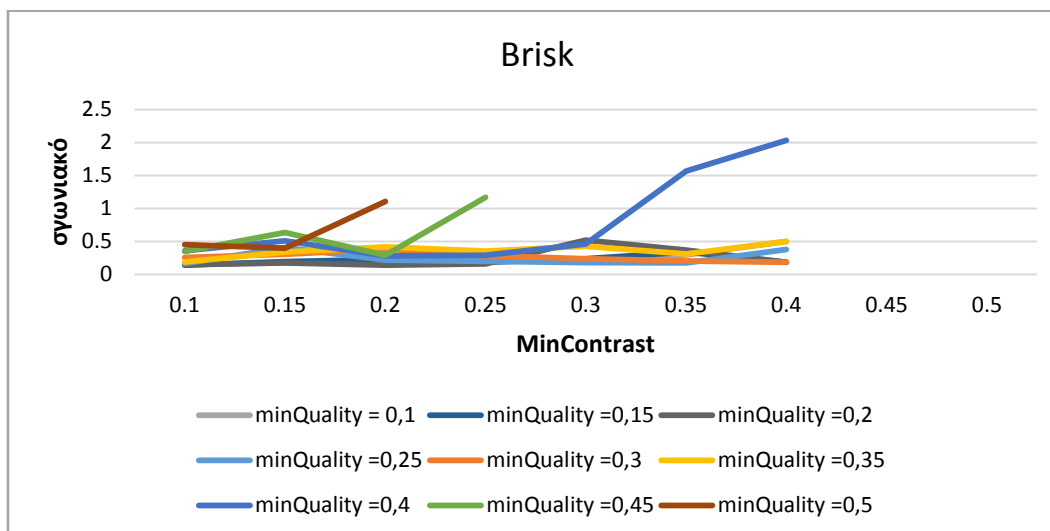
$$Y = -X$$

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν τελικά είναι οι παρακάτω, στις οποίες είναι εμφανείς και οι έντονες διαφορές κλίμακας:



7.20. Στερεοζεύγος εικόνων που προέκυψε ύστερα από στροφή των αρχικών εικόνων κατά 90° (6132x8176).

7.2.1 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Brisk



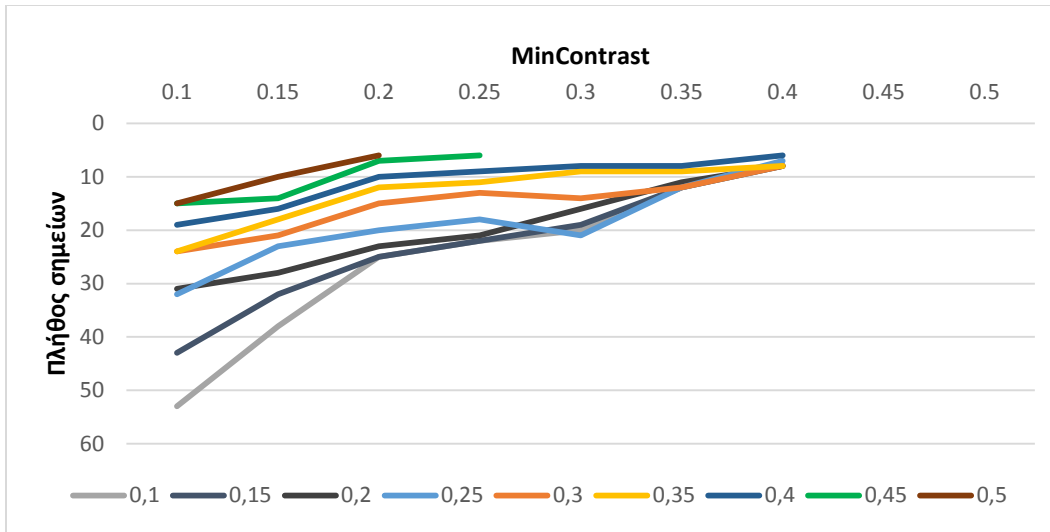
7.21. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast* για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Brisk.

Για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε για τις παραμέτρους που εξετάστηκαν είναι από 0.1 έως 0.5 με βήμα 0.05, σε αντίθεση με το ζεύγος των Βιλίων στο οποίο χρησιμοποιήθηκε βήμα 0.1.

Για τιμές *MinContrast* από 0.4 έως 0.5 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει υπολογισμένη τιμή για το συνολικό γωνιακό σφάλμα, αφού ο αριθμός των σημείων ενδιαφέροντος που εξήχθησαν δεν επαρκεί για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και για μικρότερες τιμές της παραμέτρου *MinContrast* (ήδη από 0.2) για τιμές 0.4, 0.45 και 0.5 της παραμέτρου *minQuality*.

Όπως και στο προηγούμενο ζεύγος εικόνων που εξετάστηκε, παρατηρείται και εδώ ότι η μείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος είναι ανάλογη των τιμών των παραμέτρων, γεγονός που οφείλεται στην περίσσεια των σημείων που εξάγονται για τις τιμές αυτές και όχι τόσο στην ορθότητα των σημείων αυτών.

Για λόγους πληρότητας δημιουργήθηκαν διαγράμματα στα οποία φαίνεται το πλήθος των ομολογιών μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast*, για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε.



7.22. Διαγράμματα στο οποίο φαίνεται το πλήθος των ομολογιών μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.

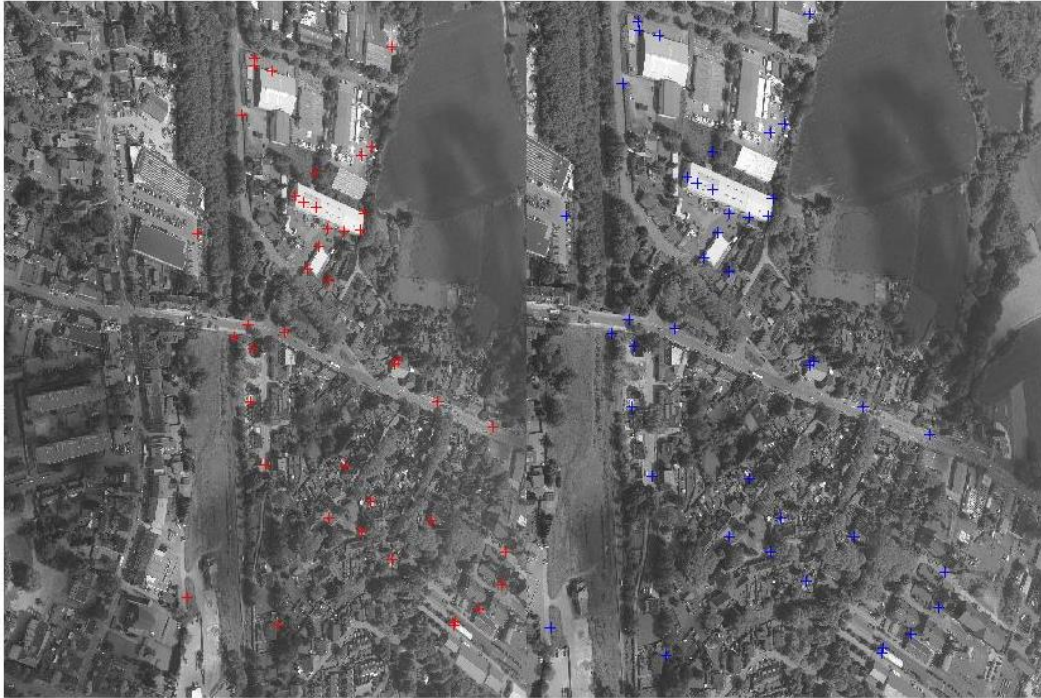
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η αύξηση των τιμών των παραμέτρων που εξετάστηκαν συνεπάγεται μείωση του πλήθους των ομολογιών. Συνεπώς σε σχέση πάντα και με το προηγούμενο διάγραμμα συμπεραίνεται ότι για μικρές τιμές παραμέτρων προκύπτει μεγάλος πλήθος ομολογιών σε συνδυασμό με μικρά συνολικά γωνιακά σφάλματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Brisk στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι καλύτερες τιμές των αποτελεσμάτων εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων MinContrast = 0.1 και MinQuality = 0.15.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\gamma\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
-0.008	-1.026	0.0377	0.0416	0.2700	0.26	0.1394

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
9130	52	43

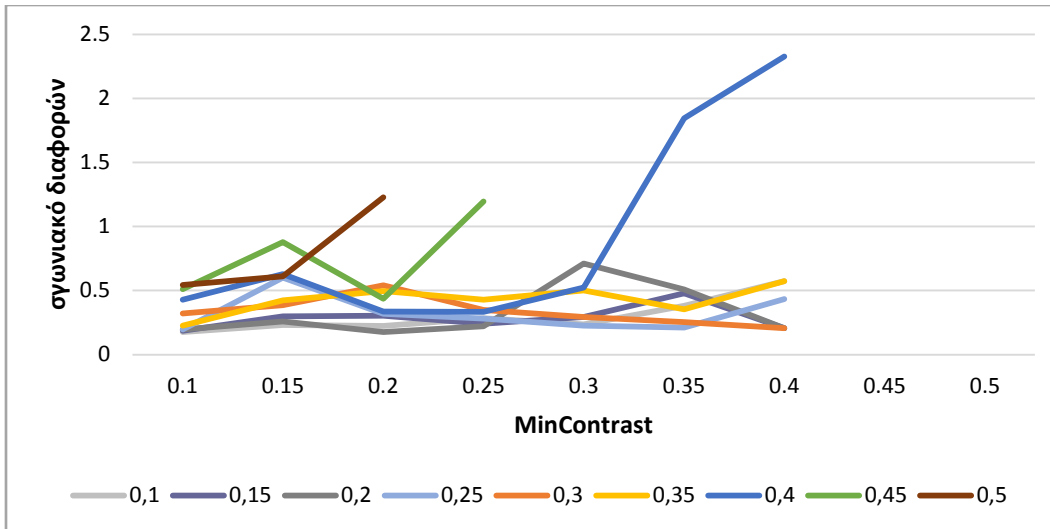
Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Brisk για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.23. Επιτολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή *Brisk* στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (μπλε χρώμα) εικόνα.

Για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων υπολογίστηκε ένα ολικό γωνιακό σφάλμα των διαφορών του σχετικού προσανατολισμού, που προκύπτει για κάθε τιμή των παραμέτρων που εξετάστηκαν, από τον σχετικό προσανατολισμό που ήταν γνωστός. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε παράμετρο του σχετικού προσανατολισμού, αλλά και για τα σφάλματα αυτών, υπολογίστηκαν αρχικά οι διαφορές από τις αληθείς τιμές. Στη συνέχεια έγινε μετατροπή των γραμμικών σφαλμάτων dx , dy σε γωνιακά, ενώ υπολογίστηκαν και τα σφάλματα των μεγεθών αυτών μέσω του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων. Τέλος έγινε ο υπολογισμός του μέσου συνολικού γωνιακού σφάλματος. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, όπου περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

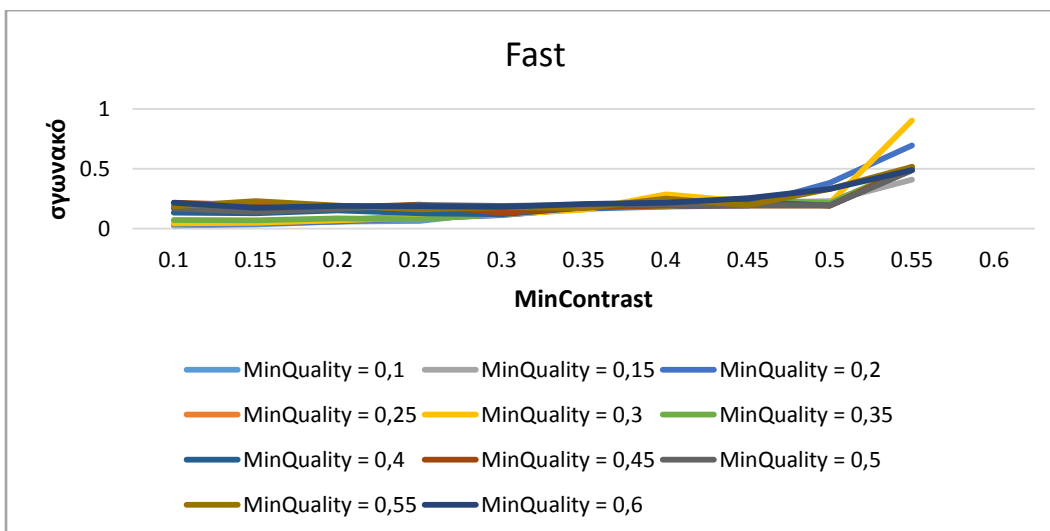
Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast* για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε.



7.24. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών (°) συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.

Από το παραπάνω διάγραμμα, και σε σύγκριση με το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος του σχετικού προσανατολισμού που παρουσιάστηκε προηγουμένως, προκύπτει ότι τα δύο αυτά διαγράμματα έχουν όχι μόνο την ίδια μορφή αλλά και παρόμοιες τιμές σφαλμάτων.

7.2.2 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast



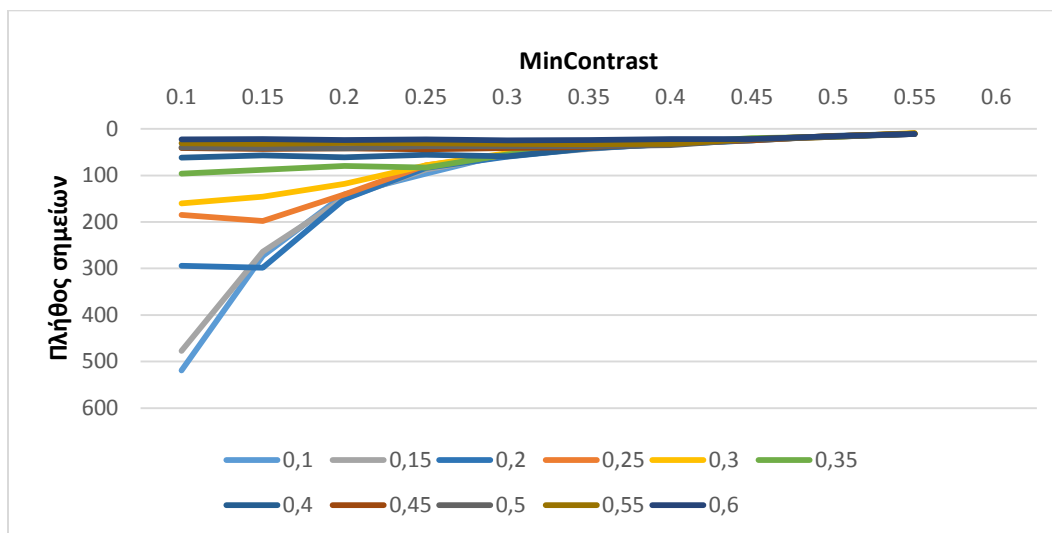
7.25. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Fast.

Η μορφή του διαγράμματος και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται να ακολουθεί την μορφή του διαγράμματος που προέκυψε για το προηγούμενο ζεύγος εικόνων. Και για τον τελεστή Fast χρησιμοποιήθηκε βήμα 0.05 για τις τιμές των παραμέτρων.

Για τιμές της παραμέτρου MinContrast μεγαλύτερες από 0.55 ο αριθμός των σημείων δεν επαρκεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού και κατ' επέκταση τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος.

Τέλος, και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι η μείωση των τιμών των παραμέτρων που εξετάστηκαν οδηγεί και σε μείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος, λόγω της πληθώρας των σημείων που εξάγονται και της καλής πιθανόν κατανομής τους στην εικόνα.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC, συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.



7.26. Διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.

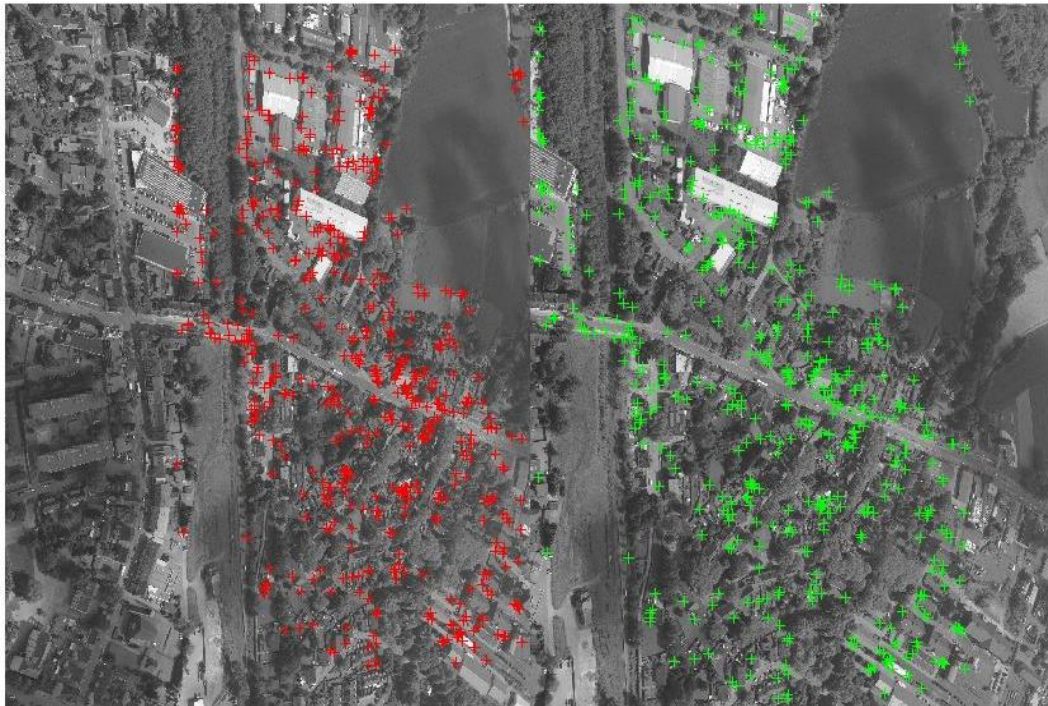
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου MinQuality που χρησιμοποιείται τόσο περισσότερα είναι και τα σημεία που εξάγονται. Το ίδιο παρατηρείται και για την παράμετρο MinContrast, κυρίως όμως για τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου MinQuality. Ειδικότερα, για τιμές minQuality από 0.45 και πάνω παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου minContrast δεν επιφέρει και τόσο μεγάλες αλλαγές στο πλήθος των σημείων που προκύπτουν.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Fast στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων $\text{MinQuality} = 0.1$ και $\text{MinContrast} = 0.1$.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.005	-1.034	0.0212	-0.0120	0.2646	0.20	0.0269

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
29493	689	519

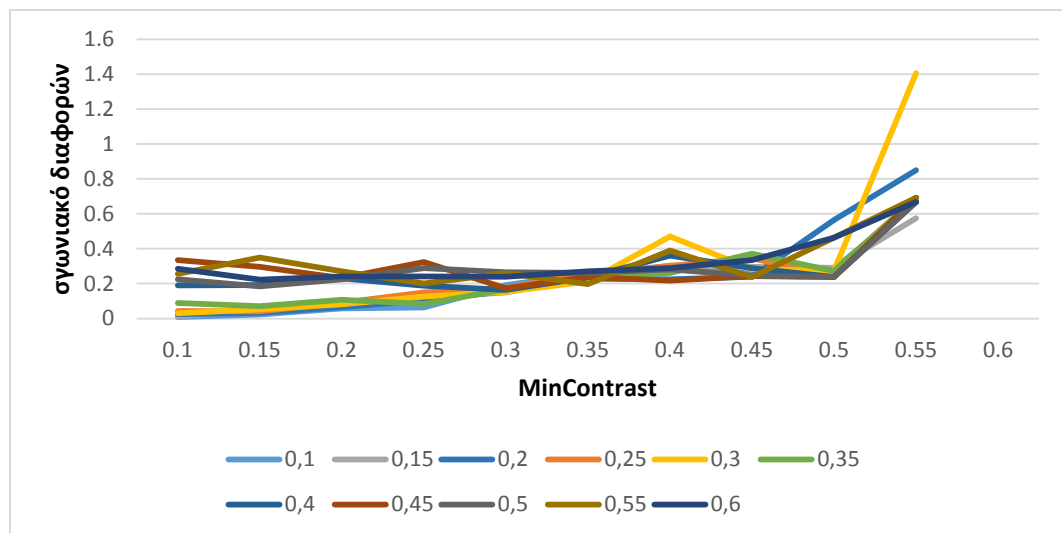
Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Fast για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.27. Επιπολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Fast στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των

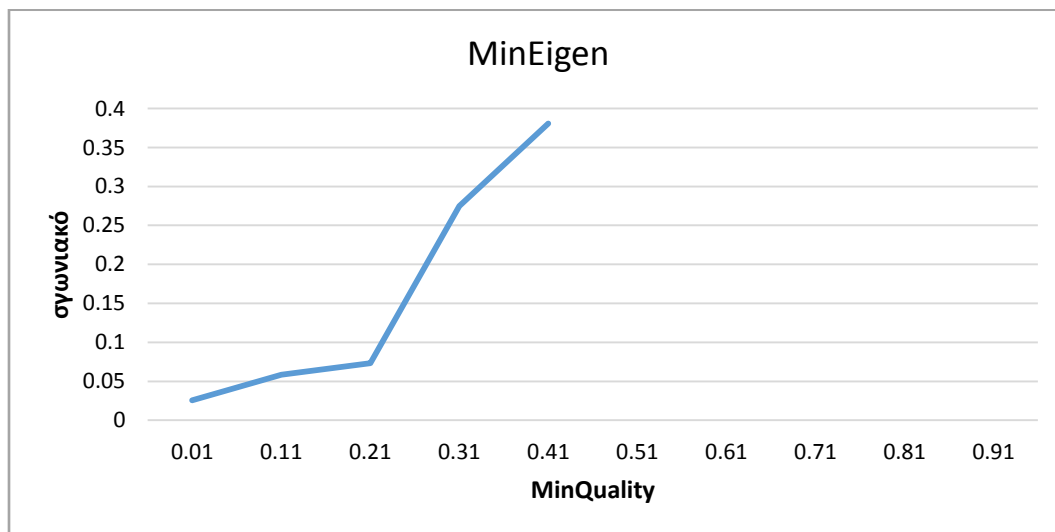
διαφορών συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε εξετασθείσα τιμή της παραμέτρου MinQuality.



7.28. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^{\circ}$) των διαφορών συναρτήσει της παραμέτρου MinContrast για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.

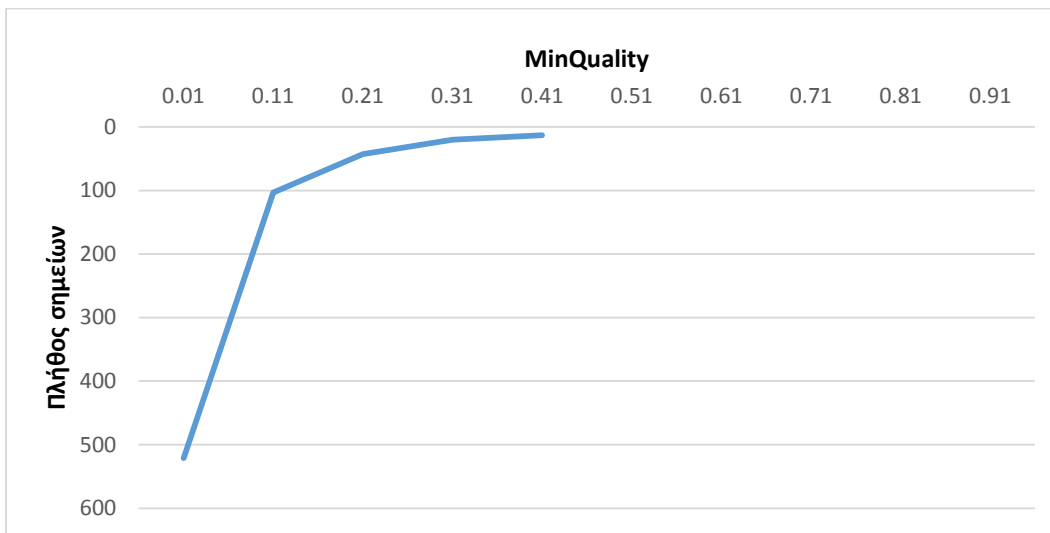
Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια με εκείνη του διαγράμματος που προέκυψε για το συνολικό γωνιακό σφάλμα των παραμέτρων. Είναι εμφανές ότι τα μικρότερα ολικά γωνιακά σφάλματα εμφανίζονται για τις μικρότερες τιμές των παραμέτρων MinContrast και MinQuality.

