

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση Μεθόδων Αντιστοίχισης Δορυφορικών
Εικόνων και Βίντεο με Βάση Ελαστικές
Παραμορφώσεις και Τοπικούς Περιγραφείς

Χρήστος Πλατιάς
Αθήνα, Μάρτιος 2016





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY

DIPLOMA THESIS

Evaluating deformable and descriptor-based
techniques for the registration of various satellite
imaging and video data

Christos Platias
Athens, March 2016

Αξιολόγηση Μεθόδων Αντιστοίχισης Δορυφορικών Εικόνων και Βίντεο με Βάση Ελαστικές Παραμορφώσεις και Τοπικούς Περιγραφείς

Χρήστος Πλατιάς
Αθήνα, Μάρτιος 2016



Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28η Μαρτίου 2016.

(Υπογραφή)

.....
Κ. Καραντζαλος
Επ. Καθ. Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)

(Υπογραφή)

.....
Χ. Ιωαννίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Δ. Αργιαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Χ. Πλατιάς
Διπλωματούχος Αγρονόμος και
Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.
(©2016 – All rights reserved)

Copyright ©–All rights reserved Χ. Πλατιάς, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

Αφιερώνεται στους γονείς και την αδερφή μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πλήθος και η διαθεσιμότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων αυξάνεται συνεχώς με παράλληλη βελτίωση της χωρικής τους ανάλυσης. Πλέον, στα προϊόντα των δορυφόρων ήρθε να προστεθεί και το βίντεο υψηλής ευκρίνειας, που επιτρέπει την παρακολούθηση περιοχών μέσα από ακολουθίες εικόνων, φέρνοντας μαζί του ένα νέο σύνολο εφαρμογών που πριν δεν ήταν εφικτό. Ωστόσο, για να είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση των δεδομένων αυτών, απαιτείται η αντιστοίχιση τους με κάποιο χάρτη, ορθοφωτογραφία ή εικόνα αναφοράς. Προς την κατεύθυνση αυτή, αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η εφαρμογή και σύγκριση δύο διαφορετικών μεθόδων για την αυτοματοποιημένη αντιστοίχιση δορυφορικών δεδομένων. Η πρώτη μέθοδος (MR: MRF-based Registration) βασίζεται σε τοπικούς μετασχηματισμούς με δυνατότητα τοπικής παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα MRF (Markov random field) και γραμμικό προγραμματισμό για την ελαχιστοποίηση τους. Η δεύτερη μέθοδος (DR: Descriptor-based Registration) στηρίζεται στη χρήση αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τοπικούς περιγραφείς και με βάση τις αντιστοιχίες υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων ενός καθολικού μετασχηματισμού που εφαρμόζεται σε όλη την εικόνα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν χωρική ανάλυση από 0.5 έως 250 μέτρα και πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνουν βίντεο της Skybox Imaging και εικόνες από τους δορυφόρους Quicbird, Worldview-2, Landsat-8, Sentinel-1, Sentinel-2, Modis, Proba chris-v, δεδομένα από την Planet Labs και δορυφορικές εικόνες από την Google. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται ποσοτικά με τη χρήση επιλεγμένων σημείων ελέγχου εδάφους και ποιοτικά με εικόνες σκακιέρες, που δημιουργούνται από την εναλλαγή της μετασχηματισμένης εικόνας και της εικόνας αναφοράς. Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου, μόνο η πρώτη μέθοδος ήταν ικανή να αντιστοιχήσει όλα τα δεδομένα, με τη δεύτερη να παρουσιάζει αδυναμία στα βίντεο και τις εικόνες χαμηλής χωρικής ανάλυσης.

Λέξεις-κλειδιά: Αντιστοίχιση, μη συμπαγής, άκαμπτος, μετασχηματισμός, δορυφορικές εικόνες, δορυφορικά βίντεο

ABSTRACT

The amount and the availability of the remote sensed data is on the rise, with a parallel improvement on their spatial resolution. Moreover, nowadays the high resolution satellite video became available, enabling the continuous monitoring of areas, making feasible numerous new applications that weren't available before. However, in order to fully exploit these data, their registration to a common reference system is mandatory. To this end, in this thesis two different methods were implemented and compared concerning the automated registration of different satellite data. The first method (MR: MRF-based Registration) is based on local deformable transformations, using MRF's (Markov random fields) and linear programming for the minimization of the energy formulation produced by them. The second one (DR: Descriptor-based Registration) is a descriptor based method, that calculates a transformation matrix, after extracting point matches, and applies the transformation globally. The spatial resolution of the data used ranges from 1 meter to 250 meters and more specifically includes video sequences from Skybox Imaging, and satellite images from Quicbird, Worldview-2, Landsat-8, Sentinel-1, Sentinel-2, Modis and Proba chris-v satellites, as well as data from Planet Labs and Google. The results were evaluated qualitative, with hand picked ground control points and qualitative, with checker board visualisations of the reference and the transformed image. Finally, as it concerns the results of each method, only the first one was able to successfully register all the data, while the second one proved to be weak for the registration of the video sequences and the low spatial resolution data.