7.2.3 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen



7. 29. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^{\circ}$) συναρτήσει της παραμέτρου MinQuality. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή MinEigen.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου συντελεί και στην αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Για τιμές μεγαλύτερες της τιμής 0.41 ο αριθμός των σημείων που εξάγονται δεν επαρκεί για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας και συνεπώς για τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Αύξηση της τιμής της παραμέτρου οδηγεί, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην απομάκρυνση λανθασμένων corner points, γεγονός όμως που συντελεί, όπως είναι λογικό, και στη μείωση του αριθμού των σημείων. Φαίνεται, λοιπόν, ότι ο αριθμός και η κατανομή των σημείων που χρησιμοποιούνται στην συνθήκη συνεπιπεδότητας είναι αυτά που καθορίζουν και το συνολικό γωνιακό σφάλμα που εξάγεται. Γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το σχετικό διάγραμμα που υπάρχει στην συνέχεια, όπου παρατηρείται σε συνδυασμό με το παραπάνω διάγραμμα ότι το μικρότερο συνολικό γωνιακό σφάλμα εμφανίζεται για τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου MinQuality, για τις οποίες προκύπτει και το μεγαλύτερο πλήθος σημείων.



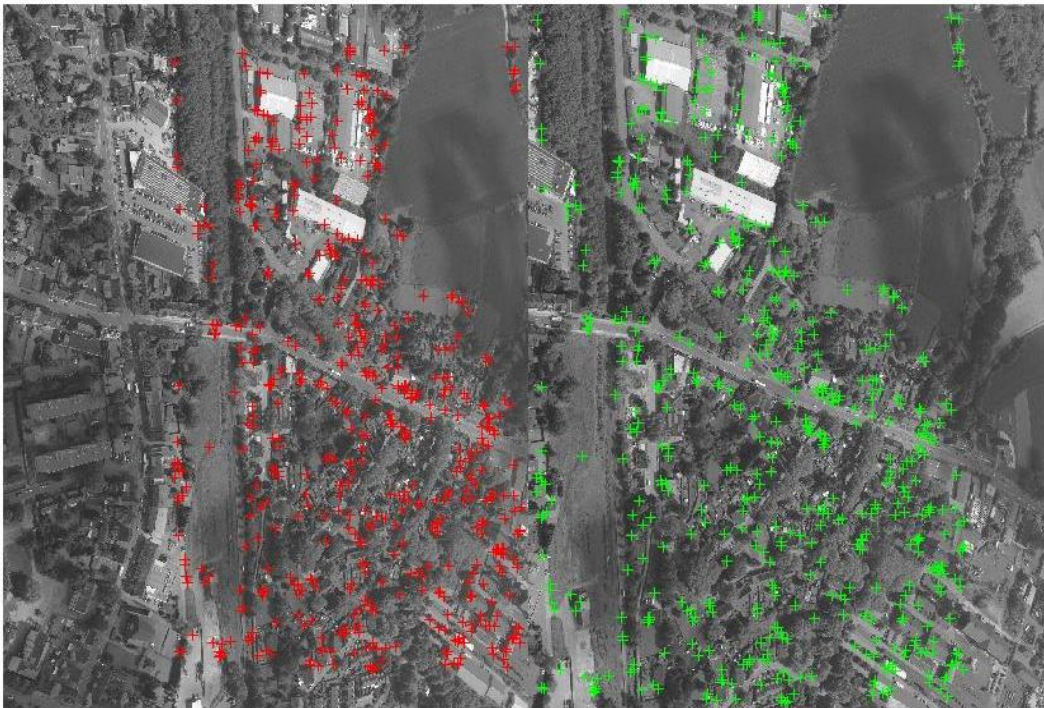
7.30. Διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή MinEigen στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του Ransac για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις παρουσιάζονται για τιμή MinQuality = 0.01.

MinQuality	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
0.01	-0.002	-1.035	0.0059	-0.027	0.2741	0.17	0.0256

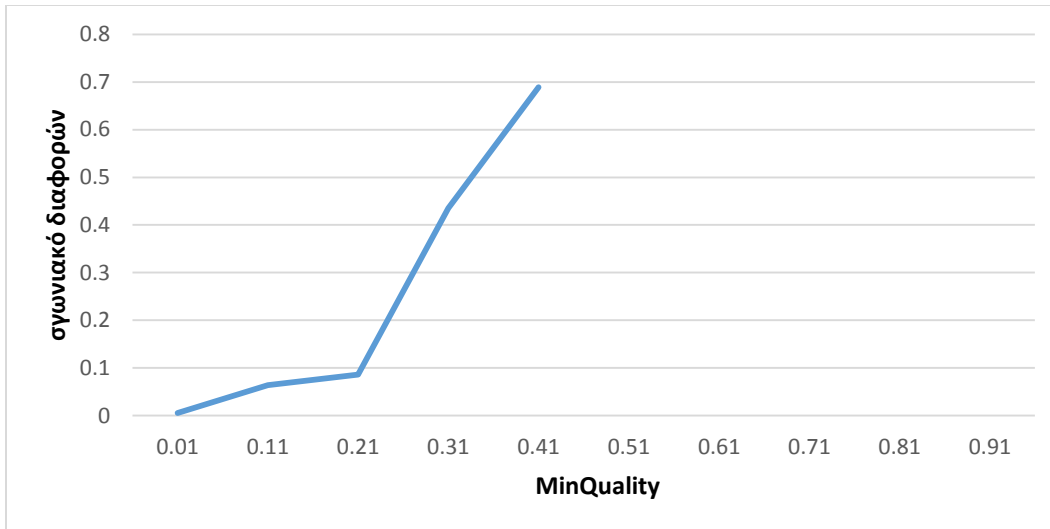
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
38410	605	521

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.31. Επιτολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Mineigen στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

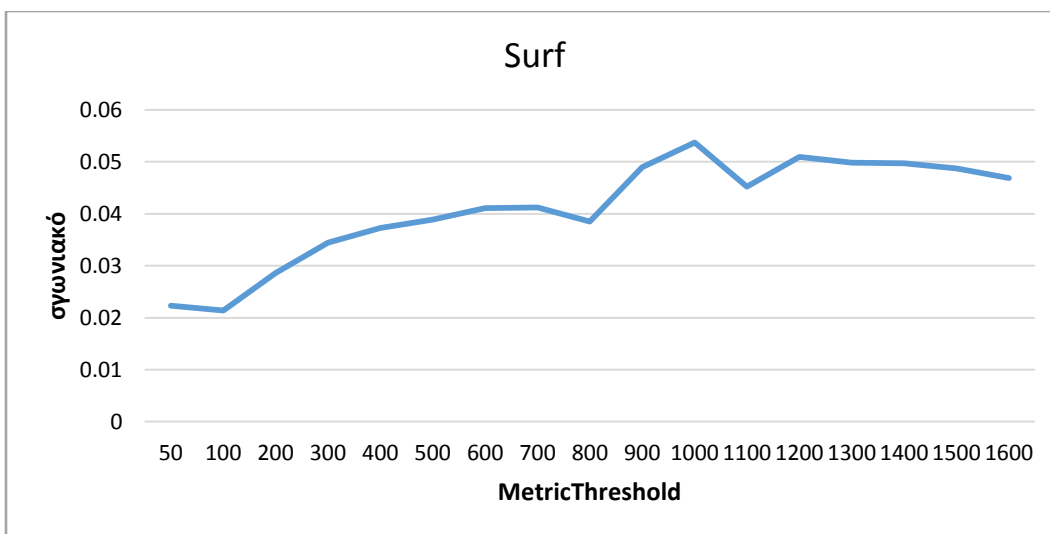
Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών συναρτήσε της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.



7.32. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών (°) συναρτήσει της παραμέτρου MinQuality που εξετάστηκε.

Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι η μορφή του διαγράμματος είναι ίδια με εκείνη του διαγράμματος του συνολικού γωνιακού σφάλματος των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

7.2.4 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf



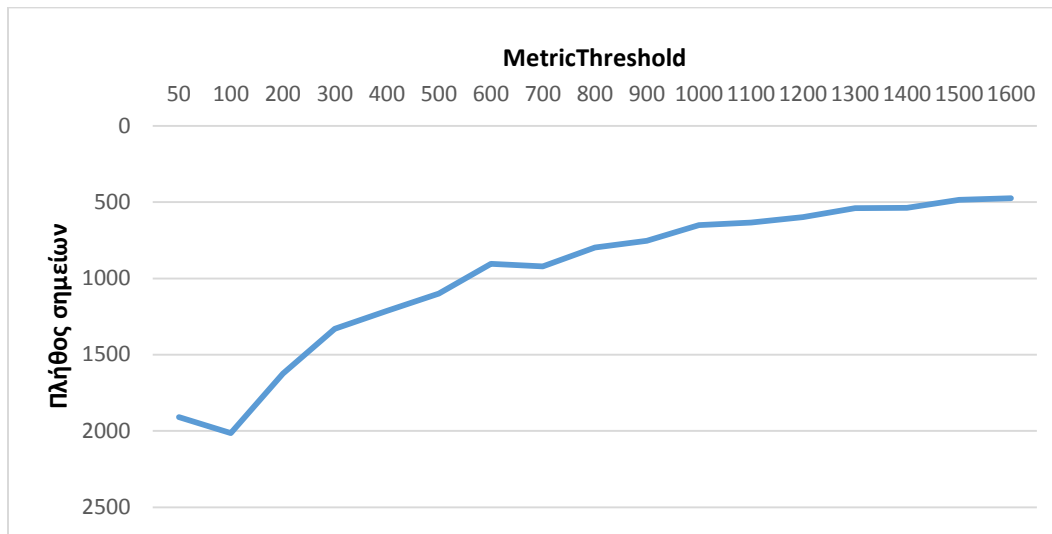
7.33. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου MetricThreshold. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Surf.

Και στην περίπτωση αυτή η μορφή του διαγράμματος φαίνεται να ακολουθεί τη μορφή του διαγράμματος που εξήχθη για το προηγούμενο ζεύγος εικόνων.

Το εύρος τιμών που εξετάστηκε για την παράμετρο `MetricThreshold` είναι από 100 έως 1600 με βήμα 100. Για λόγους πληρότητας και ελέγχου περαιτέρω μείωσης της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος εξετάστηκε και η τιμή 50.

Η μικρότερη τιμή εντοπίζεται, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για τιμή `MetricThreshold` ίση με 100. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος, η οποία προκύπτει από την αύξηση της τιμής της παραμέτρου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου `RANSAC` συναρτήσει της παραμέτρου `MetricThreshold` που εξετάστηκε.



7.34. Διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου `RANSAC` συναρτήσει της παραμέτρου `MetricThreshold` που εξετάστηκε.

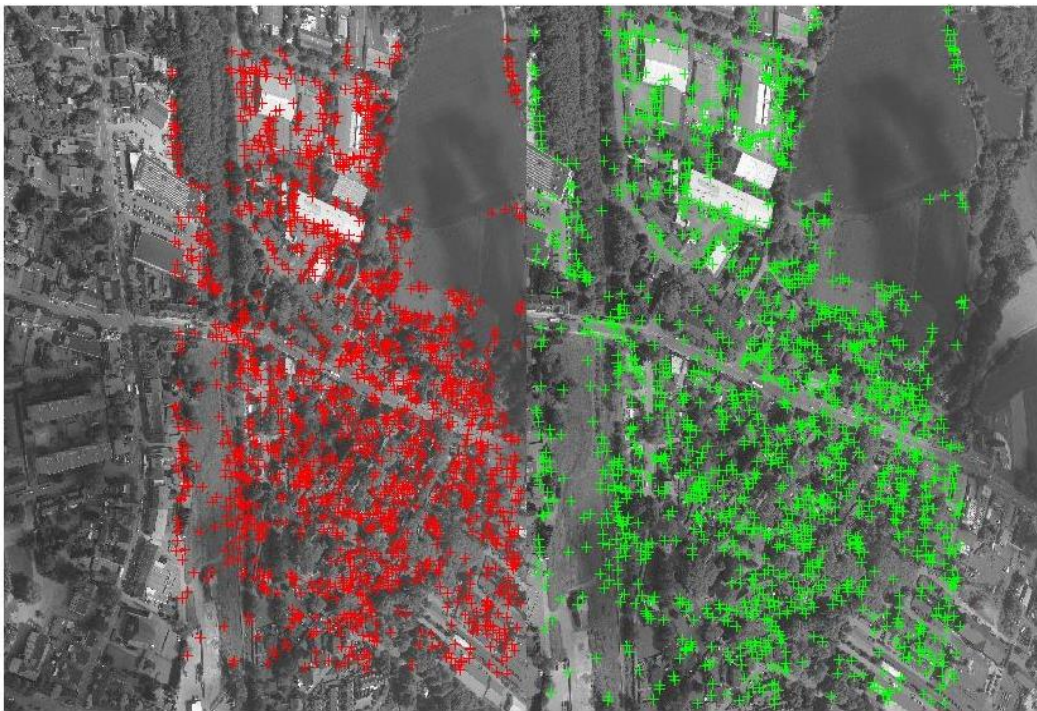
Η μορφή του παραπάνω διαγράμματος είναι παρόμοια με εκείνη του διαγράμματος του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει της παραμέτρου `MetricThreshold`. Συνεπώς και στην περίπτωση αυτή επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι μικρότερες τιμές παραμέτρου οδηγούν στην εξαγωγή περισσότερων σημείων ενδιαφέροντος, αλλά και ότι ο αριθμός των σημείων σχετίζεται άμεσα με την τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή `Surf` στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του `RANSAC` για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμή παραμέτρου `MetricThreshold` = 100.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\iota\alpha\kappa\omicron} (^{\circ})$
-0.004	-1.031	0.0183	-0.0003	0.2571	0.34	0.0214

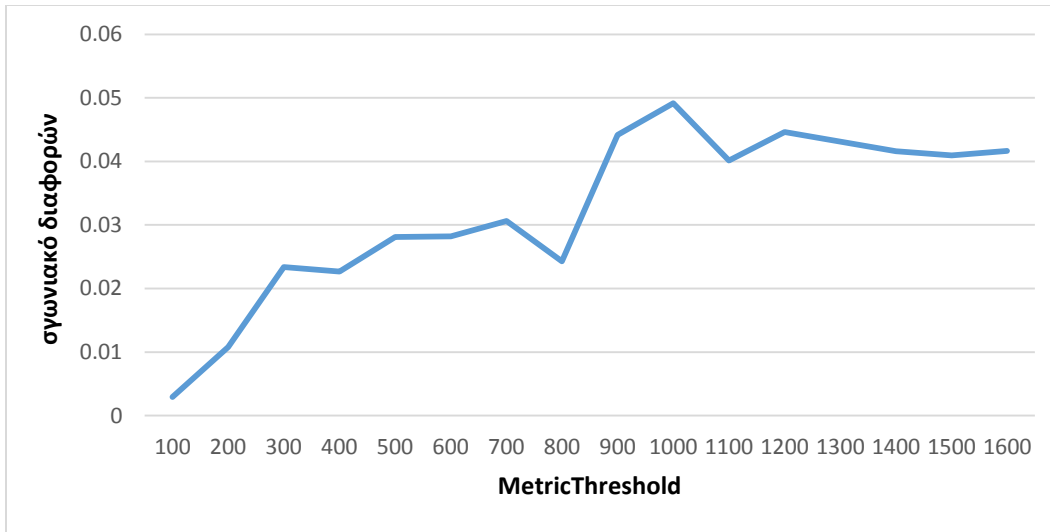
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
23236	2999	2013

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Surf για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.35. Επιπολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Surf στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

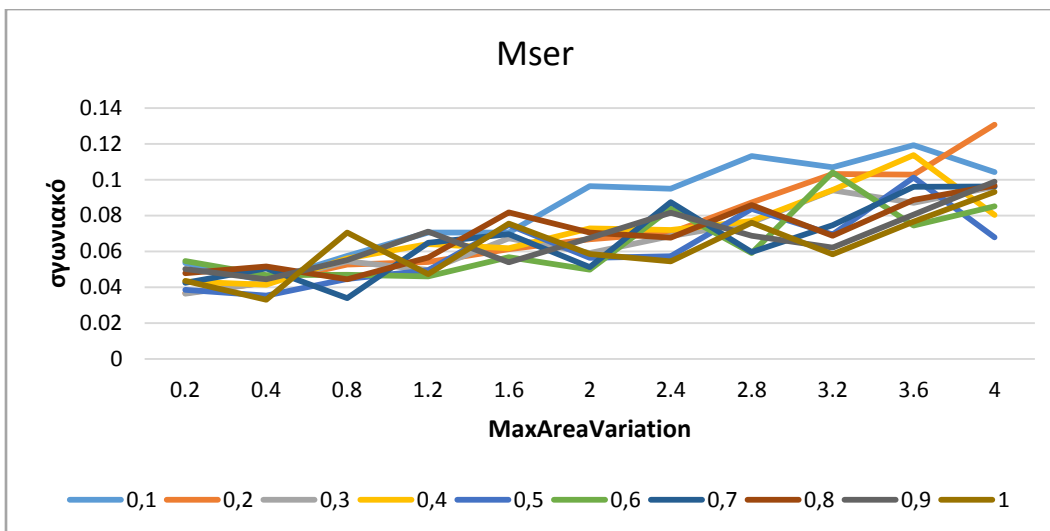
Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών συναρτήσεως της παραμέτρου MetricThreshold που εξετάστηκε.



7.36. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών (°) συναρτήσει της παραμέτρου MetricThreshold που εξετάστηκε.

Όπως ήταν αναμενόμενο, και εδώ παρατηρείται παρόμοια μορφή με εκείνη του διαγράμματος του συνολικού γωνιακού σφάλματος των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού.

7.2.5 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser

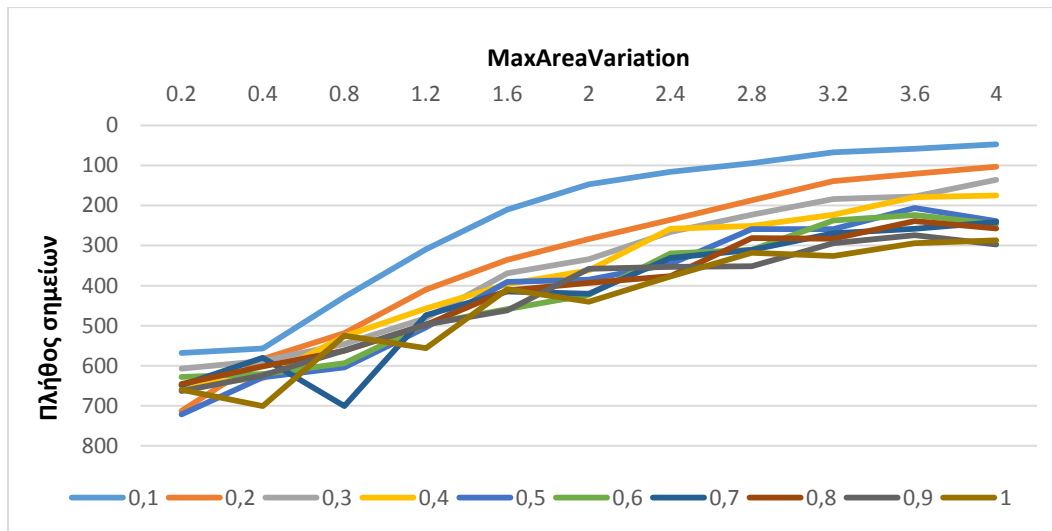


7.37. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου MaxAreaVariation για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Mser.

Στην περίπτωση του Mser παρατηρείται μια αυξομείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος, η οποία όμως οδηγεί σταδιακά σε αύξηση της τιμής.

Συνεπώς οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται για μικρές τιμές της παραμέτρου MaxAreaVariation. Από την άλλη μεριά τα συμπεράσματα για την επίδραση της παραμέτρου ThresholdDelta στην τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος δεν είναι σαφή.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου MaxAreaVariation, για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε.



7.38. Διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου MaxAreaVariation, για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε.

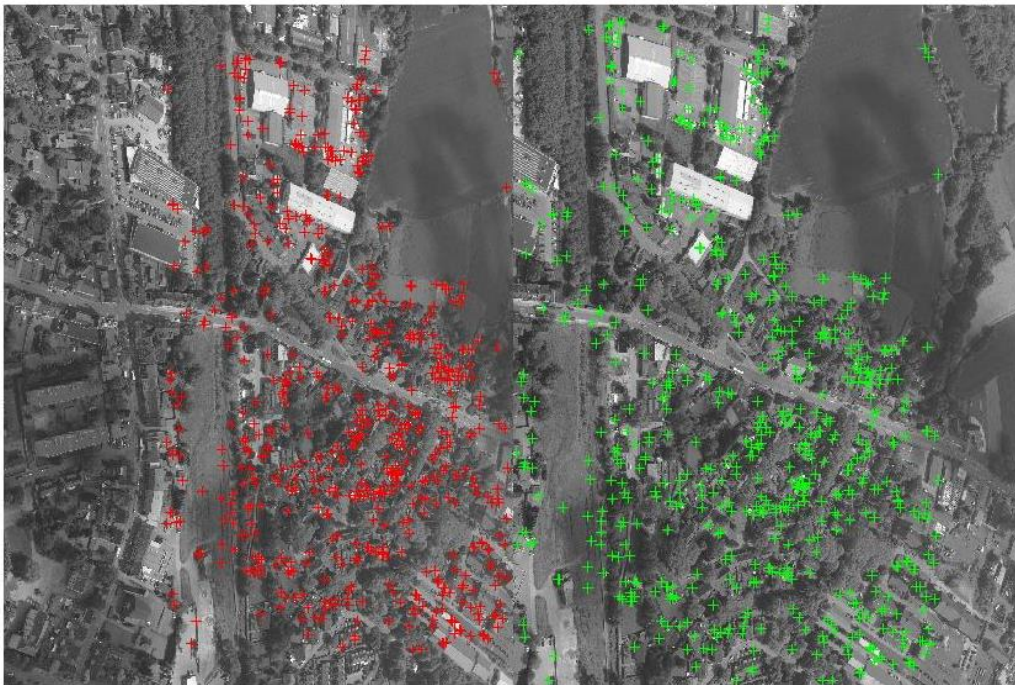
Οι βιβλιογραφικές πηγές (Matlab documentation) που έχουν εντοπιστεί για τον τελεστή Mser αναφέρουν ότι μείωση της τιμής της παραμέτρου ThresholdDelta αναμένεται να επιφέρει αύξηση του αριθμού των εξαγόμενων περιοχών, σε αντίθεση με την παράμετρο MaxAreaVariation. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, όπως εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κανείς.

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Mser στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων MaxAreaVariation = 0.7 και ThresholdDelta = 0.8.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\kappa} (^{\circ})$
-0.006	-1.037	0.0255	-0.0487	0.2496	0.30	0.0339

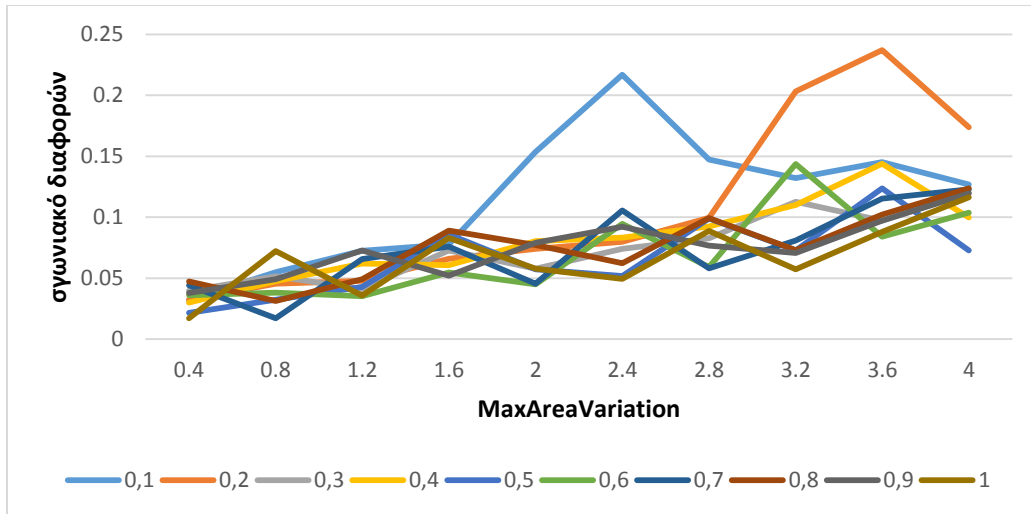
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
9933	923	701

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Mser για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.39. Επιπολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Mser στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

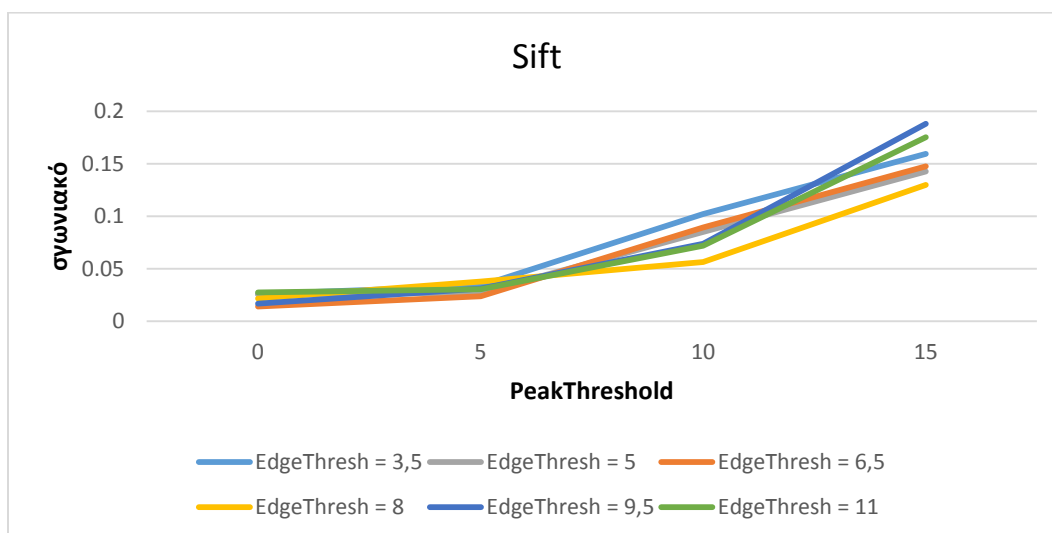
Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών συναρτήσεως της παραμέτρου MaxAreaVariation για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε.



7.40. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών (°) συναρτήσει της παραμέτρου MaxAreaVariation, για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε.

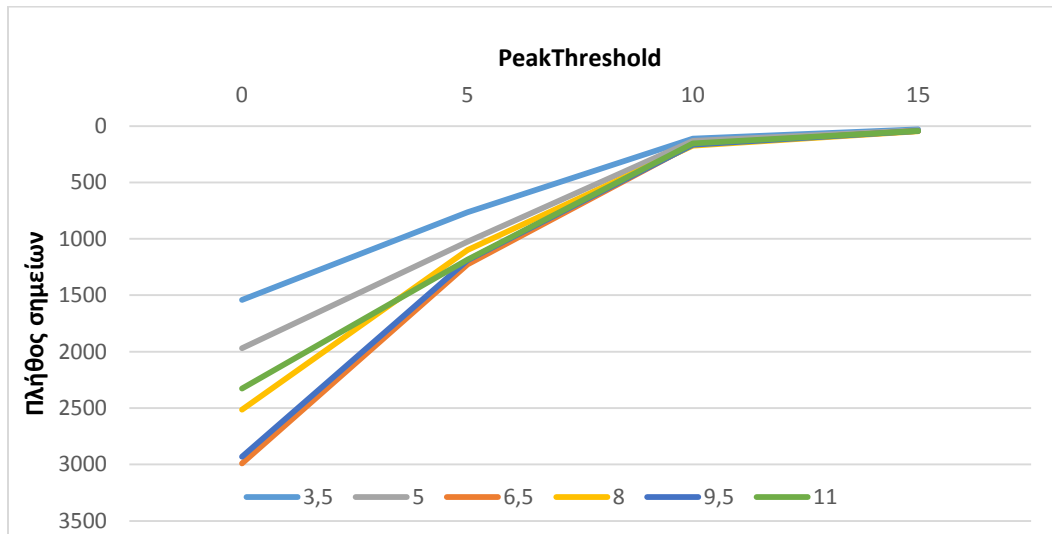
Όπως έχει προαναφερθεί, ο τελεστής Mser απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση καθώς η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων που χρησιμοποιεί δεν μπορεί να αναλυθεί και να εξηγηθεί επαρκώς. Με βάση το παραπάνω διάγραμμα μπορεί κανείς να πει ότι και εδώ η αύξηση της τιμής της παραμέτρου MaxAreaVariation συντελεί στην αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού, γεγονός που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του συνολικού γωνιακού σφάλματος των παραμέτρων του σχετικού. Από την άλλη πλευρά, η επίδραση της παραμέτρου ThresholdDelta δεν είναι σαφής.

7.2.6 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift



7.41. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει (°) της παραμέτρου PeakThreshold για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Sift.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου PeakThreshold συνεπάγεται και αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Συνεπώς οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται για τιμή PeakThreshold ίση με 0. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι μικρότερες τιμές σφάλματος εντοπίζονται για τις μεσαίες τιμές της παραμέτρου EdgeThreshold (6.5, 8, 9.5). Παρόμοια είναι και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το επόμενο διάγραμμα, όπου παρουσιάζεται το πλήθος των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου PeakThreshold, για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε. Παρατηρείται ότι αύξηση της τιμής της παραμέτρου PeakThreshold επιφέρει μείωση του αριθμού των σημείων ενδιαφέροντος που εξάγονται, ενώ αύξηση της τιμής της παραμέτρου EdgeThreshold συντελεί σε αύξηση του αριθμού αυτού.



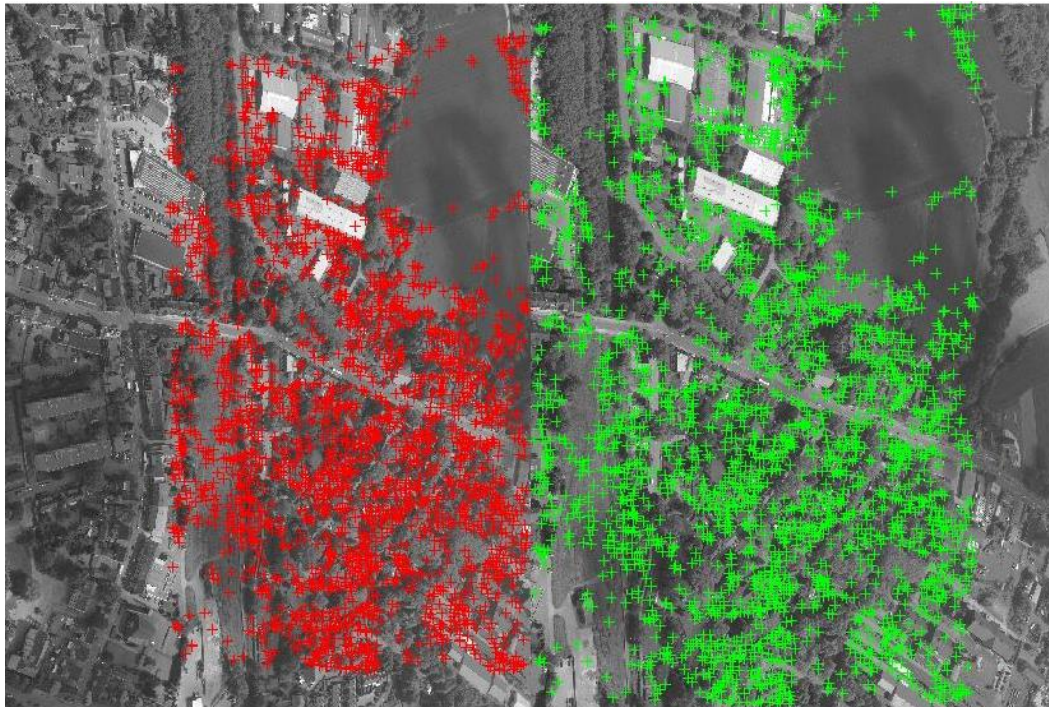
7.42 Διάγραμμα του πλήθους των ομολογιών που προκύπτει μετά και την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC συναρτήσει της παραμέτρου PeakThreshold, για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Sift στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από τη συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων PeakThreshold = 0 και EdgeThreshold = 6.5.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.005	-1.027	0.0250	0.0247	0.2700	0.26	0.0139

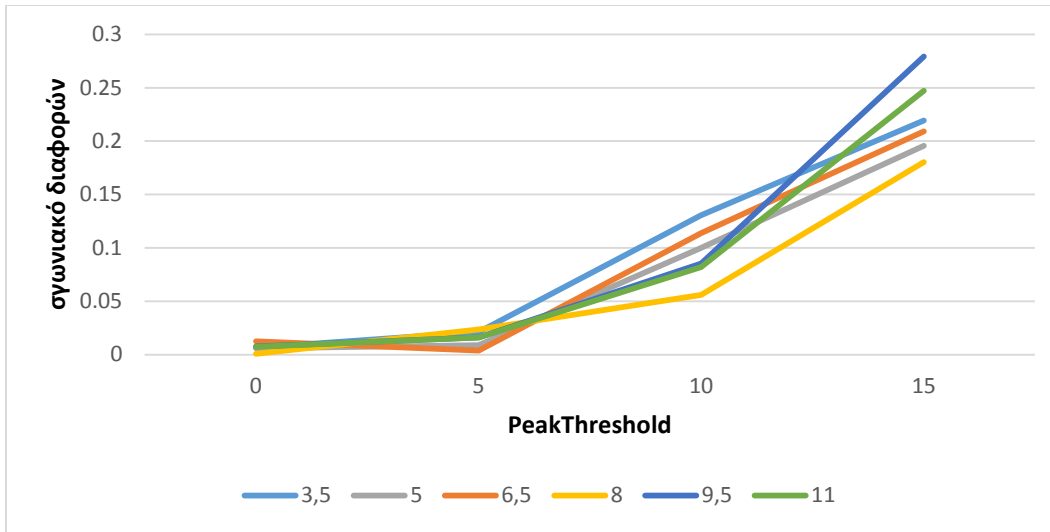
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
13429	3917	2991

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Sift, για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.43. Επιπολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών συναρτήσεως της παραμέτρου PeakThreshold, για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold. Και εδώ παρατηρεί κανείς ότι η μορφή των δύο διαγραμμάτων είναι παρόμοια, ενώ οι τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος κυμαίνονται σχεδόν στο ίδιο εύρος.



7.44. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος των διαφορών (°) συναρτήσει της παραμέτρου *PeakThreshold*, για κάθε τιμή της παραμέτρου *EdgeThreshold*.

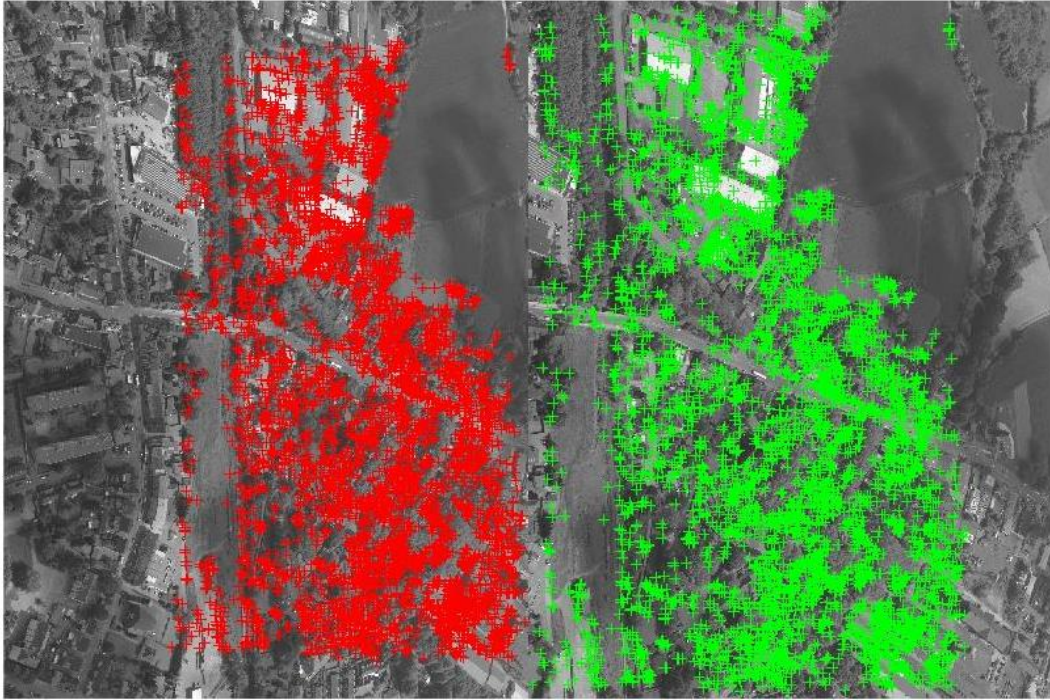
7.2.7 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή *Asift*

Ο τελεστής *Asift* εφαρμόστηκε στο 1/5 της αρχικής ανάλυσης των εικόνων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν από την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.001	-1.040	0.0003	-0.0568	0.2983	0.47	0.0329

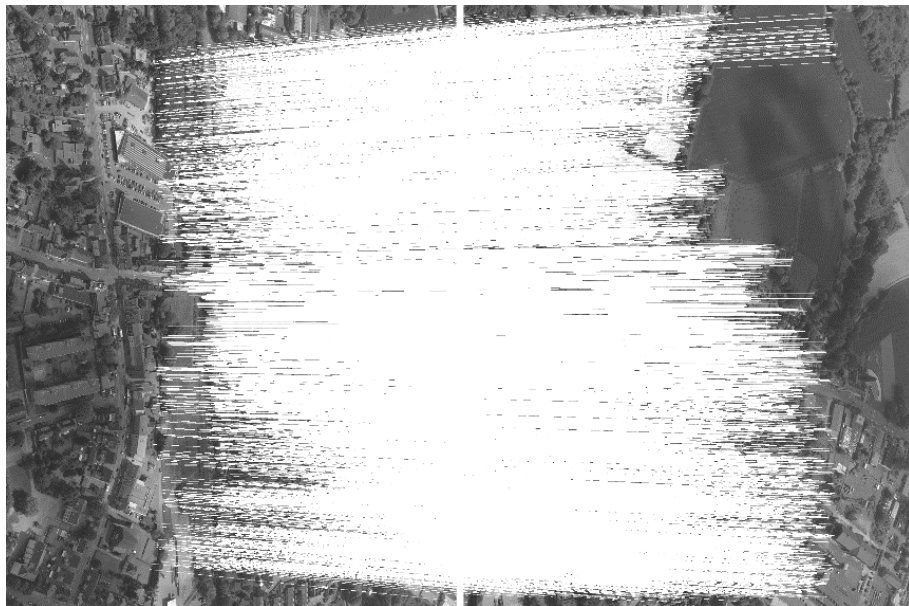
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
126982	8172	4998

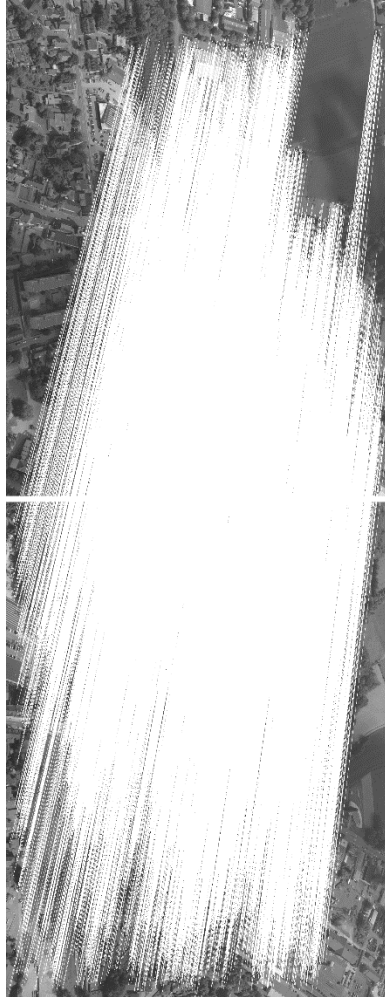
Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *Affine Sift* παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



7.45. Επιπολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη των εικόνων.



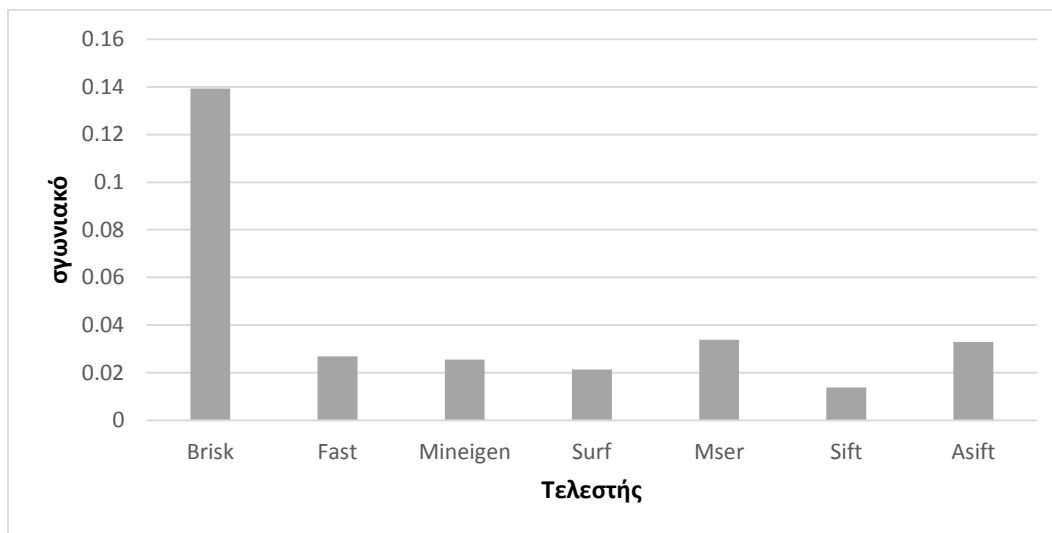


7.46. Επιπολικές εικόνες του πρώτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές οι ομολογίες των σημείων που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε οριζόντια (πρώτη εικόνα) όσο και σε κατακόρυφη (δεύτερη εικόνα) διάταξη.

7.2.8 Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού

Παρουσιάζονται τώρα συνολικά τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε τελεστή.

Τελεστής	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	Σγωνιακό($^{\circ}$)
Brisk	-0.008	-1.026	0.0377	0.0416	0.2700	0.1393
Fast	-0.005	-1.034	0.0212	-0.0200	0.2646	0.0269
Mineigen	-0.002	-1.035	0.0059	-0.0266	0.2741	0.0256
Surf	-0.004	-1.031	0.0183	-0.0003	0.2571	0.0214
Mser	-0.006	-1.037	0.0255	-0.0487	0.2496	0.0339
Sift	-0.005	-1.027	0.0250	0.0247	0.2700	0.0139
Asift	-0.001	-1.040	0.0003	-0.0568	0.2983	0.0329



7.47. Διάγραμμα της καλύτερης τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος για κάθε τελεστή.

Για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων για κάθε τελεστή παρουσιάζεται και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν ύστερα και από την εφαρμογή του αλγορίθμου *RANSAC*.

Τελεστής	Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από <i>RANSAC</i>
Brisk	9130	52	43
Fast	29493	689	519
Mineigen	38410	605	521
Surf	23236	2999	2013
Mser	9934	923	701
Sift	13429	3917	2991
Asift	126982	8172	4998

Και σε αυτό το ζεύγος εικόνων παρατηρείται ότι η μικρότερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος εμφανίζεται για τον τελεστή Sift, ενώ η (κατά πολύ) μεγαλύτερη για τον τελεστή Brisk. Για τον Asift ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για το προηγούμενο ζεύγος. Ο Sift εμφανίζεται πιο εύστοχος στην εύρεση σημείων ενδιαφέροντος, με ποσοστό ομολογιών γύρω στο 30% έναντι 6% των άλλων. Οι αλγόριθμοι Mineigen, Brisk, Fast έδωσαν γενικά πολύ λίγες ομολογίες σημείων, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστούν αδύνατον τον προσδιορισμό του σχετικού προσανατολισμού.

7.3 Τρίτο ζεύγος εικόνων



7.48. Στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών της Πολυτεχνειούπολης από Πεντακάμερο (6132x8176).

Οι παραπάνω εικόνες έχουν ληφθεί με διαφορετικό σύστημα αναφοράς. Συνεπώς για την χρήση του εν λόγω στερεοζεύγους έγινε αρχικά στροφή των εικόνων κατά 90° ενώ πραγματοποιήθηκε και μεταφορά των αξόνων x, y ώστε να ισχύει:

$$X = Y$$

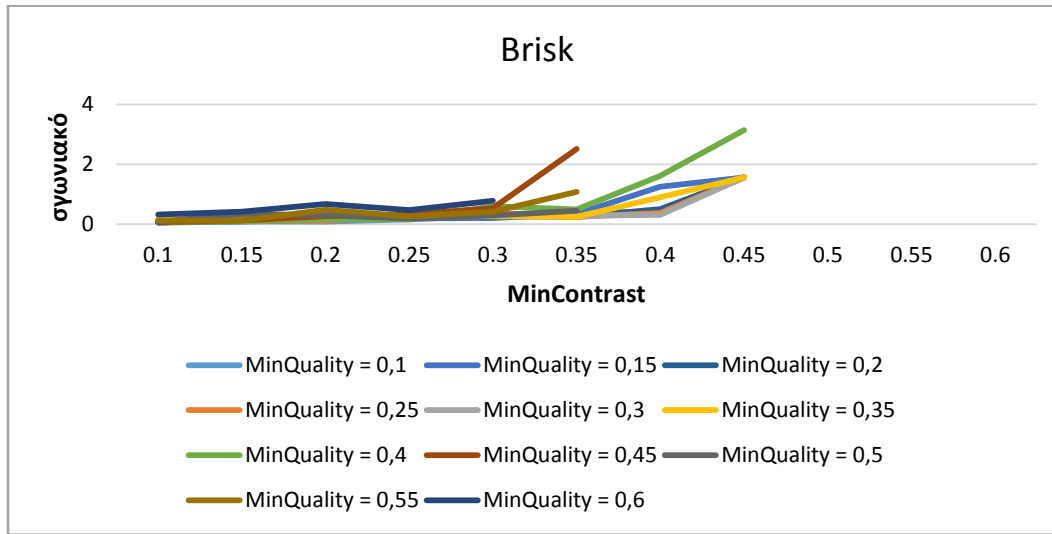
$$Y = -X$$

Οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν τελικά είναι οι ακόλουθες:



7.49. Στερεοζεύγος εικόνων που προέκυψε ύστερα από στροφή των αρχικών εικόνων κατά 90° (8176x6132).

7.3.1 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Brisk



7.50. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast* για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Brisk*.

Για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων το εύρος τιμών που χρησιμοποιήθηκε για τις παραμέτρους που εξετάστηκαν είναι από 0.1 έως 0.6 με βήμα 0.05.

Για τιμές *MinContrast* από 0.45 έως 0.6 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει υπολογισμένη τιμή για το συνολικό γωνιακό σφάλμα, καθώς ο αριθμός των σημείων ενδιαφέροντος που εξήχθησαν δεν επαρκεί για την επίλυση του σχετικού προσανατολισμού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και για μικρότερες τιμές της παραμέτρου *MinContrast* (ήδη από 0.3) για τιμές 0.45, 0.50, 0.55 και 0.6 της παραμέτρου *minQuality*.

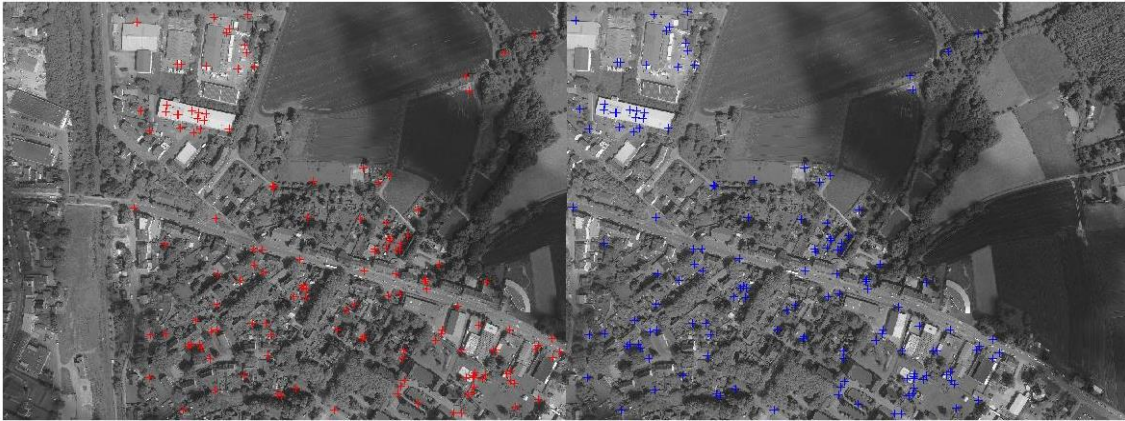
Όπως και στο προηγούμενο ζεύγος εικόνων που εξετάστηκε, παρατηρείται και εδώ ότι η μείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος είναι ανάλογη των τιμών των παραμέτρων, γεγονός που οφείλεται στην περίσσεια των σημείων που εξάγονται για τις τιμές αυτές.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Brisk* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων *MinQuality* = 0.15 και *MinContrast* = 0.1.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\kappa} (^{\circ})$
0.019	-0.027	-0.2482	-0.0259	0.1388	0.26	0.0599

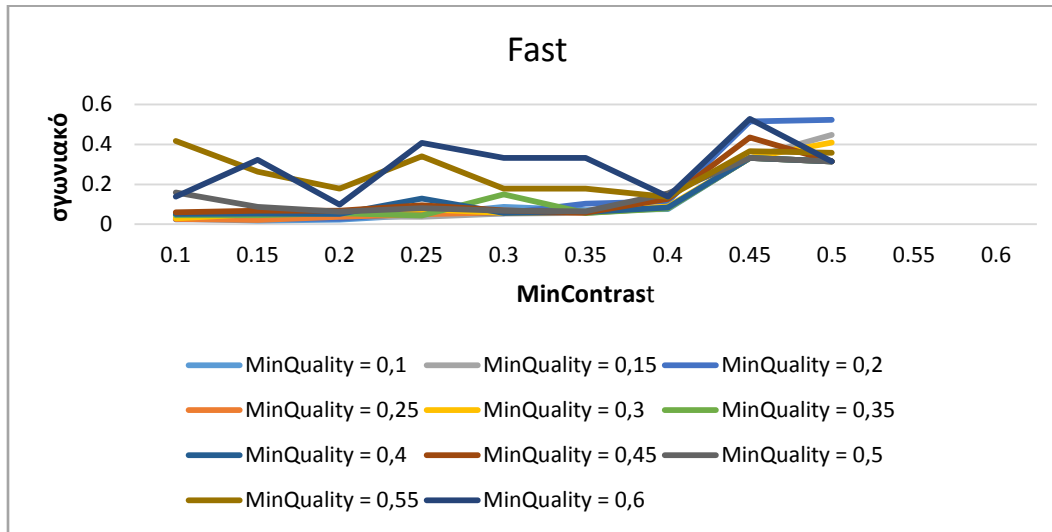
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
9308	171	138

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Brisk για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.51. Επιπολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Brisk στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (μπλε χρώμα) εικόνα.

7.3.2 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast



7.52. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast* για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Fast*.

Και για τον τελεστή *Fast* χρησιμοποιήθηκε βήμα 0.05 για τις τιμές των παραμέτρων. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για τιμές της παραμέτρου *MinContrast* μεγαλύτερες από 0.50 ο αριθμός των σημείων δεν επαρκεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού και κατ' επέκταση τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές της παραμέτρου *MinQuality* η τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος αυξάνεται αρκετά συγκριτικά με τις μικρότερες, όπου το σφάλμα, ειδικά για τις τιμές 0.55 και 0.60, φαίνεται σχεδόν να τετραπλασιάζεται.

Συνεπώς και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι η μείωση των τιμών των παραμέτρων που εξετάστηκαν οδηγεί και σε μείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος, λόγω της πληθώρας των σημείων που εξάγονται και της καλής πιθανόν κατανομής τους στην εικόνα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Fast* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων *MinQuality* = 0.15 και *MinContrast* = 0.1.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\iota\alpha\kappa\omicron}(^{\circ})$
0.020	-0.026	-0.2525	-0.1111	0.1603	0.18	0.0183

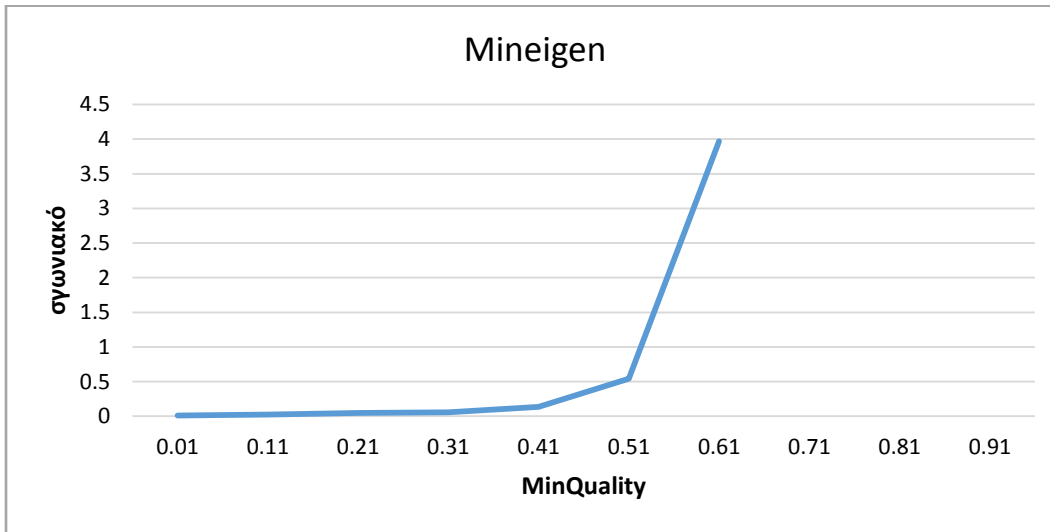
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
15606	912	681

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Fast για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.53. Επιτολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Fast στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.3.3 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen



7.54. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MinQuality*. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *MinEigen*.

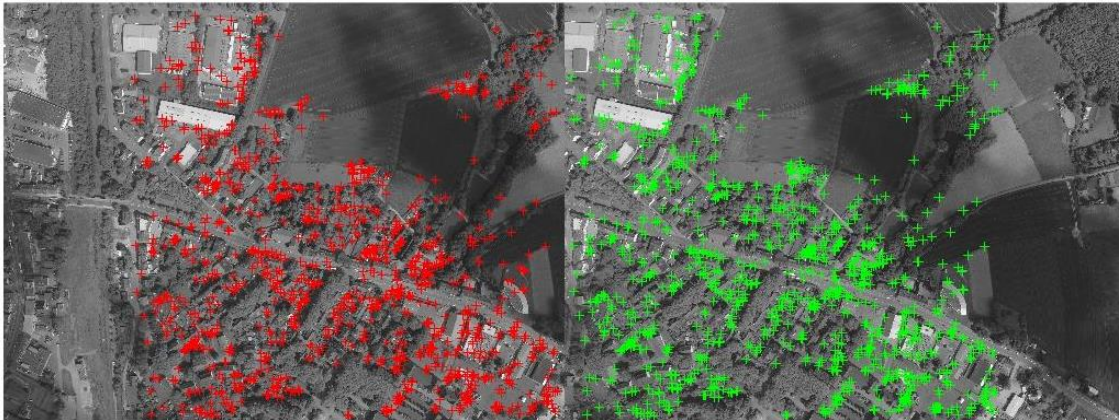
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου *MinQuality* συντελεί και στην αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Για τιμές μεγαλύτερες της τιμής 0.61 ο αριθμός των σημείων που εξαγονται δεν επαρκεί για την επίλυση της συνθήκης συνεπιτεδότητας και συνεπώς για τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *MinEigen* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από τη συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις παρουσιάζονται για τιμή *MinQuality* = 0.01.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
0.019	-0.026	-0.2376	-0.1157	0.1553	0.15	0.0124

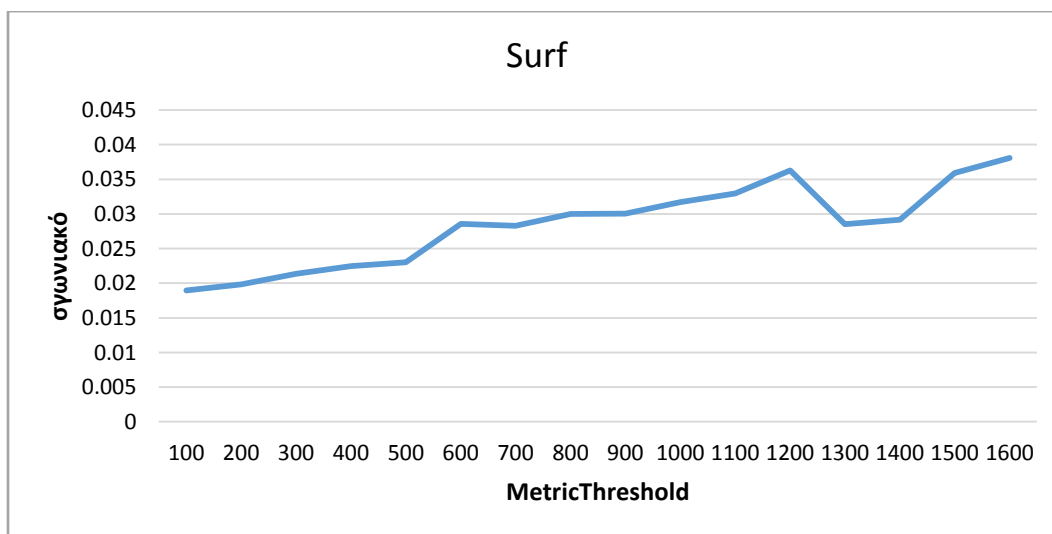
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
34088	1360	1156

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.55. Επιπολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.3.4 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf



7.56. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσεως της παραμέτρου MetricThreshold. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Surf.

Και στην περίπτωση αυτή η μορφή του διαγράμματος φαίνεται να ακολουθεί την μορφή του διαγράμματος που εξήχθη για τα προηγούμενα ζεύγη εικόνων που εξετάστηκαν. Το εύρος τιμών που εξετάστηκε για την παράμετρο *MetricThreshold* είναι από 100 έως 1600 με βήμα 100.

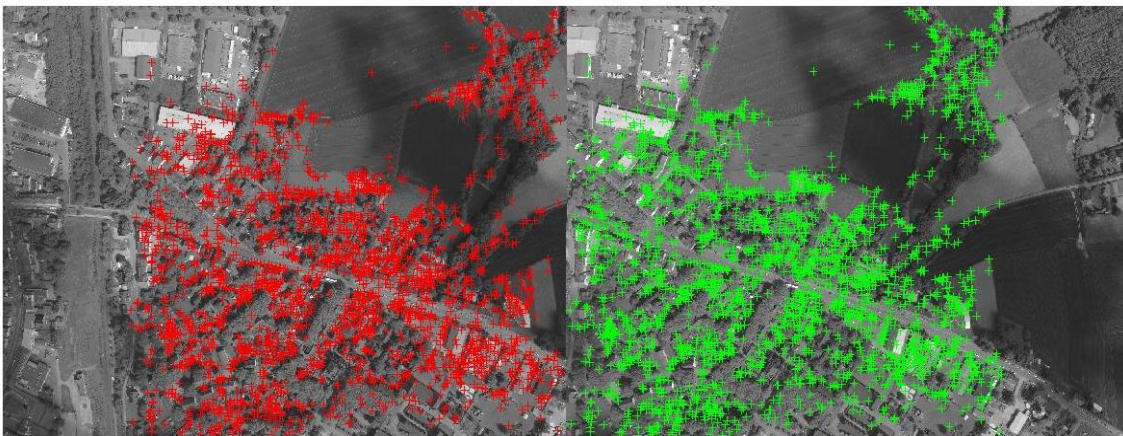
Η μικρότερη τιμή εντοπίζεται, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για τιμή *MetricThreshold* ίση με 100. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος, η οποία προκύπτει από την αύξηση της τιμής της παραμέτρου.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Surf* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμή παραμέτρου *MetricThreshold* = 100.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\nu\nu\alpha\kappa\omicron} (^{\circ})$
0.018	-0.025	-0.2318	-0.0881	0.1548	0.35	0.0189

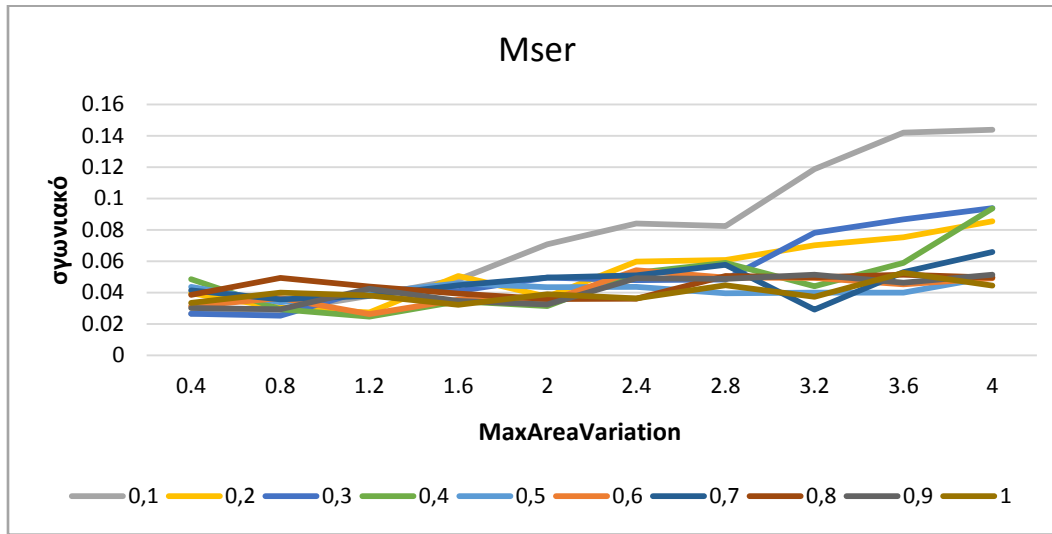
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
20945	3502	2393

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *Surf* για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.57. Επιτολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή *Surf* στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.3.5 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser



7.58. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MinAreaVariation* για κάθε τιμή της παραμέτρου *ThresholdDelta* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Mser*.

Στην περίπτωση του *Mser*, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι αρκετά σαφή και χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση. Οι μικρότερες τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος μπορεί να πει κανείς ότι γενικά εμφανίζονται για μικρές τιμές της παραμέτρου *MaxAreaVariation*. Από την άλλη μεριά, τα συμπεράσματα για την επίδραση της παραμετρου *ThresholdDelta* στην τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα, καθώς μεταβάλλονται συνεχώς.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Mser* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων *MaxAreaVariation* = 1 και *ThresholdDelta* = 0.4.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
0.016	-0.026	-0.2181	-0.1017	0.1384	0.26	0.0247

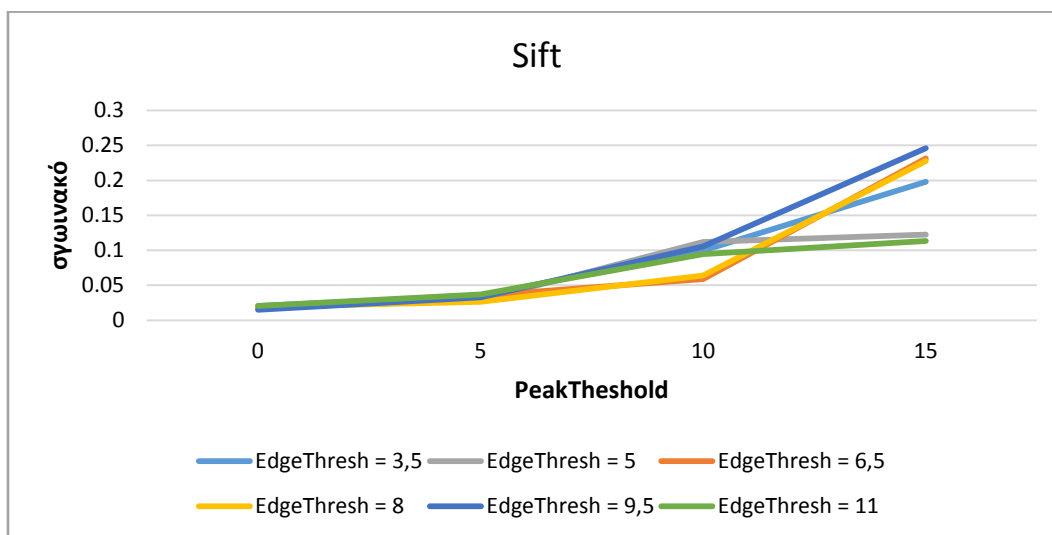
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
7843	763	583

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Mser για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.59. Επιτολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Mser στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.3.6 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift



7. 60. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου PeakThreshold για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Sift.

Από το διάγραμμα του τελεστή Sift προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου PeakThreshold συνεπάγεται και σταδιακή αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Συνεπώς οι μικρότερες τιμες εμφανίζονται για τιμή PeakThreshold ίση με το 0. Επιπλέον για το διάστημα [0 10] παρατηρείται ότι οι μικρότερες τιμές σφάλματος εντοπίζονται για τις μεσαίες τιμές της παραμέτρου EdgeThreshold (6.5, 8), γεγονός που δεν επιβεβαιώνεται και για το διάστημα [10, 15], πιθανόν λόγω του μικρού αριθμού σημείων που εξάγονται.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Sift στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων PeakThreshold = 0 και EdgeThreshold = 9.5.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
0.016	-0.027	-0.2122	-0.0550	0.1579	0.32	0.0147

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
13104	3884	2585

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Sift.



7.61. Επιπολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

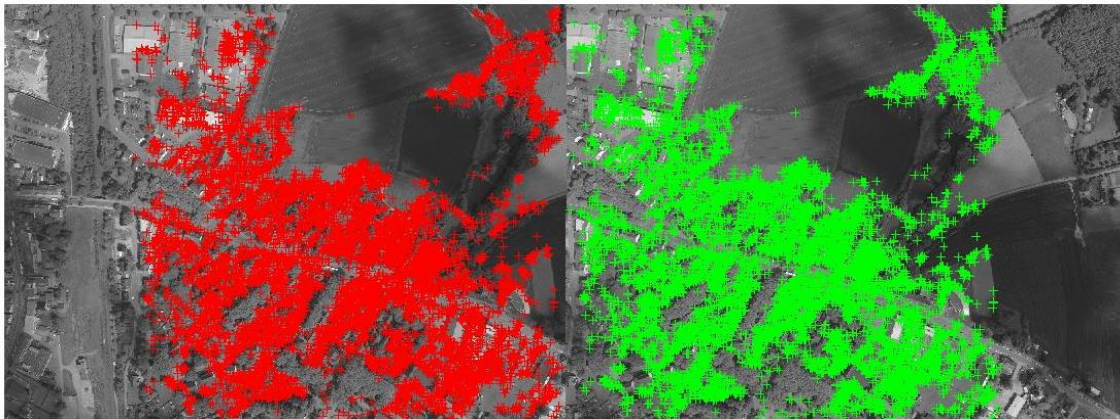
7.3.7 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift

Ο τελεστής Asift εφαρμόστηκε στο 1/5 της αρχικής ανάλυσης των εικόνων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν από την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	σγωνιακό($^{\circ}$)
0.013	-0.026	-0.1719	-0.1146	0.1490	0.30	0.0102

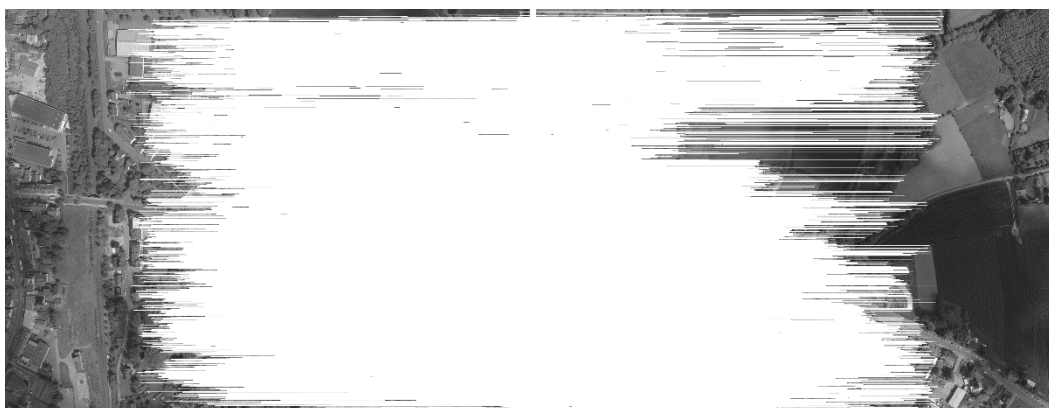
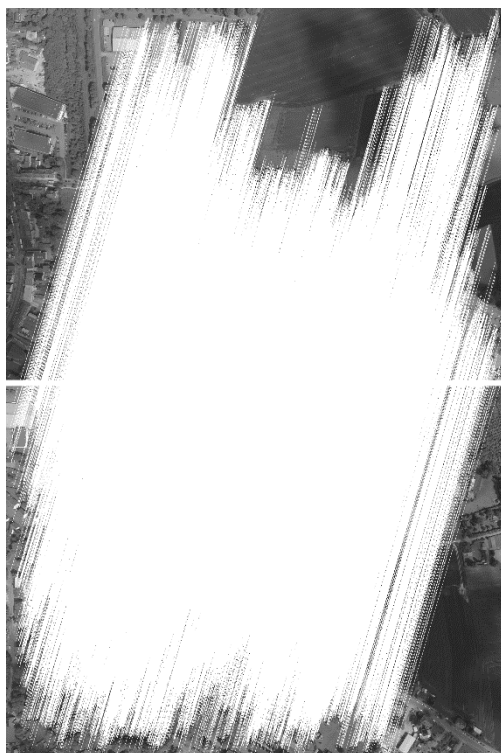
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
158175	19150	10752

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *Asift* παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



7.62. Επιπολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή *Asift* στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *Asift*, τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη.

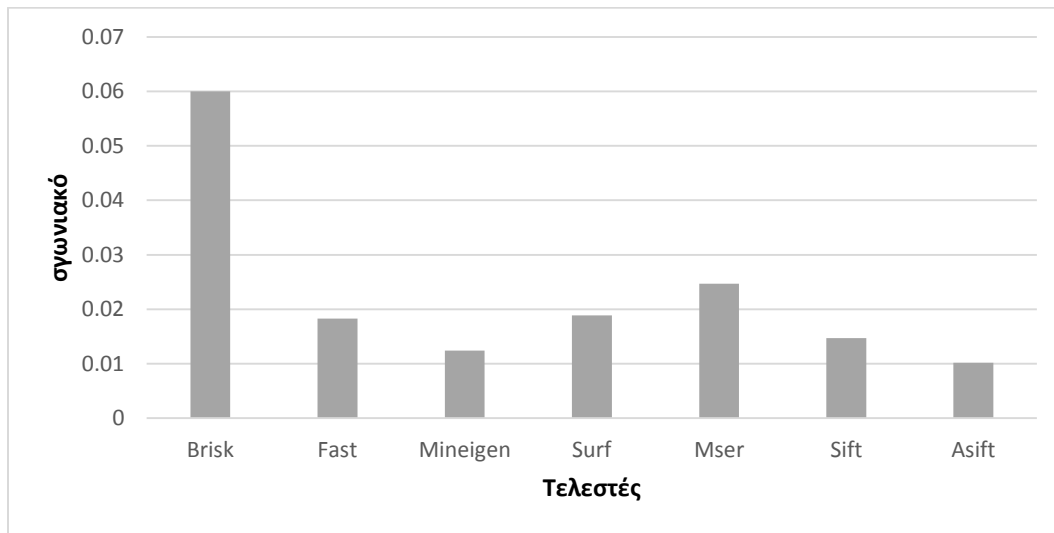


7.63. Επιπολικές εικόνες του δεύτερου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη (πρώτη εικόνα) όσο και σε οριζόντια (δεύτερη εικόνα) διάταξη.

7.3.8 Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού

Παρακάτω παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε τελεστή.

Τελεστής	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$\sigma_{\gamma\omega\nu\nu\alpha\iota\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
Brisk	0.019	-0.027	-0.2482	-0.0259	0.1388	0.0600
Fast	0.020	-0.026	-0.2524	-0.1111	0.1603	0.0183
Mineigen	0.019	-0.026	-0.2376	-0.1157	0.1553	0.0124
Surf	0.018	-0.025	-0.2318	-0.0881	0.1548	0.0189
Mser	0.016	-0.026	-0.2181	-0.1017	0.1384	0.0247
Sift	0.016	-0.027	-0.2122	-0.0549	0.1579	0.0147
Asift	0.013	-0.026	-0.1719	-0.1146	0.1490	0.0102



7.64. Διάγραμμα της καλύτερης τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος για κάθε τελεστή .

Για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων για κάθε τελεστή παρουσιάζεται παρακάτω και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν ύστερα και από την εφαρμογή του αλγορίθμου Ransac.

Τελεστής	Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
Brisk	9308	171	138
Fast	15606	912	681
Mineigen	34088	1360	1156
Surf	20945	3502	2393
Mser	7843	763	583
Sift	13104	3884	2585
Asift	158175	19150	10752

Η μικρότερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος εμφανίζεται εδώ για τον τελεστή Asift, ενώ η μεγαλύτερη για τον τελεστή Brisk, όπως συνέβη και στα δύο προηγούμενα ζεύγη εικόνων. Ο Sift εμφανίζει ποσοστό ορθών ομολογιών γύρω στο 30% έναντι 9% κατά μέσο όρο των άλλων. Και σε αυτό το ζεύγος εικόνων παρατηρείται ότι οι ομολογίες που προκύπτουν από τους τελεστές Mineigen, Brisk, Fast είναι πολύ λίγες, ακόμα και μηδενικές σε μερικές περιπτώσεις.

7.4 Τέταρτο ζεύγος εικόνων

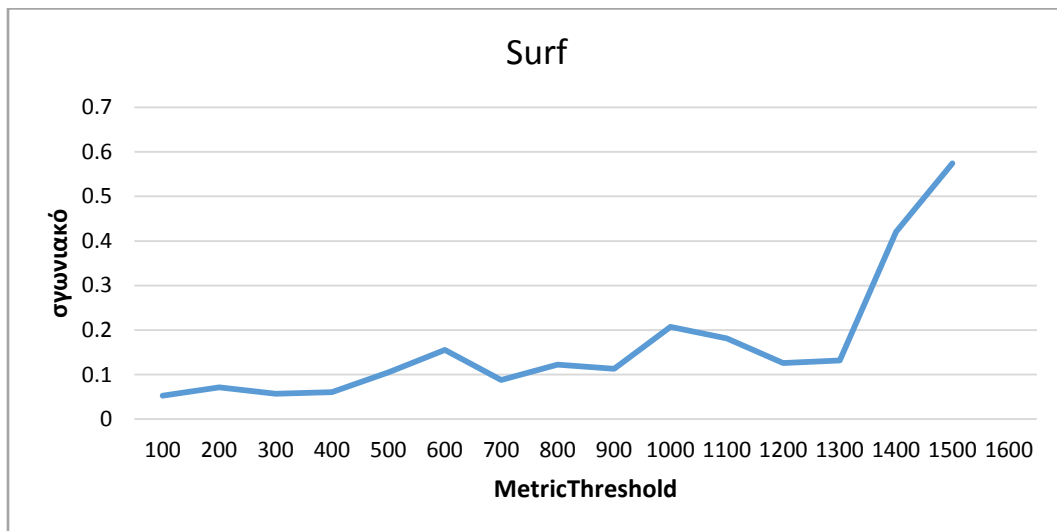
Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε μια εικόνα από το πρώτο ζεύγος του πεντακάμερου και μια εικόνα από το δεύτερο ζεύγος. Οι δύο εικόνες σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία $\phi = 45^\circ$, επομένως έχουν έντονες διαφορές προοπτικής και κλίμακας. Και εδώ, όπως είναι λογικό, οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στράφηκαν κατά 90° .

Οι τελεστές είναι εδώ οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν και στα προηγούμενα ζεύγη αλλά η απόδοσή τους δεν ήταν η ίδια. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των τελεστών Sift, Surf και Asift, καθώς ήταν οι μόνοι που απέδωσαν στο συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων.



7.65. Στερεοζεύγος αεροφωτογραφιών της Πολυτεχνειούπολης με γωνία $\varphi = 45^\circ$ από πεντακάμερο που προέκυψε από συνδυασμό των δύο προηγούμενων στερεοζευγών.

7.4.1 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf



7.66. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^\circ$) συναρτήσεως της παραμέτρου *MetricThreshold*. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Surf.

Και στην περίπτωση αυτή η μορφή του διαγράμματος φαίνεται να ακολουθεί την μορφή του διαγράμματος που εξήχθη για τα προηγούμενα ζεύγη εικόνων που εξετάστηκαν. Το εύρος τιμών για την παράμετρο *MetricThreshold* είναι από 100 έως 1600 με βήμα 100.

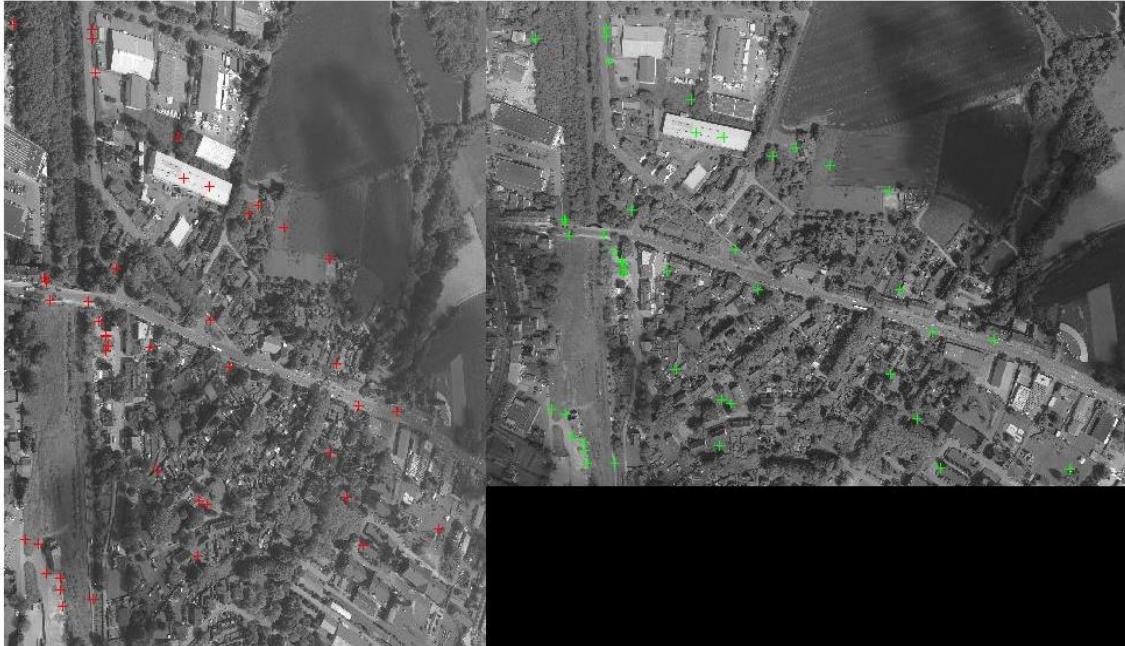
Η μικρότερη τιμή εντοπίζεται, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για τιμή *MetricThreshold* ίση με 100. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος, η οποία προκύπτει από την αύξηση της τιμής της παραμέτρου. Για τιμή *MetricThreshold* ίση με 1600 ο αριθμός των σημείων που προέκυψαν δεν ήταν επαρκής για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού και συνεπώς τον υπολογισμό ενός συνολικού γωνιακού σφάλματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Surf* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά μετά από εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμή παραμέτρου *MetricThreshold* = 100.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\nu\nu\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
0.013	-1.013	0.7343	45.0888	-0.5063	0.30	0.0525

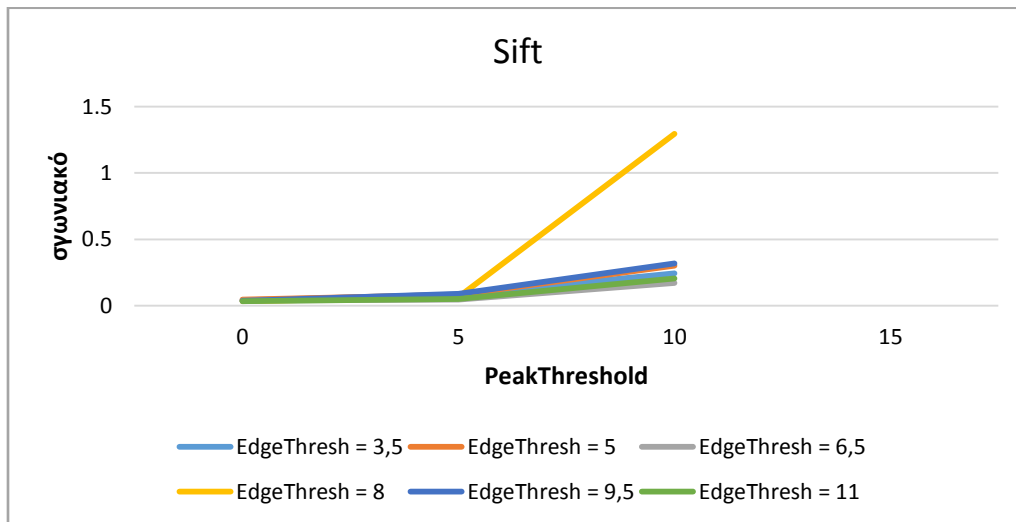
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
22203	188	45

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *Surf* για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



7.67. Επιπολικές εικόνες του τρίτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Surf στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.4.2 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift



7.68. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει της παραμέτρου PeakThreshold για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Sift.

Στην περίπτωση του τελεστή Sift παρατηρείται ότι η μορφή του διαγράμματος είναι η αναμενόμενη για το διάστημα PeakThreshold [0, 10], καθώς και εδώ οι μικρότερες τι-

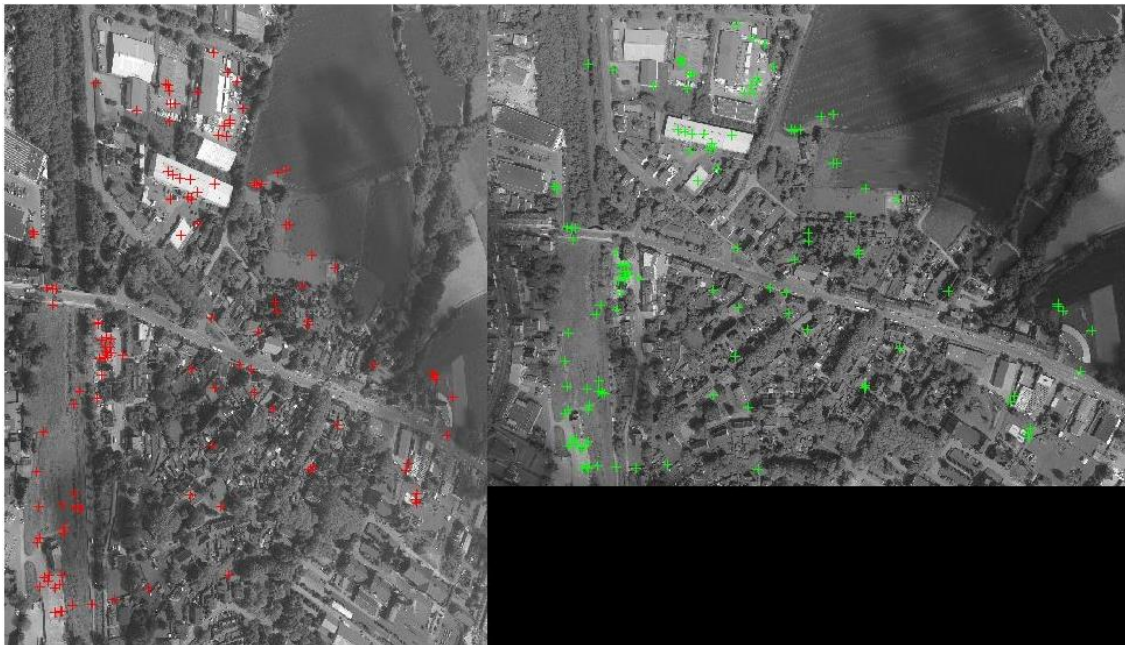
μές του συνολικού γωνιακού σφάλματος εντοπίζονται για μικρές τιμές της παραμέτρου. Για το διάστημα [10, 15] οι τιμές του σφάλματος δεν εμφανίζονται. Αυτό δεν οφείλεται, όπως θα περίμενε κανείς, στον μη επαρκή αριθμό των σημείων που εξήχθησαν αλλά στα μεγάλα σφάλματα που προέκυψαν για τις τιμές αυτές των παραμέτρων.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Sift στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων PeakThreshold = 0 και EdgeThreshold = 11.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
0.012	-1.013	0.7900	45.1554	-0.5334	0.28	0.0341

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
14026	380	126

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Sift για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



7.69. Επιτολικές εικόνες του τρίτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

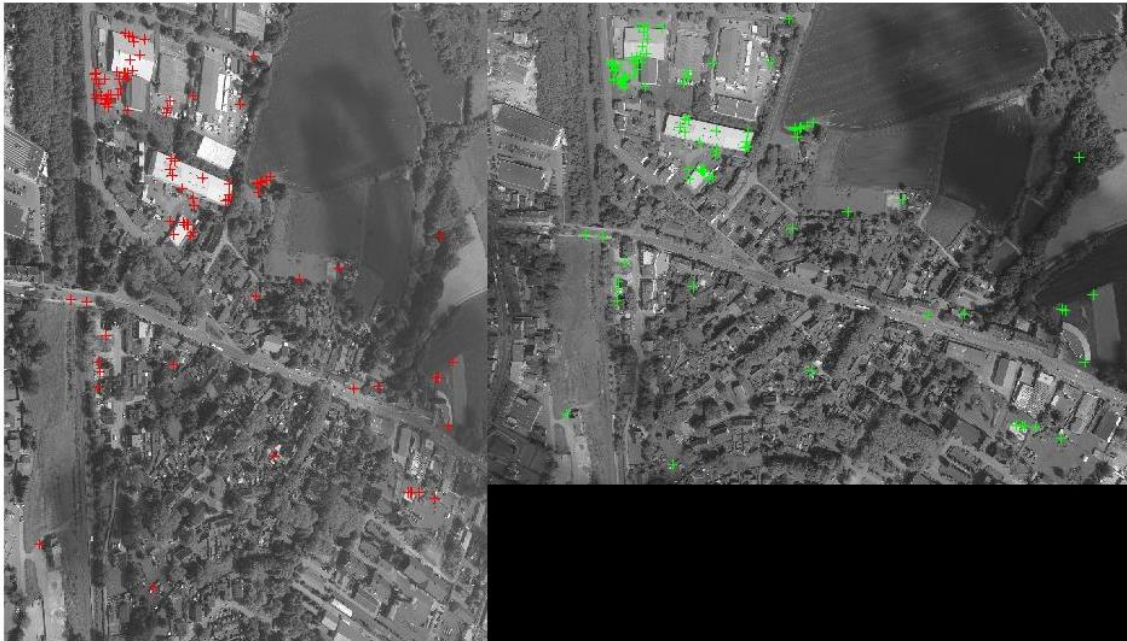
7.4.3 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift

Ο τελεστής Asift εφαρμόστηκε στο 1/5 της αρχικής ανάλυσης των εικόνων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν από την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	σγωνιακό($^{\circ}$)
0.021	-1.004	0.2292	45.3668	0.1089	0.30	0.1375

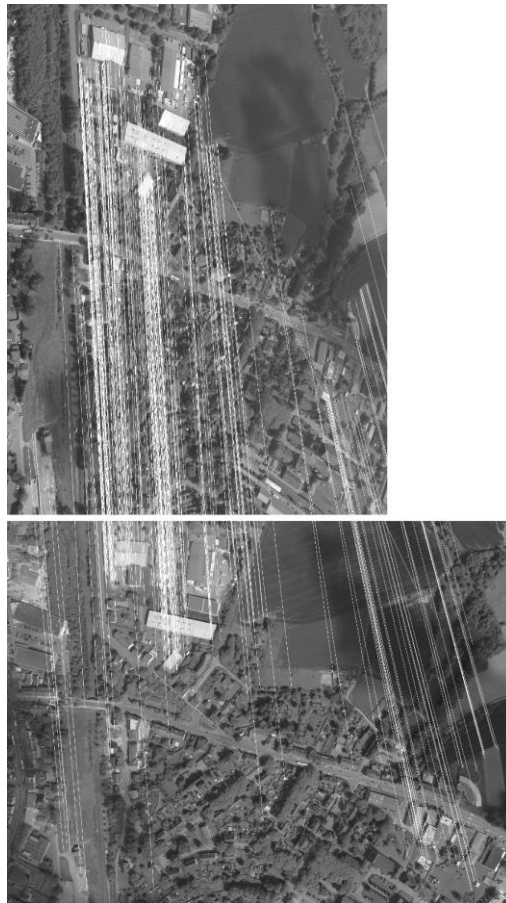
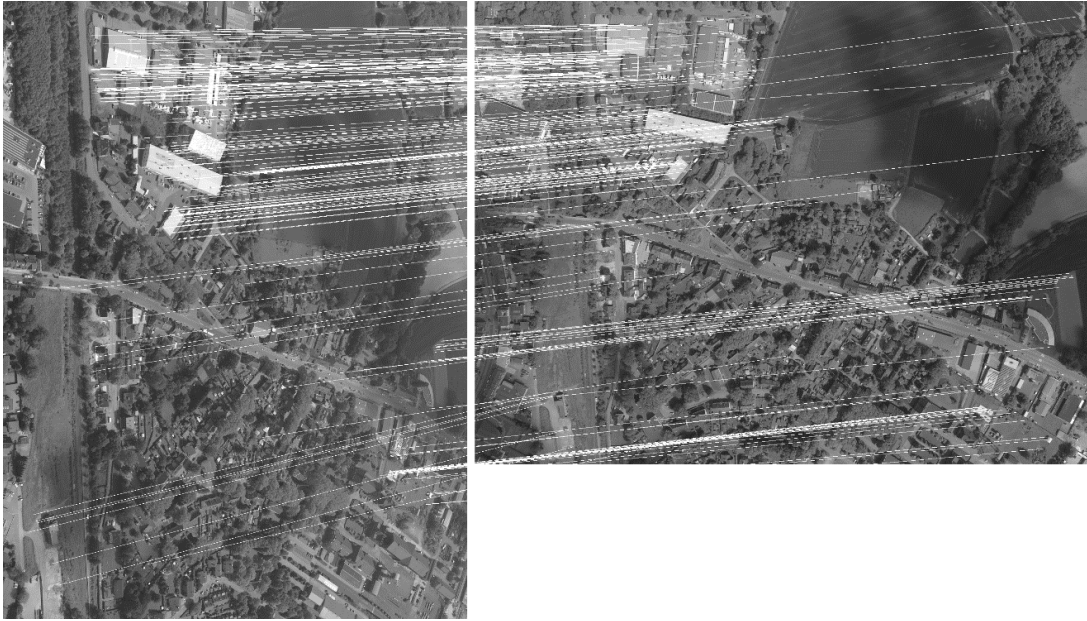
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
170363	221	105

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.70. Επιπολικές εικόνες του τρίτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Asift, στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες των σημείων, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη.



7.71. Επιτολικές εικόνες του τρίτου στερεοζεύγους από το πεντακάμερο, όπου παρουσιάζονται οι τελικές οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε οριζόντια (πρώτη εικόνα) όσο και σε κατακόρυφη (δεύτερη εικόνα) διάταξη.

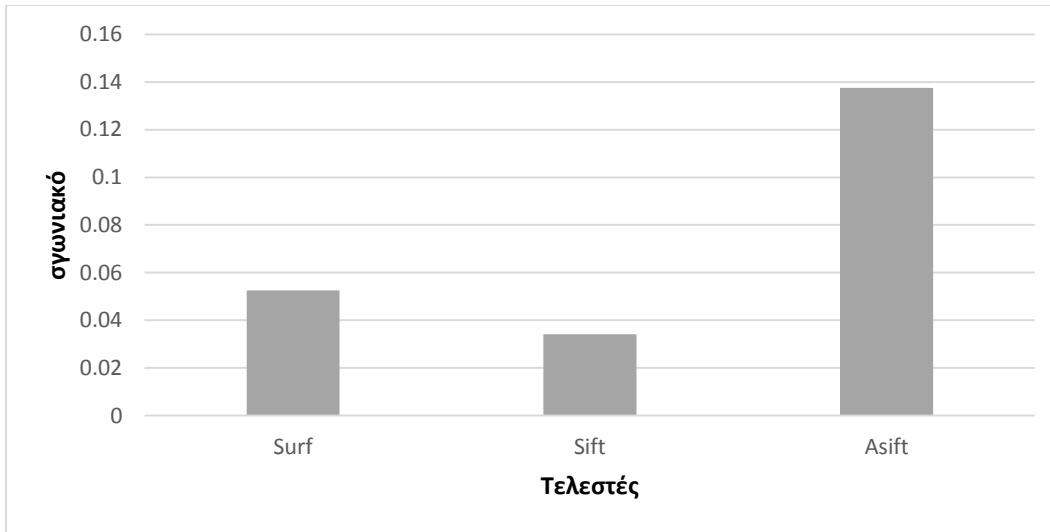
7.4.4 Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού

Παρακάτω παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε τελεστή.

Τελεστής	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
Surf	0.013	-1.013	0.7343	45.0888	-0.5063	0.0525
Sift	0.012	-1.013	0.7900	45.1554	-0.5334	0.0341
Asift	0.021	-1.004	0.2292	45.3668	0.1089	0.1375

Για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων για κάθε τελεστή παρουσιάζεται παρακάτω και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν ύστερα και από την εφαρμογή του αλγορίθμου *RANSAC*.

Τελεστής	Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
Surf	22203	188	45
Sift	14026	380	126
Asift	170363	221	105



7.72. Διάγραμμα της καλύτερης τιμής του συνολικού γωνιακού για την καλύτερη περίπτωση κάθε τελεστή.

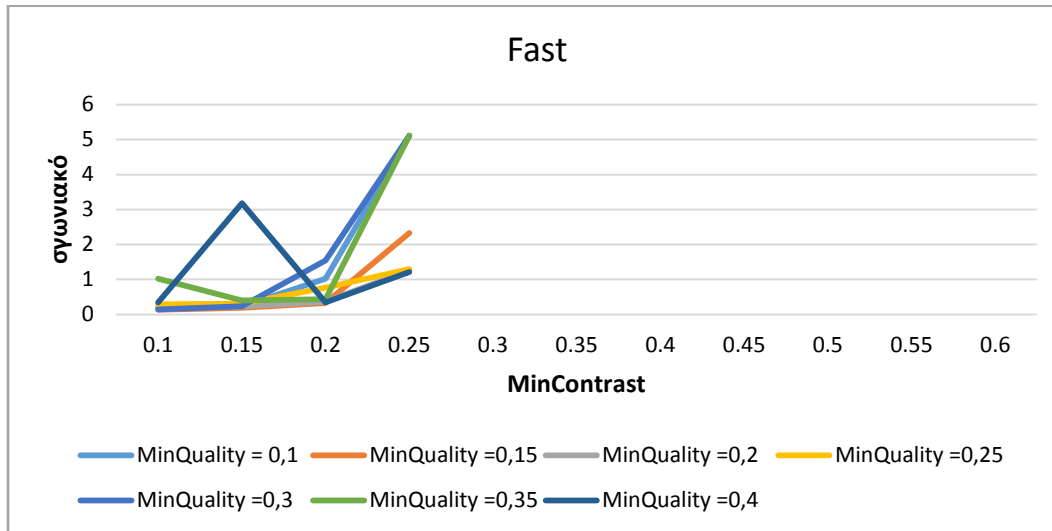
Για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων, όπως προαναφέρθηκε, οι μοναδικοί τελεστές που απέδωσαν ήταν οι Surf, Sift και Asift. Από τους προηγούμενους πίνακες παρατηρείται ότι η μικρότερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος εμφανίζεται για τον τελεστή Sift, ενώ σε κανέναν από τους τελεστές που εξετάστηκαν το ποσοστό των ομολογιών δεν ξεπερνάει το 3%. Οι υπόλοιποι τελεστές που εφαρμόστηκαν έδωσαν πολύ μικρό (ή μηδενικό τις περισσότερες φορές) αριθμό ομολογιών, από τις οποίες προέκυψαν λανθασμένα αποτελέσματα με πολύ μεγάλα σφάλματα.

7.5 Πέμπτο ζεύγος εικόνων



7.73. Στερεοζεύγος επίγειων εικόνων (3072x2304).

7.5.1 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast



7.74. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^{\circ}$) συναρτήσει της παραμέτρου *MinContrast* για κάθε τιμή της παραμέτρου *MinQuality* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Fast*.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι μικρότερες τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος εντοπίζονται, όπως ήταν αναμενόμενο, για τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου *MinContrast*. Για τιμές μεγαλύτερες από 0.26 τα σημεία που εξάγονται δεν επαρκούν για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας και τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος.

Αντιστοίχως παρατηρείται ότι και η μείωση της τιμής της παραμέτρου *MinQuality* συντελεί στην μείωση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Επιπλέον παρατηρείται ότι και η μορφή των καμπυλών παρουσιάζουν παρόμοια μορφή, με εξαίρεση βέβαια την τιμή 0.4, η οποία παρουσιάζει μέγιστη τιμή σφάλματος για τιμή *MinContrast* 0.15.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Fast* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων *MinQuality* = 0.15 και *MinContrast* = 0.15.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.078	-0.446	3.1018	44.2893	-9.4795	0.19	0.1899

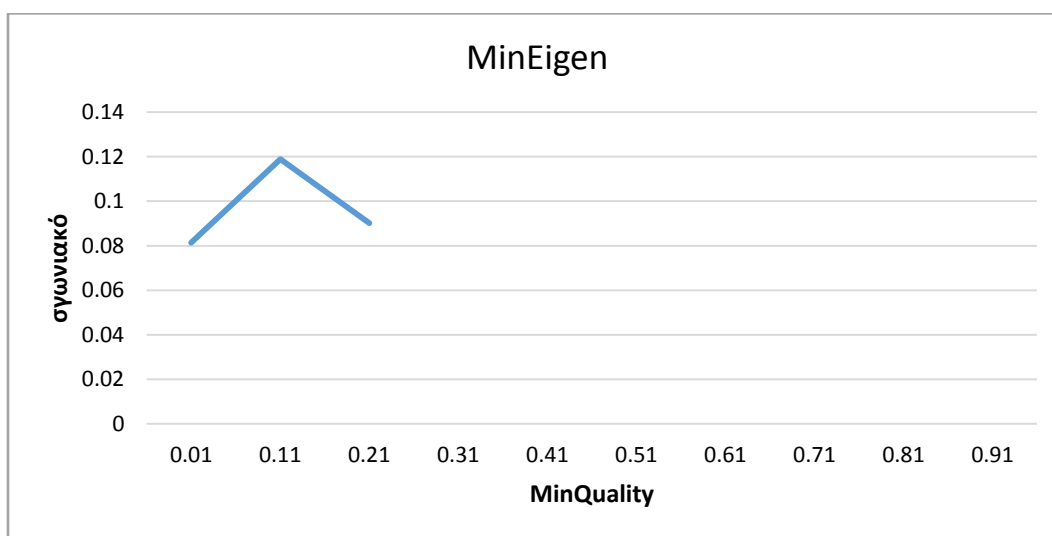
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
8333	32	27

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Fast για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.75. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Fast στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.5.2 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen



7.76. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσεως της παραμέτρου MinQuality. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή MinEigen.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η μικρότερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος εντοπίζεται για τιμή παραμέτρου MinQuality ίση με 0.01. Για τιμές μεγαλύτερες της τιμής 0.21 ο αριθμός των σημείων που εξάγονται δεν επαρκεί για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας και συνεπώς για τον υπολογισμό του συνολικού γωνιακού σφάλματος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η απόδοση του τελεστή MinEigen δεν είναι ικανοποιητική για το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή MinEigen στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις παρουσιάζονται για τιμή $\text{MinQuality} = 0.01$.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.079	-0.448	3.2055	44.4651	-9.5415	0.19	0.0814

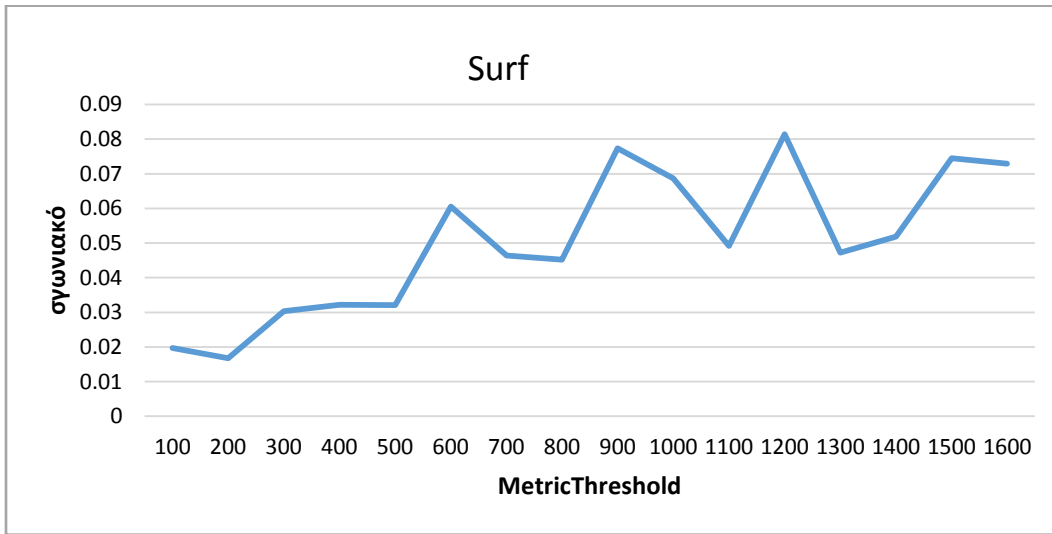
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
26183	79	70

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.77. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή MinEigen στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.5.3 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf



7.78. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) συναρτήσει της παραμέτρου *MetricThreshold*. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Surf.

Και στην περίπτωση αυτή η μορφή του διαγράμματος φαίνεται να ακολουθεί τη μορφή του διαγράμματος που εξήχθη για τα προηγούμενα ζεύγη εικόνων που εξετάστηκαν.

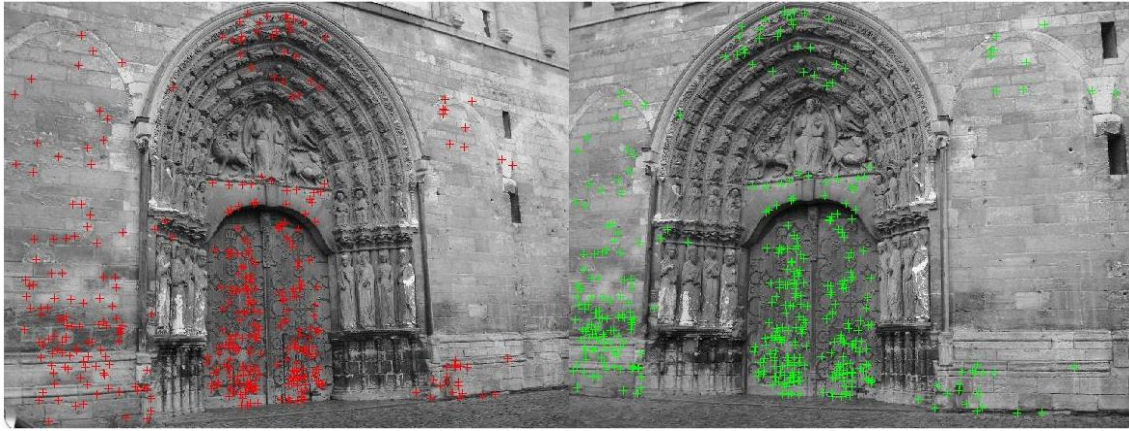
Η μικρότερη τιμή εντοπίζεται, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, για τιμή *MetricThreshold* ίση με 200. Επιπλέον παρατηρείται αύξηση της τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος με την αύξηση της τιμής της παραμέτρου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Surf στην δεξιά και αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά μετά από εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμή παραμέτρου *MetricThreshold* = 200.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_0 (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.074	-0.445	2.8433	44.1746	-9.2899	0.28	0.0168

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
11751	609	354

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Surf για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.79. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Surf στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

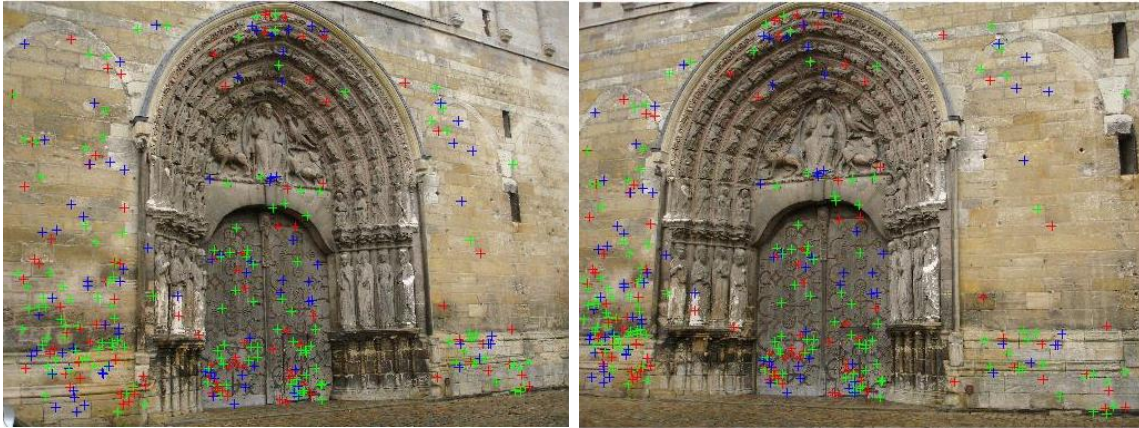
Ο τελεστής Surf εφαρμόστηκε και στα τρία κανάλια (rgb) της εικόνας ξεχωριστά με σκοπό να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που προέκυψαν από την εφαρμογή του στην ασπρόμαυρη εικόνα (grayscale).

Πιο συγκεκριμένα αρχικά εξήχθησαν σημεία ενδιαφέροντος και για τα τρία κανάλια της εικόνας ξεχωριστά. Ακολούθησε έλεγχος των σημείων αυτών με σκοπό την αποφυγή επιλογής του ίδιου σημείου σε περισσότερα του ενός κανάλια. Στην συνέχεια, στα σημεία που προέκυψαν εφαρμόστηκε ο RANSAC και βάσει της συνθήκης συνεπιπεδότητας έγινε ο υπολογισμός των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων, καθώς και ο υπολογισμός του συνολικού γωνιακού σφάλματος.

	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\acute{o}}(^{\circ})$
grayscale	-0.074	-0.445	2.8433	44.1746	-9.2899	0.28	0.0168
rgb	-0.076	-0.446	2.9761	44.3120	-9.3992	0.40	0.0131

	Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
grayscale	11751	609	354
rgb	12330	663	327

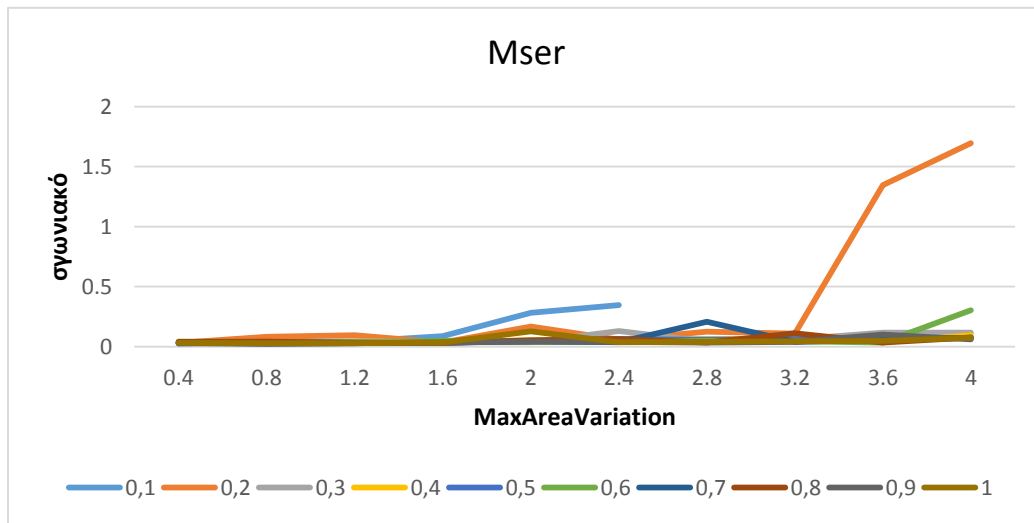
Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Surf και στα τρία κανάλια παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα, όπου το χρώμα κάθε σημείου υποδηλώνει και το κανάλι από το οποίο εξήχθη.



7.80. Επιτολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Surf και στα τρία κανάλια. Το χρώμα κάθε σημείου υποδηλώνει και το κανάλι από το οποίο εξήχθη.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η απόδοση του τελεστή και στις δύο περιπτώσεις είναι παρόμοια, καθώς η τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος και στις δύο περιπτώσεις είναι σχεδόν ίδια. Μια διαφορά εντοπίζεται στην τιμή του σ_0 της συνόρθωσης, η οποία εμφανίζεται μεγαλύτερη στην δεύτερη περίπτωση, αυτό αντισταθμίζεται ωστόσο από το μεγαλύτερο πλήθος και την καλύτερη κατανομή των σημείων στην περίπτωση των τριών καναλιών.

7.5.4 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser



7.81 Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος ($^{\circ}$) συναρτήσεως της παραμέτρου $MaxAreaVariation$ για κάθε τιμή της παραμέτρου $ThresholdDelta$ που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή Mser.

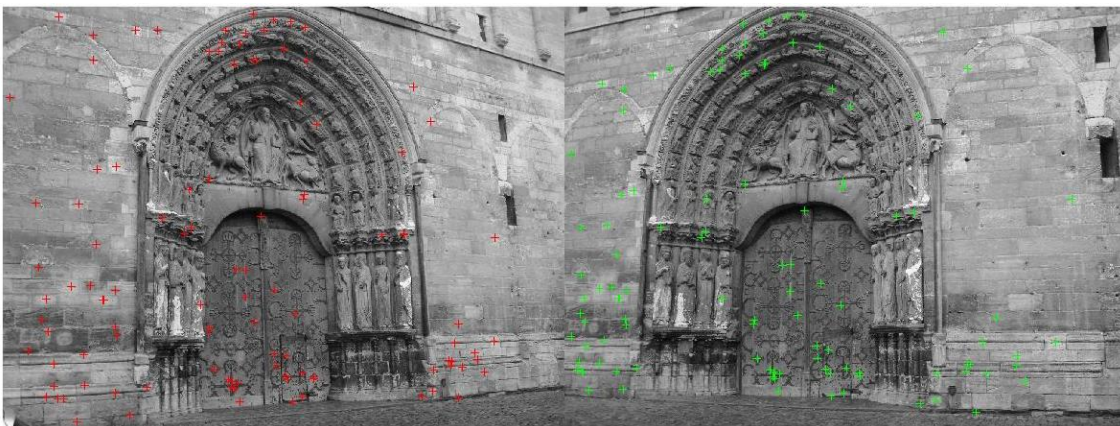
Οι μικρότερες τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος μπορούμε να λεχθεί γενικά ότι εμφανίζονται για μικρές τιμές της παραμέτρου MaxAreaVariation. Από την άλλη μεριά, τα συμπεράσματα για την επίδραση της παραμετρου ThresholdDelta στην τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμα, και χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή Mser στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από τη συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων MaxAreaVariation = 1 και ThresholdDelta = 0.4.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σ_o (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.077	-0.446	3.0542	44.2663	-9.4365	0.24	0.0223

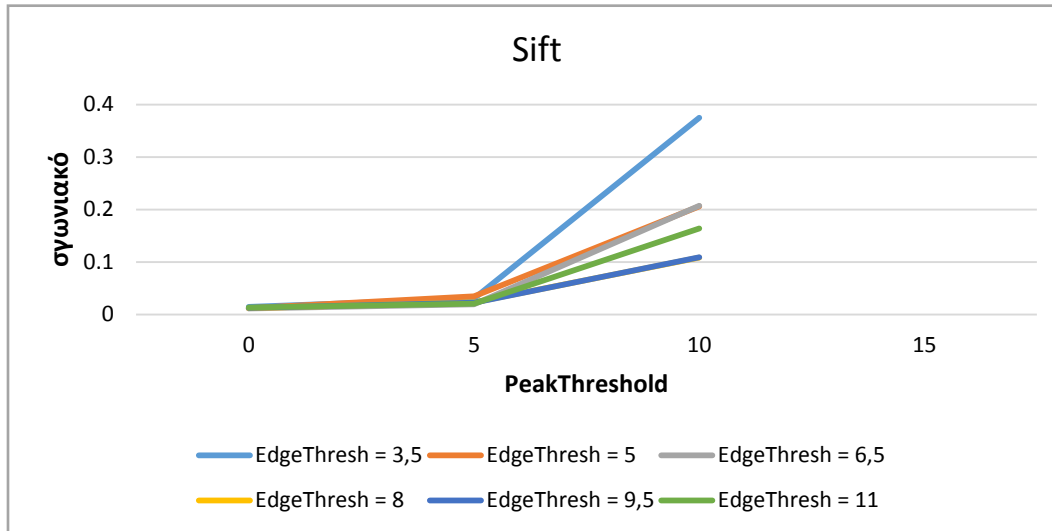
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
7701	194	114

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Mser για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.82. Επιτολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Mser στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.5.5 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift



7.83. Διάγραμμα του συνολικού γωνιακού σφάλματος συναρτήσει της παραμέτρου *PeakThreshold* για κάθε τιμή της παραμέτρου *EdgeThreshold* που εξετάστηκε. Τα σημεία ενδιαφέροντος εξήχθησαν βάσει του τελεστή *Sift*.

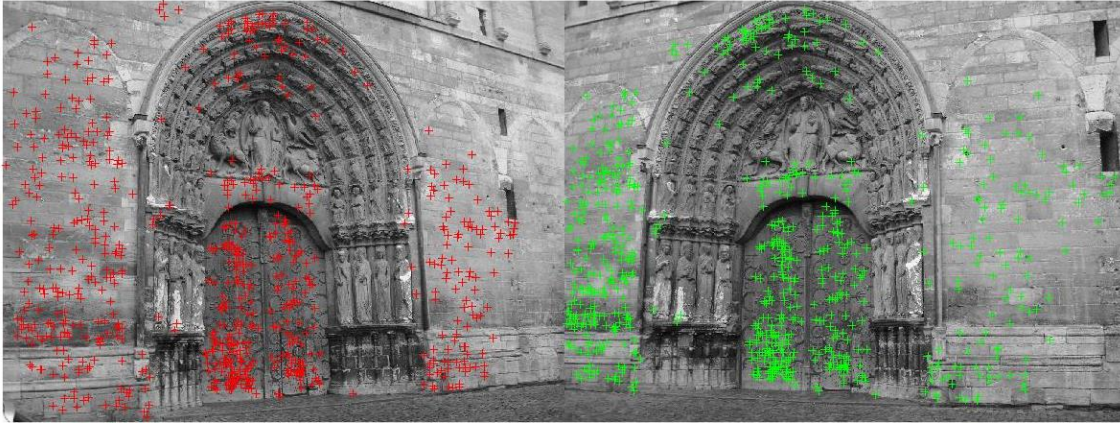
Στην περίπτωση του τελεστή *Sift* παρατηρείται ότι η μορφή του διαγράμματος είναι αναμενόμενη, καθώς και εδώ οι μικρότερες τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος εντοπίζονται για μικρές τιμές της παραμέτρου. Για το διάστημα [10, 15] οι τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος δεν υπολογίστηκαν, καθώς ο αριθμός των σημείων που εξήχθησαν δεν ήταν επαρκής για την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας. Τέλος, και εδώ η αύξηση της τιμής της παραμετρου *EdgeThreshold* συντελεί στην εξαγωγή περισσότερων σημείων ενδιαφέροντος.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού για την μικρότερη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος, καθώς και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν με τον τελεστή *Sift* στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από τη συνταύτιση των σημείων αυτών, και τα σημεία που προέκυψαν τελικά ύστερα και από την εφαρμογή του *RANSAC* για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων. Οι βέλτιστες λύσεις εμφανίζονται για τιμές παραμέτρων *PeakThreshold* = 0 και *EdgeThreshold* = 6.5.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	$\sigma_{\text{γωνιακό}}(^{\circ})$
-0.076	-0.445	2.9846	44.2055	-9.3968	0.33	0.0115

Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από Ransac
7902	1087	727

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Sift για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



7.84. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

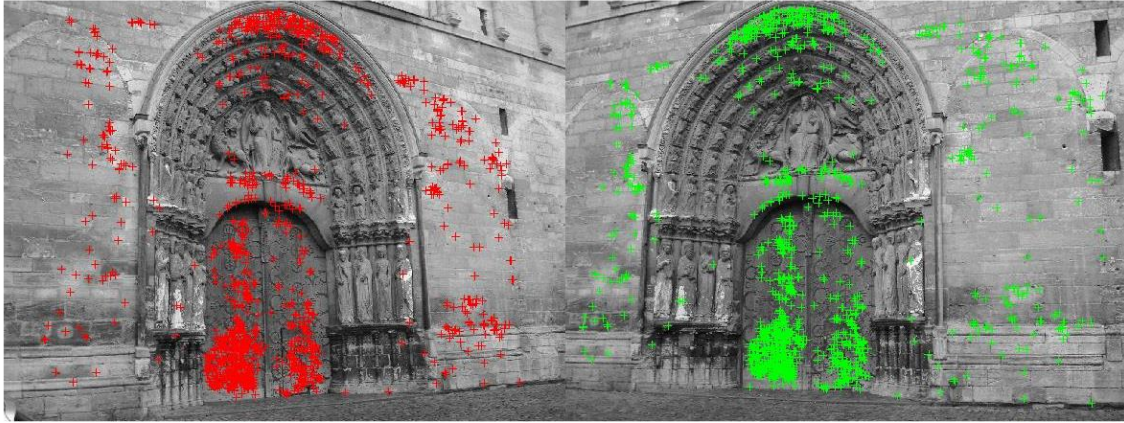
7.5.6 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν από την επίλυση της συνθήκης συνεπιπεδότητας.

b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	σο (pixel)	σγωνιακό($^{\circ}$)
-0.075	-0.446	2.9565	44.2610	-9.3392	0.40	0.0124

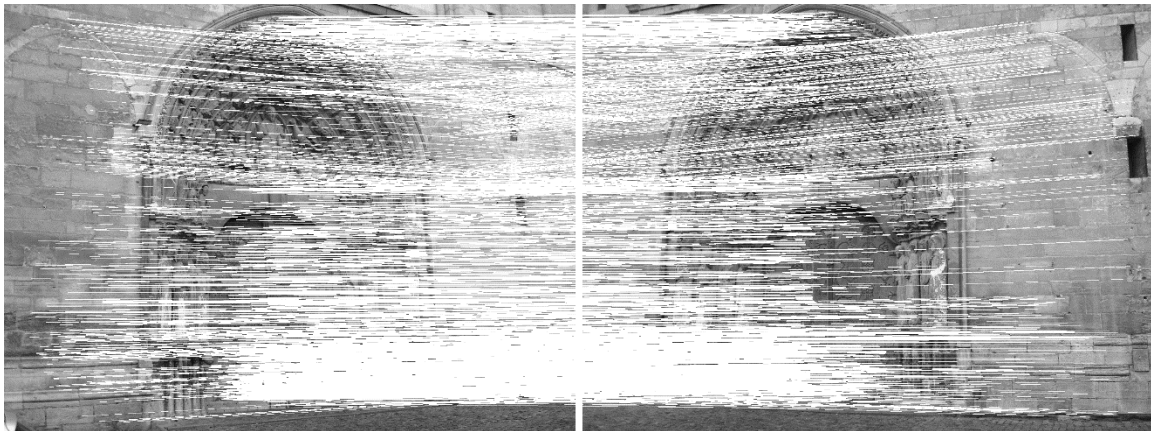
Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από RANSAC
146531	2249	1402

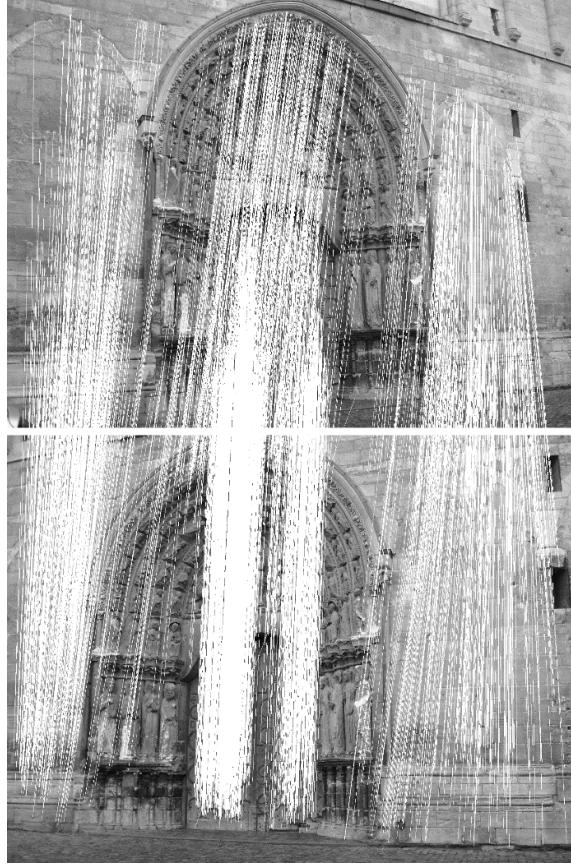
Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.85. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Asift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη των εικόνων.



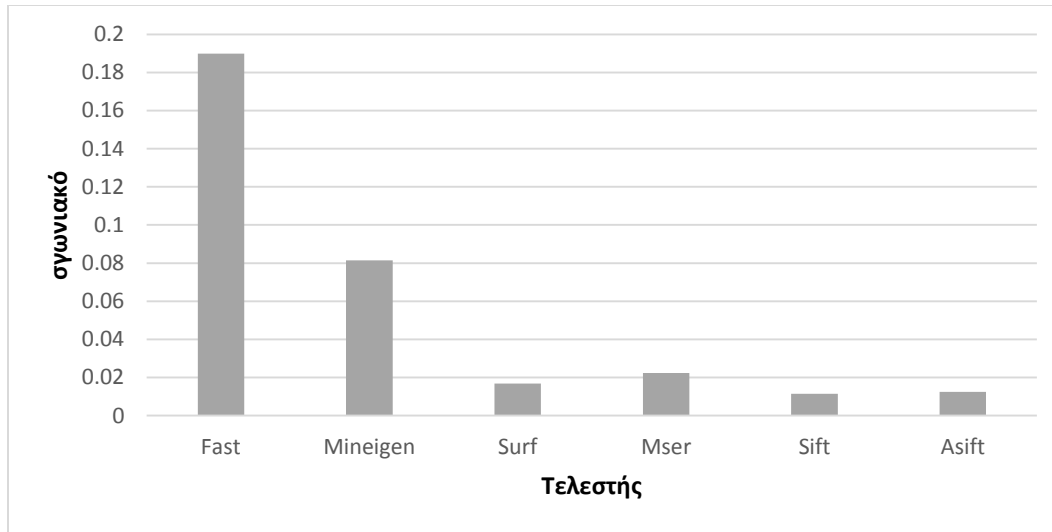


7.86. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε οριζόντια (πρώτη εικόνα) όσο και σε κατακόρυφη (δεύτερη εικόνα) διάταξη.

7.5.7 Αποτελέσματα παραμέτρων σχετικού προσανατολισμού

Παρακάτω παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα του σχετικού προσανατολισμού που προέκυψαν για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν για κάθε τελεστή.

Τελεστής	b_y	b_z	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$\sigma_{\gamma\omega\gamma\iota\alpha\kappa\omicron}(^{\circ})$
Fast	-0.078	-0.446	3.1018	44.2893	-9.4795	0.1899
Mineigen	-0.079	-0.448	3.2055	44.4651	-9.5415	0.0814
Surf	-0.074	-0.445	2.8433	44.1746	-9.2899	0.0168
Mser	-0.077	-0.446	3.0542	44.2663	-9.4365	0.0223
Sift	-0.076	-0.445	2.9846	44.2055	-9.3968	0.0115
Asift	-0.075	-0.446	2.9565	44.2610	-9.3392	0.0124



7.87. Διάγραμμα της καλύτερης τιμής του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) για κάθε τελεστή.

Για τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων για κάθε τελεστή παρουσιάζεται παρακάτω και ο μέσος όρος των σημείων που εξήχθησαν στην δεξιά και την αριστερή εικόνα, τα σημεία που προέκυψαν ύστερα από την συνταύτιση των σημείων αυτών, καθώς και τα σημεία που προέκυψαν ύστερα και από την εφαρμογή του αλγορίθμου *RANSAC*.

Τελεστής	Μέσος όρος σημείων	Πλήθος ομολογιών	Μετά από <i>RANSAC</i>
Fast	8333	32	27
Mineigen	26183	79	70
Surf	11751	609	354
Mser	7701	194	114
Sift	7902	1087	727
Asift	146531	2249	1402

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι και εδώ η μικρότερη τιμή του συνολικού γωνιακού σφάλματος εμφανίζεται για τον τελεστή *Sift*, ενώ η μεγαλύτερη για τον τελεστή *Fast*. Ο τελεστής *Brisk* έδωσε μηδενικό αριθμό ομολογιών, εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις όπου ο αριθμός των σημείων ήταν πολύ μικρός και τα αποτελέσματα που προέκυψαν λανθασμένα με πολύ μεγάλη τιμή συνολικού γωνιακού σφάλματος. Και εδώ ο *Sift* εμφανίζεται πιο εύστοχος στην εύρεση σημείων ενδιαφέροντος, καθώς το ποσοστό των ομολογιών του βρίσκεται στο 23% έναντι του 2% των άλλων. Όλοι οι αλγόρι-

θμοι, εκτός των Sift και Asift, έδωσαν γενικά λίγες ομολογίες σημείων, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστούν αδύνατη την εύρεση του σχετικού προσανατολισμού.

7.6 Έκτο ζεύγος εικόνων

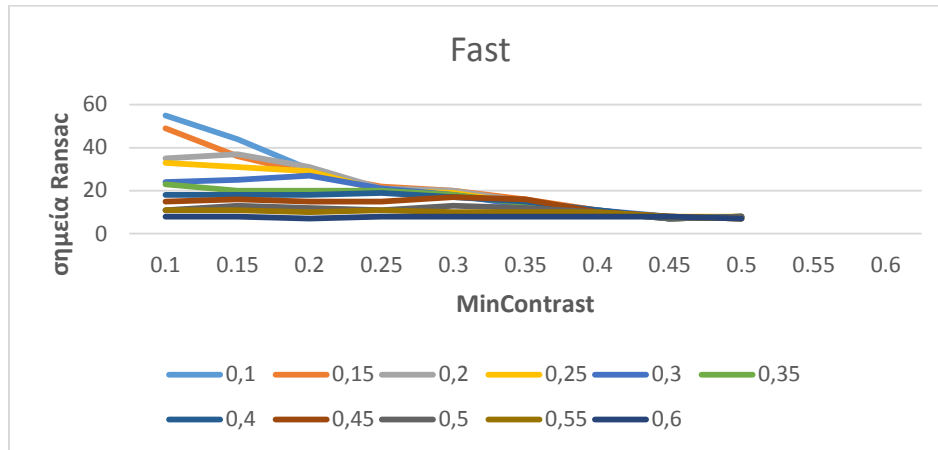


7.88. Στερεοζεύγος θερμικών εικόνων από διαφορετικές κάμερες (640x512).

Το ζεύγος των θερμικών εικόνων έχει προκύψει από διαφορετικές κάμερες, οι οποίες είχαν συγχρονιστεί ώστε η λήψη να γίνεται ταυτόχρονα. Οι εικονοψηφίδες της εικόνας που εμφανίζονται με τόνους του γκρι κοντά στο 255, είναι αυτές που εκπέμπουν και την μεγαλύτερη θερμότητα συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Αυτός είναι και ο λόγος που στο ζεύγος αυτό με πιο φωτεινό χρώμα εμφανίζονται τα ανθρώπινα σώματα και τα φωτιστικά, καθώς η θερμότητα που εκπέμπουν είναι μεγαλύτερη από εκείνη του περιβάλλοντα χώρου.

Στις εικόνες αυτές εφαρμόστηκαν οι τελεστές Fast, Surf, Mineigen, Mser και Sift για διάφορα εύρη τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιεί ο καθένας από αυτούς. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, καθώς παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στις τιμές των αποτελεσμάτων του σχετικού προσανατολισμού και αντίστοιχα μεγάλες τιμές στο συνολικό γωνιακό σφάλμα. Αυτό αποδίδεται εν μέρει στην άγνοια του εσωτερικού προσανατολισμού, η οποία απλώς εκτιμήθηκε βάσει της βιβλιογραφίας, ενώ δεν ήταν βέβαιο και αν οι δύο μηχανές είχαν ίδιο φακό. Επιπλέον βέβαια, με εξαίρεση τον τελεστή Sift, τα εξαγόμενα σημεία είναι συγκεντρωμένα σε σχετικά μικρές περιοχές της εικόνας (δυσμενής κατανομή), γεγονός που επηρεάζει το αποτέλεσμα της συνόρθωσης. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε η αξιολόγηση των τελεστών στο ζεύγος αυτό χωρίς περαιτέρω επίλυση της συνθήκης συνεπιτεδότητας. Συνεπώς η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των τελεστών πραγματοποιήθηκε ποιοτικά βάσει του αριθμού των σημείων ενδιαφέροντος που προέκυψαν μετά από τον υπολογισμό του επιπολικού πίνακα με χρήση του αλγορίθμου RANSAC, που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

7.6.1 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Fast



7.89. Διάγραμμα αριθμού σημείων που εξήχθησαν με τον Fast συναρτήσεως της παραμέτρου MinContrast για κάθε εξεταζόμενη τιμή της παραμέτρου MinQuality. Στα εξαχθέντα σημεία εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

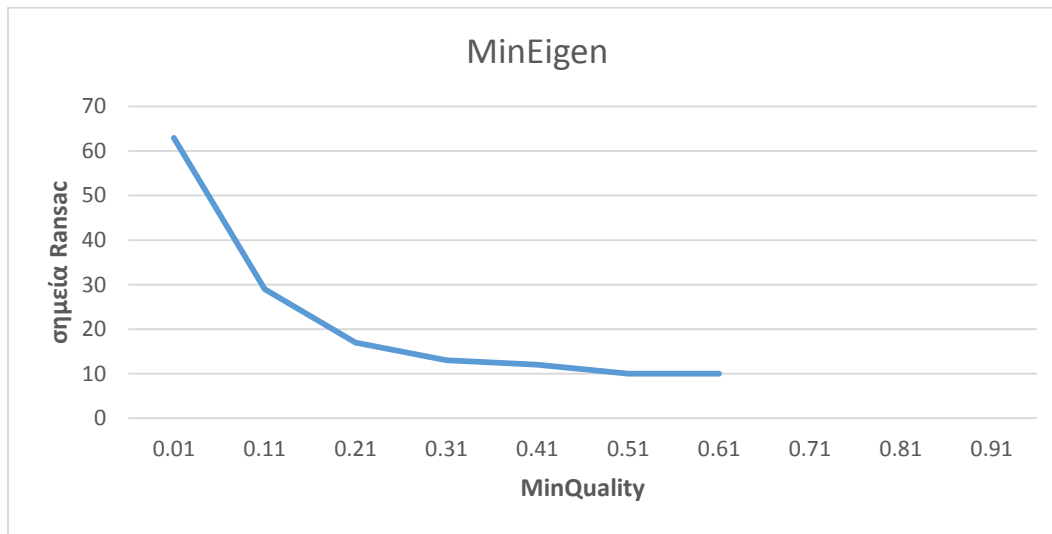
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των σημείων που εξήχθη από τον αλγόριθμο Fast για κάθε τιμή των παραμέτρων MinContrast και MinQuality που εξετάστηκε. Μετά την εξαγωγή των σημείων εφαρμόστηκε βέβαια και ο αλγόριθμος RANSAC με σκοπό την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων μέσω του επιπολικού πίνακα.

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι για κάθε τιμή της παραμέτρου MinQuality, ο μεγαλύτερος αριθμός σημείων εξάγεται για την μικρότερη τιμή MinContrast. Όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου MinContrast τόσο μειώνεται ο αριθμός των σημείων, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 0.50 δεν εξάγεται κανένα σημείο ενδιαφέροντος. Επιπλέον, από το διάγραμμα προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου minQuality τόσο μειώνεται ο αριθμός των εξαγόμενων σημείων. Η μορφή του διαγράμματος επιβεβαιώνει και τις βιβλιογραφικές αναφορές. Οι ομολογίες που προέκυψαν για τιμές MinQuality = 0.1 και MinContrast = 0.1 παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.



7.90. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Fast στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

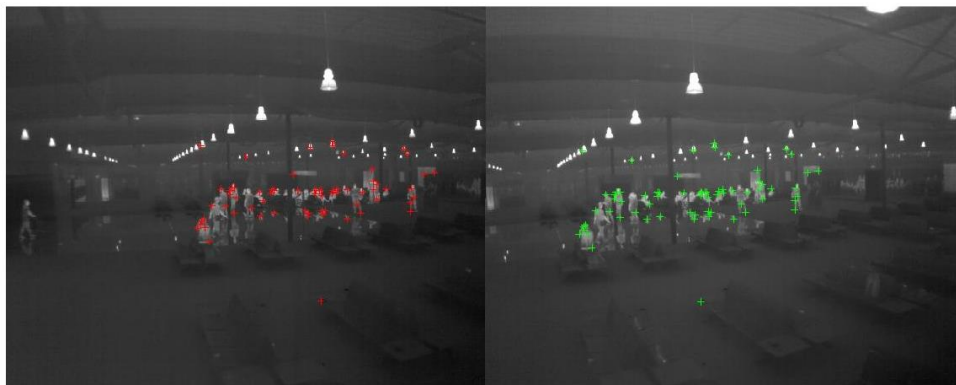
7.6.2 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mineigen



7.91. Διάγραμμα του αριθμού των σημείων που εξήχθησαν κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου *MinEigen* συναρτήσει της παραμέτρου *MinQuality*. Στα σημεία ενδιαφέροντος που εξήχθησαν εφαρμόστηκε και ο αλγόριθμος *RANSAC*, για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

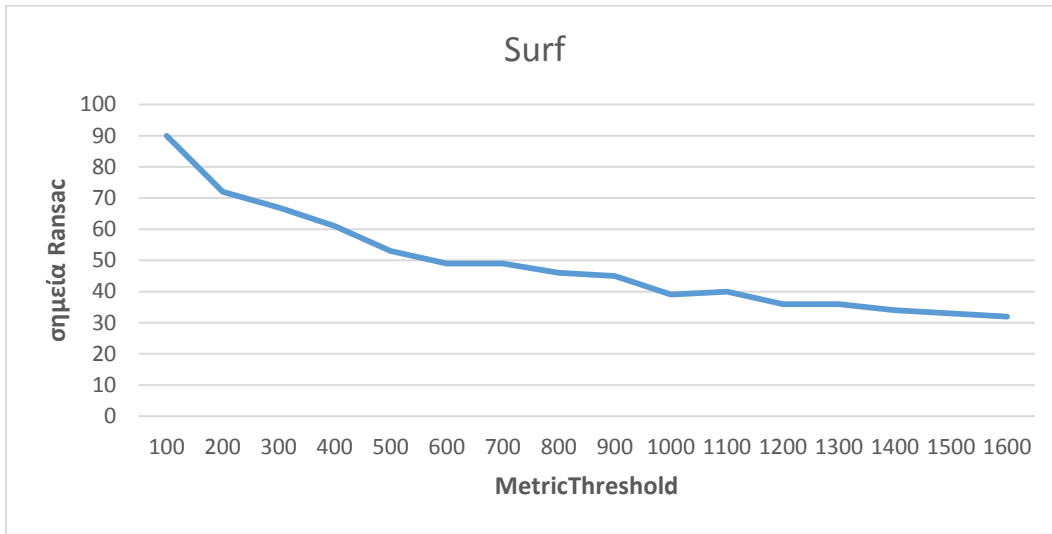
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής του συντελεστή *MinQuality*, που εξετάστηκε στην περίπτωση του τελεστή *MinEigen*, συνεπάγεται την μείωση του αριθμού των εξαγόμενων σημείων. Επιπλέον παρατηρείται ότι για τιμή *MinQuality* μεγαλύτερη από 0.61 ο αριθμός των σημείων που εξαγονται είναι μηδενικός.

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή *MinEigen* για τιμή $\text{minQuality} = 0.01$ παρουσιάζονται στην συνέχεια.



7.92. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή *MinEigen* στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

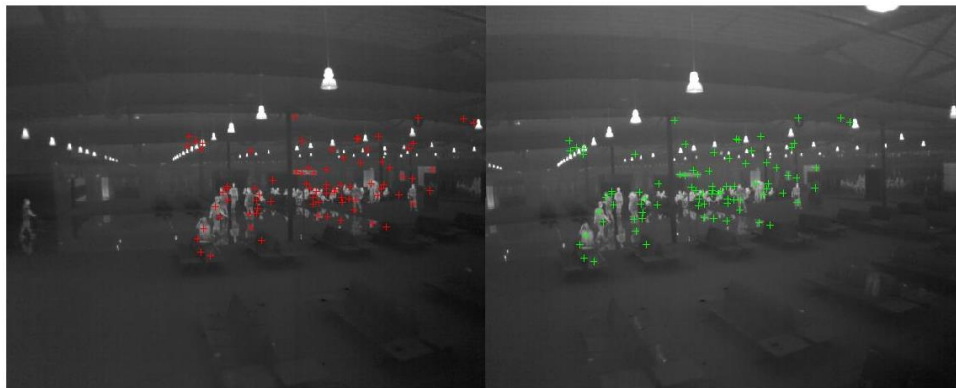
7.6.3 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Surf



7.93. Διάγραμμα του αριθμού των σημείων που εξήχθησαν κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Surf συναρτήσει της παραμέτρου MetricThreshold. Στα σημεία ενδιαφέροντος που εξήχθησαν εφαρμόστηκε και ο αλγόριθμος RANSAC, για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

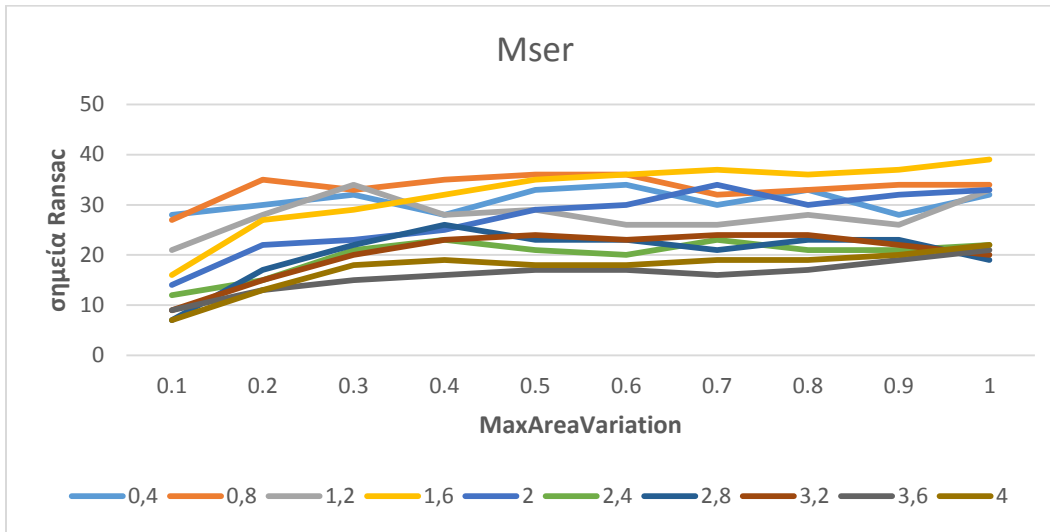
Και στην περίπτωση του αλγορίθμου Surf παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου MetricThreshold συντελεί στην μείωση του αριθμού των σημείων ενδιαφέροντος που εξάγονται, γεγονός που επιβεβαιώνεται και βιβλιογραφικά (Matlab documentation).

Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Surf για τιμή MetricThreshold = 100 παρουσιάζονται στην εικόνα 7.94.



7.94. Επιτολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Surf στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.6.4 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Mser



7.95. Διάγραμμα του αριθμού των σημείων που εξήχθησαν κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Mser συναρτήσει της παραμέτρου MaxAreaVariation για κάθε τιμή της παραμέτρου ThresholdDelta που εξετάστηκε. Στα σημεία ενδιαφέροντος που εξήχθησαν εφαρμόστηκε και ο αλγόριθμος RANSAC για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

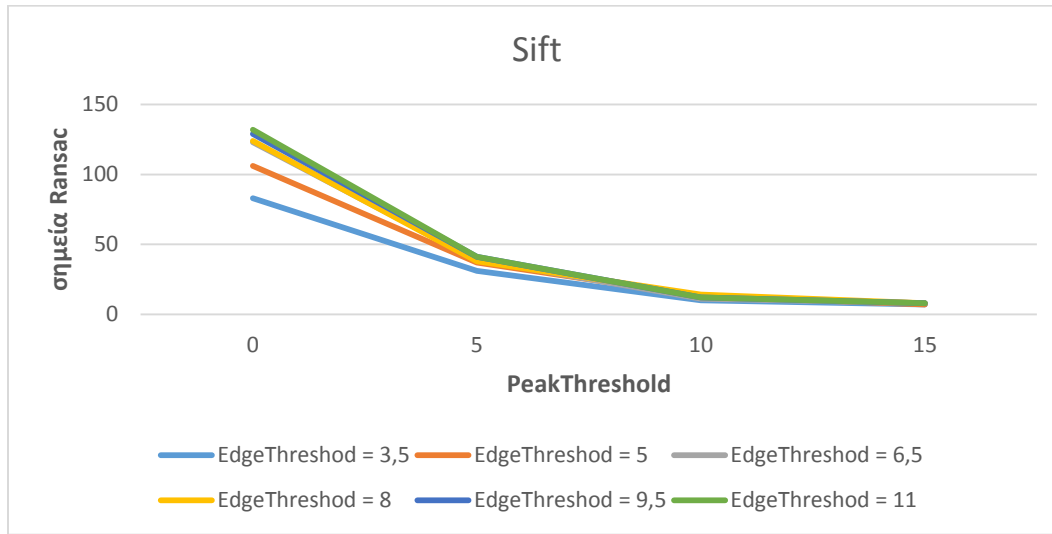
Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου MaxAreaVariation συντελεί στην μείωση του αριθμού των σημείων που εξάγονται. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η παράμετρος ThresholdDelta, όπου όπως φαίνεται από τις γραμμές του διαγράμματος τα λιγότερα σημεία εντοπίζονται για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Mser για τιμές MaxAreaVariation = 0.4 και ThresholdDelta = 0.4.



7.96. Επιπολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Mser στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και τη δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

7.6.5 Εξαγωγή σημείων με τον τελεστή Sift

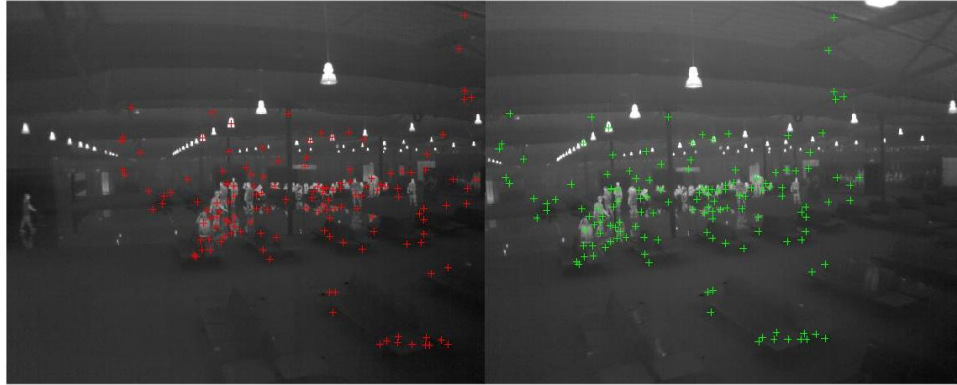


7.97. Διάγραμμα του αριθμού των σημείων που εξήχθησαν κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου Sift συναρτήσει της παραμέτρου PeakThreshold για κάθε τιμή της παραμέτρου EdgeThreshold που εξετάστηκε. Στα σημεία ενδιαφέροντος που εξήχθησαν εφαρμόστηκε και ο αλγόριθμος RANSAC, για την απομάκρυνση χονδροειδών σφαλμάτων.

Από το διάγραμμα που προέκυψε κατά την εφαρμογή του τελεστή Sift στο ζεύγος των εικόνων παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου PeakThreshold συντελεί στη μείωση των σημείων ενδιαφέροντος που εξάγονται. Αντιθέτως η αύξηση της τιμής της παραμετρου EdgeThreshold συντελεί στην εξαγωγή περισσότερων σημείων ενδιαφέροντος.

Όπως είχε αναφερθεί και παραπάνω (βλ. ενότητα 2.3.1), η παράμετρος (non) Edge-Threshold ευθύνεται για την απομάκρυνση σημείων με πολύ μικρή καμπυλότητα, συνεπώς αύξηση της τιμής αυτής επφέρει αύξηση των σημείων που εξάγονται.

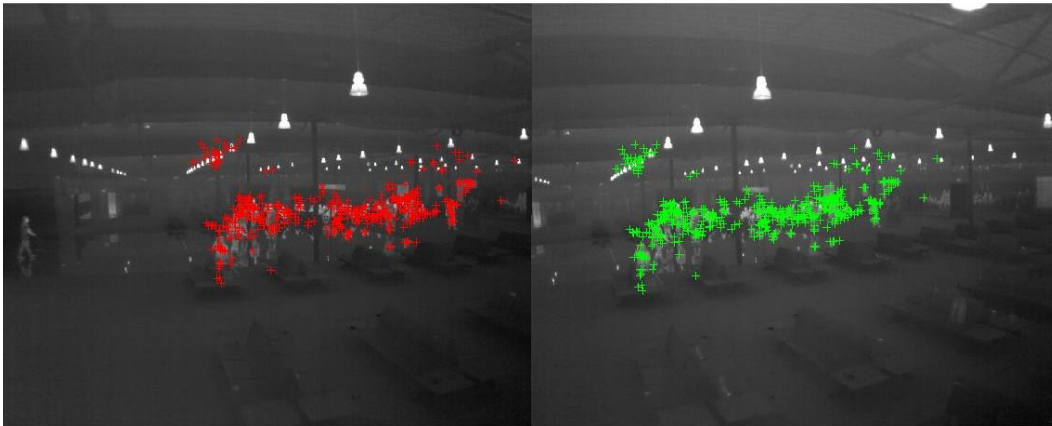
Οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Sift για τιμές Peak-Threshold = 0 και EdgeThreshold = 11 παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



7.98. Επιτολικές εικόνες του επίγειου στερεοζεύγους εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή sift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

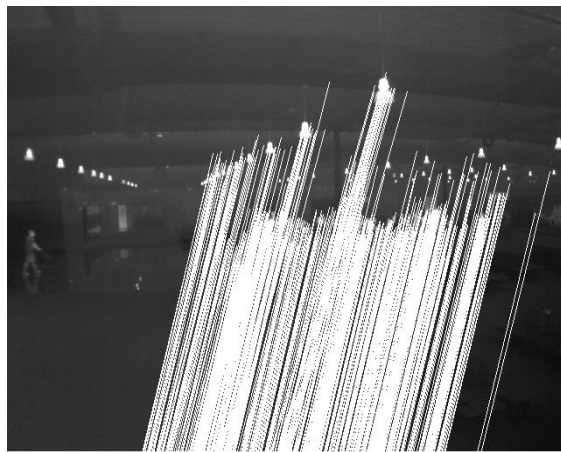
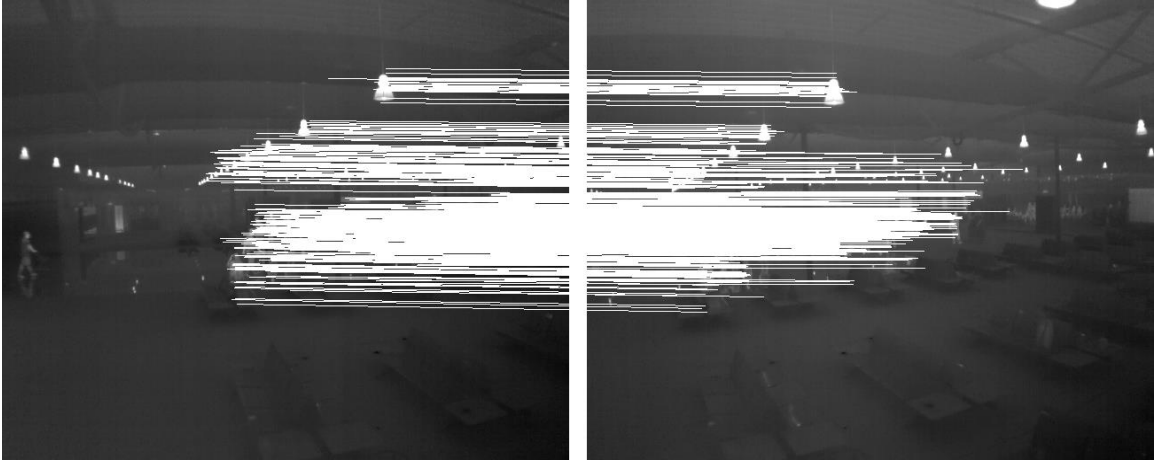
7.6.6 Εξαγωγή ομόλογων σημείων με τον τελεστή Asift

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ομολογίες που προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift.



7.99. Επιτολικές εικόνες του στερεοζεύγους των θερμικών εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες σημείων από την εφαρμογή του τελεστή Asift στην αριστερή (κόκκινο χρώμα) και την δεξιά (πράσινο χρώμα) εικόνα.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη των εικόνων.

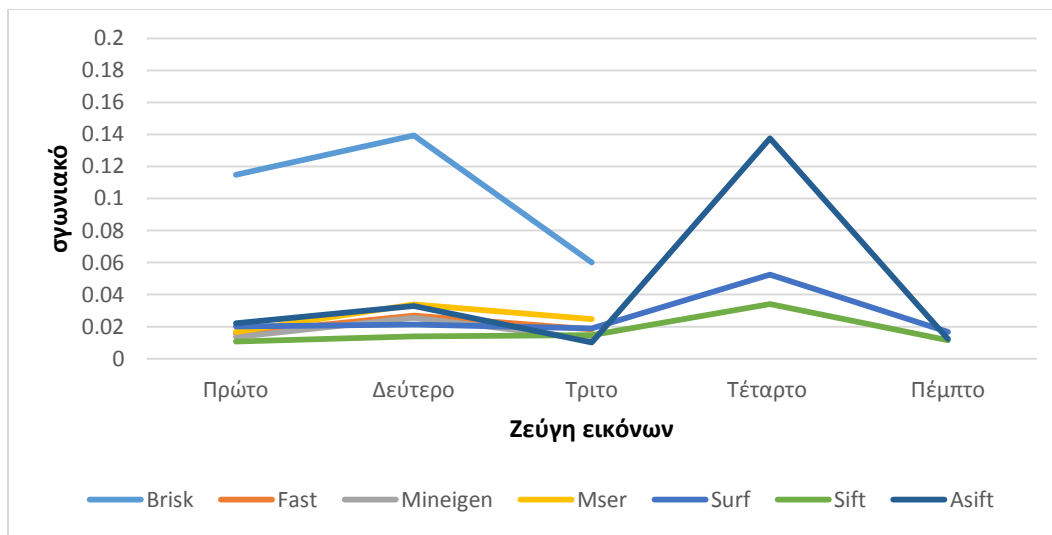


7.100. Επιπολικές εικόνες του στερεοζεύγους των θερμικών εικόνων, όπου παρουσιάζονται οι τελικές ομολογίες των σημείων όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του τελεστή Asift, τόσο σε κατακόρυφη (πρώτη εικόνα) όσο και σε οριζόντια (δεύτερη εικόνα) διάταξη.

8 Συμπεράσματα και Προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε προσπάθεια να εξεταστούν εικόνες κατά το δυνατόν διαφορετικές (από αέρα, επίγειες, θερμικές λήψεις), αλλά και με διαφορετική γεωμετρία (διαφορές κλίμακας, μεγάλες γωνίες σύγκλισης των αξόνων). Από την εφαρμογή των τελεστών στα διάφορα ζεύγη εικόνων που εξετάστηκαν εξήχθησαν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία παρατίθενται και αναλύονται παρακάτω. Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα, στο οποίο παρουσιάζονται οι καλύτερες τιμές συνολικού γωνιακού σφάλματος για κάθε τελεστή που χρησιμοποιήθηκε ανά ζεύγος εικόνων (εικόνα 7.101).



7.101. Διάγραμμα με τις καλύτερες τιμές του συνολικού γωνιακού σφάλματος (°) για κάθε τελεστή που χρησιμοποιήθηκε ανά ζεύγος εικόνων.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει εδώ από το ολικό γωνιακό σφάλμα των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού, που είναι δηλαδή ο συνδυασμός των τυχαίων σφαλμάτων (σφάλματα στις θέσεις των ομόλογων σημείων) με την γεωμετρία της συνόρθωσης. Με τον όρο γεωμετρία γίνεται λόγος τόσο για το πλήθος όσο και για την κατανομή των σημείων που εξάγονται. Αυτό το μέτρο (σ_{γωνιακό}) κρίνεται ικανοποιητικό ως μέσον αξιολόγησης αφού αναφέρεται στην συνολική επίδοση κάθε τελεστή.

Ο τελεστής Sift εμφανίζεται πιο εύστοχος στην εύρεση σημείων ενδιαφέροντος, καθώς το ποσοστό των ομολογιών του ως προς τα εξαχθέντα σημεία βρίσκεται περίπου στο 30% έναντι χονδρικά του 5% των άλλων. Η ευστοχία του εν λόγω τελεστή εντοπίζεται, βέβαια, και με την σύγκριση των ολικών γωνιακών σφαλμάτων που υπολογίστηκαν, δεδομένου ότι σε όλες, πλην μιας, των περιπτώσεων ο Sift εμφάνισε τα μικρότερα ολικά σφάλματα (0.01-0.03°). Η επίδοσή του ήταν ανώτερη και στην περίπτωση των θερμικών

εικόνων, όπου η γεωμετρία (αριθμός και κατανομή) των σημείων του υπερτερεί εμφανώς των άλλων.

Παράλληλα, ο Sift έδωσε πολύ συνεκτικά αποτελέσματα, σε αντίθεση πχ. με τον Asift, ο οποίος σε μια περίπτωση (εκείνη του ζεύγους αερολήψεων με μεγάλη σύγκλιση) επέδειξε σημαντικό σφάλμα, ενώ και στις θερμικές εικόνες απέδωσε υποδεέστερη κατανομή σημείων. Κατά τα λοιπά, ο τελεστής Asift ήταν αρκετά κοντά σε απόδοση με τον Sift. Γενικά, λοιπόν, δεν παρουσίασε εν προκειμένω τα αποτελέσματα που θα ανέμενε κανείς λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού ομολογιών που προκύπτουν κατά την εφαρμογή του. Υποθέτει κανείς ότι ο εν λόγω τελεστής θα υπερτερεί σαφώς του Sift σε περιπτώσεις όπου οι διαφορές μεταξύ των εικόνων είναι κατά βάση αφινικές (βλ. πχ. Boussias et al., 2016).

Ο τελεστής Surf έχει σταθερή απόδοση, παρόμοια αλλά συστηματικά ελαφρώς υποδεέστερη εκείνης του Sift. Αυτοί οι τρεις τελεστές ήταν οι μόνοι που έδωσαν έγκυρες και επαρκείς ομολογίες σημείων σε όλα τα ζεύγη εικόνων.

Από τους υπόλοιπους τελεστές, οι Fast, Mineigen και Mser έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ($\sigma_{\text{γωνιακό}} < 0.04^\circ$) στα πρώτα ζεύγη. Απέτυχαν όμως πλήρως στις “δύσκολες” γεωμετρίες. Η επίδοση του τελεστή Brisk ήταν με σημαντική διαφορά η υποδεέστερη.

Από όσους τελεστές χρησιμοποιήθηκαν μόνο στους Sift, Mineigen, Surf και Brisk ήταν εμφανής η άμεση συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν. Οι υπόλοιποι τελεστές απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον Mser, από τα διαγράμματα που προέκυψαν δεν κατέστη σαφής η σύνδεση των αποτελεσμάτων με τις τιμές των παραμέτρων. Ο Mser χρησιμοποιείται, όπως έχει ήδη αναφερθεί (ενότητα 2.2.6) για την ανίχνευση “άμορφων” περιοχών ή “κηλίδων”, οι οποίες διατηρούν κάποια χαρακτηριστικά σταθερά. Η λογική αυτή λοιπόν ίσως έχει καλύτερη εφαρμογή πχ. σε μελέτες χρήσεων γης (περιοχές με σταθερές ραδιομετρικές ιδιότητες).

Ακόμα, οι αλγόριθμοι Mineigen, Fast και Brisk έδωσαν γενικά πολύ λίγες ομολογίες σημείων, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστούν αδύνατον τον προσδιορισμό του σχετικού προσανατολισμού. Ειδικά σε περιπτώσεις εικόνων με μεγάλες κλίσεις, όπως προαναφέρθηκε, είναι το 4^ο ζεύγος εικόνων που εξετάστηκε, οι περισσότεροι τελεστές εξήγαγαν ελάχιστα έως καθόλου σημεία.

Στο ζεύγος των επίγειων εικόνων όλοι οι αλγόριθμοι εκτός του Sift έδωσαν γενικά πολύ λίγες ομολογίες σημείων, με αποτέλεσμα να καθίσταται κατά περίπτωση αδύνατος ο προσδιορισμός του σχετικού προσανατολισμού. Γενικά, δηλαδή, η απόδοση των τελεστών σε αυτό το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων δεν ήταν η αναμενόμενη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις μεγάλες παραμορφώσεις που συναντώνται γενικά στις επίγειες εικόνες λόγω των μικρών αποστάσεων λήψης.

Στο ζεύγος των θερμικών εικόνων, από την άλλη μεριά, εφαρμόστηκαν και εξετάστηκαν οι τελεστές Fast, Surf, Mineigen, Mser Sift και Asift. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν ικανοποιητικά, καθώς παρουσίαζαν (για λόγους που έχει επιχειρηθεί να εξηγηθούν) μεγάλες διαφορές στις τιμές των αποτελεσμάτων του σχετικού προσανατολισμού και μεγάλες τιμές στα συνολικά γωνιακά σφάλματα. Είναι σαφές ότι τέτοιου τύπου εικόνες απαιτούν ειδικό χειρισμό.

8.2 Προτάσεις

Η μελέτη της βιβλιογραφίας έδειξε ότι υπάρχουν και άλλες δυνατότητες επεξεργασίας και εφαρμογές που θα μπορούσαν να διερευνηθούν με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και αξιολόγηση των ποικίλων σημειακών τελεστών, οι οποίες θα ήταν σκόπιμο να εξεταστούν στο μέλλον. Εδώ επιδιώχθηκε να επιλεγούν κατά το δυνατόν ζεύγη εικόνων διαφορετικών χαρακτηριστικών. Ωστόσο, ορισμένοι τελεστές έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένους σκοπούς, πρέπει άρα να ερευνηθεί συστηματικότερα για ποιού τύπου εικόνες είναι κατάλληλος ο κάθε ένας.

Παράλληλα, η κατανομή των σημείων που εξάγονται σε κάθε εικόνα έχει ιδιαίτερη σημασία. Συνεπώς οι τελεστές θα μπορούσαν να αξιολογηθούν παράλληλα και με κάποιο μέτρο που θα εκφράζει αυτή την επίδοσή τους (πχ. με χωρισμό του επικαλυπτόμενου τμήματος σε κάρναβο και αξιολόγηση της κατανομής των σημείων μέσω ιστογραμμάτων).

Σε αυτό το πλαίσιο θα μπορούσε να εξεταστεί και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για κάθε τελεστή. Αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές κάνουν λόγο για την προσπάθεια δημιουργίας βελτιωμένων εκδόσεων των ίδιων τελεστών με στόχο τη μείωση της υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται (Bay et al., 2006).

Η χρήση θερμικών εικόνων στην Υπολογιστική Όραση προσφέρει, όπως προαναφέρθηκε, σημαντικά πλεονεκτήματα κυρίως λόγω της δυνατότητας αξιοποίησης τους σε κάθε χρονική στιγμή. Οι πρώτες δυσκολίες που εντοπίζονται στην χρήση των εικόνων αυτών είναι η χαμηλή ανάλυση και ο υψηλός θόρυβος που εμφανίζουν. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές προεπεξεργασίας των εικόνων, για την άμβλυση του θορύβου και την παρέμβαση στο ιστόγραμμα τους (Lin, 2001). Παρόμοιες τεχνικές συμβάλλουν στην μείωση των διαφορών μεταξύ εικόνων του υπέρυθρου και του ορατού τμήματος του φωτός, ώστε να είναι πιο εύκολο να μπορούν να επεκταθούν και στις πρώτες οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τα οπτικά κανάλια.

Βιβλιογραφία

Αδάμ Κ., 2011. *Γεωμετρία του Στερεοζεύγους από Βαθμονομημένες και από Μη Βαθμονομημένες Μηχανές*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Alahi A., Ortiz R., Vandergheynst P., 2012. Freak: fast retina keypoint. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '12)*, pp. 510-517.

Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L., 2006. Surf: speeded up robust features. *European Conference on Computer Vision (ECCV 2006)*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol. 3951, pp. 404-417.

Boussias-Alexakis E., Tsironis V., Petsa E., Karras G., 2016. Automatic adjustment of wide-base GOOGLE STREET VIEW panoramas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLI-B1, pp. 639-645.

Dalal N., Triggs B., 2005. Histograms of oriented gradients for human detection. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, vol. 1, pp. 886-893.

Donoser M., Bischof H., 2006. Efficient maximally stable extremal region (MSER) tracking. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '06)*, vol. 1, pp. 553-560.

Fraundorfer F., Scaramuzza D., 2011. Visual Odometry (Part II: Matching, Robustness, Optimization, and Applications). *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2):78-90.

Καλησπεράκης Η., 2010. *Η Επιπολική Γεωμετρία στον Προβολικό και τον Ευκλείδειο Χώρο*. Διδακτορική διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Κάρκαλου Ε., 2015. *Προγραμματισμός και Αξιολόγηση Μεθόδων Υποσύνολης Συνταύτισης Εικόνων (Semi-Global Matching)*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Lee J.J., 2008. *Computer Vision Using Infrared Cameras*. Technical Report, School of Electrical & Computer Engineering, Georgia Tech.

Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y., 2011. Brisk: binary robust invariant scalable keypoints. *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV '11)*, pp. 2548-2555.

Lin S.-S., 2001. *Review: Extending Visible Band Computer Vision Techniques to Infrared Band Images*. Technical Report no. MS-CIS-01-04, Department of Computer & Information Science, University of Pennsylvania.

Lowe D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91-110.

Mair E., Hager G.D., Burschka D., Suppa M., Hirzinger G., 2010. Adaptive and generic

corner detection based on the accelerated segment test. *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV '10)*, pp. 183-196.

Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T., 2002. Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions. *Proc. British Machine Vision Conference*, pp. 384-393.

Πέτσα Ε., 2003. *Θεμελιώδεις Έννοιες της Φωτογραμμετρίας*. Σπουδαστικές Σημειώσεις, Τμήμα Τοπογραφίας, Τ.Ε.Ι. Αθήνας.

Rosten E., Drummond T., 2005. Fusing points and lines for high performance tracking. *10th International Conference on Computer Vision (ICCV 2005)*, Beijing, pp. 1508-1515.

Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G., 2011. ORB: an efficient alternative to Sift or Surf. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '11)*, pp. 2564-2571.

Shi J., Tomasi C., 1994. Good features to track. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94)*, pp. 593-600.

Yu G., Morel J.-M., 2011. *Asift*: an algorithm for fully affine invariant comparison. *Image Processing on Line*, 1 (<http://dx.doi.org/10.5201/ipol.2011.my-asift>).

Viola P., Jones M., 2001. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '01)*, pp. I-511-518.

Φλωρίδη Β., 2013. *Προγραμματισμός, Εφαρμογή και Αξιολόγηση Μεθόδων Αυτόματης Πυκνής Συνταύτισης Εικόνας σε Στερεοζεύγη*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.