Keywords: Registration, non-rigid, rigid, transformation, satellite images, satellite video sequences

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο για το θέμα της διπλωματικής, το οποίο μου έδωσε την ευκαιρία να μάθω και να εξελιχτώ, καθώς επίσης και για τη στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της. Στη συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω τη Μαρία Βακαλοπούλου για την υπομονή της και την αμέριστη βοήθεια της, που ήταν καθοριστική. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Χρήστο Ιωσιφίδη για τη μεταλαμπάδευση των προγραμματιστικών του γνώσεων, αλλά και του ιδιαίτερου τρόπου σκέψης του, με τον οποίο ωστόσο έρχεται σε αντίθεση αυτή η ευχαριστία. Τέλος, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

*Χρήστος Πλατιάς
Αθήνα, Μάρτιος 2016*

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vii
Ευχαριστίες	ix
1 Πρόλογος	1
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	3
2.1 Χρήση των μεθόδων αντιστοίχισης σε άλλες εφαρμογές	3
2.2 Χρήση μεθόδων αυτόματης αντιστοίχισης σε δορυφορικά δεδομένα	4
3 Μεθοδολογία	9
3.1 Εισαγωγικές έννοιες.	9
3.1.1 Κατηγοριοποίηση μεθόδων αντιστοίχισης	9
3.1.2 Γεωμετρικοί μετασχηματισμοί.	10
3.1.3 Μέθοδοι βασισμένες στην ραδιομετρία των εικόνων	13
3.2 Μέθοδος βασισμένη σε τοπικές παραμορφώσεις και MRFs	14
3.3 Μέθοδος αντιστοίχισης με βάση περιγραφείς εικόνων	19
4 Αποτελέσματα και αξιολόγηση	25
4.1 Δεδομένα	25
4.1.1 Δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης	25
4.1.2 Δεδομένα υψηλής ανάλυσης.	26
4.1.3 Δεδομένα μέσης ανάλυσης.	27
4.2 Αποτελέσματα αξιολόγησης	27
5 Συμπεράσματα	53
Βιβλιογραφία	57
A Παράρτημα εικόνων και πινάκων	61
Κατάλογος εικόνων	63
Κατάλογος πινάκων	67
B Παράρτημα κώδικα	69

1

Πρόλογος

Η επιστήμη της γεωπληροφορικής, της τηλεπισκόπησης και της φωτογραμμετρίας έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία. Η εξέλιξη της τεχνολογίας τείνει να κάνει την παρακολούθηση της γης από συγκεκριμένης περιοδικότητας, καθημερινή, χάρις στην πληθώρα των νέων δορυφόρων αλλά και στην εξάπλωση της τεχνολογίας των drones. Παράλληλα, η χωρική ανάλυση των δορυφόρων βελτιώθηκε, φτάνοντας ακόμα και το μισό μέτρο, όπως οι Quickbird (0.6m) και Worldview-2 (0.5m). Επιπλέον, στις μέχρι τώρα διαδεδομένες μορφές δορυφορικών προϊόντων εικόνας προστέθηκε και το βίντεο από δορυφόρους που παρατηρούν τη γη, αυξάνοντας το εύρος εφαρμογών της τηλεπισκόπησης. Οι εφαρμογές αυτές αφορούν την παρακολούθηση περιβαλλοντικών μεταβολών, τη γεωργία, τη χαρτογράφηση, την εκτίμηση της κίνησης, την ανάλυση των χρήσεων γης και άλλα.

Πιο συγκεκριμένα, υψηλής ανάλυσης αλληλουχίες βίντεο ([Murthy et al. 2014](#), [d Angelo et al. 2014](#), [Kopsiaftis and Karantzos 2015](#)) γίνονται διαθέσιμες, εμπλουτίζοντας τα υπάρχοντα γεωχωρικά προϊόντα. Η Skybox Imaging, η ISS Video και η Urthecast ήδη παρέχουν δορυφορικά βίντεο υψηλής ευκρίνειας με ανάλυση έως 1 μέτρο και 30 καρέ το δευτερόλεπτο. Ωστόσο, εξαιτίας της συνεχούς κίνησης της πλατφόρμας του δορυφόρου, τα αποκτηθέντα καρέ δεν έχουν αντιστοιχία μεταξύ τους. Ακόμα, προκειμένου να συνδυαστούν και να ενοποιηθούν πληροφορίες από γεωχωρικά δεδομένα και εικόνες, είτε για ανάλυση, είτε για οποιαδήποτε εφαρμογή, απαιτείται η αντιστοιχία τους σε ένα τοπικό/εθνικό σύστημα γεωαναφοράς. Η αυτοματοποιημένη αντιστοιχία των καρέ του βίντεο μεταξύ τους και η αντιστοιχία τους σε μια εικόνα/χάρτη αναφοράς αποτελεί ακόμα ανοιχτό ζήτημα.

Το πρόβλημα της αντιστοιχίας έχει μελετηθεί έντονα και έχουν προταθεί πολυάριθμες προσεγγίσεις ([Zitova and Flusser 2003](#), [Sotiras et al. 2013](#)). Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν σε δυο μεγάλες κατηγορίες με βάση το μοντέλο που χρησιμοποιούν, τις άκαμπτες και εύκαμπτες. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από μεθόδους που στηρίζονται στην αυτοματοποιημένη ανίχνευση, περιγραφή και αντιστοιχία τοπικών περιγραφέων στο ζεύγος εικόνων και έπειτα υπολογίζουν έναν καθολικό μετασχηματισμό για την αντιστοιχία τους. Ένας μεγάλος αριθμός από τέτοιους αλγορίθμους, όπως οι SIFT ([Lowe 2004](#)), ASIFT ([Morel and Yu 2009](#)), SURF ([Bay et al. 2008](#)), DAISY ([Tola et al. 2010](#)), FREAK ([Alahi et al. 2012](#)) κ.α. έχουν χρησιμοποιηθεί για πληθώρα εφαρμογών όπως η αναγνώριση προσώπου, η ταυτοποίηση αντικειμένων, η ανίχνευση κίνησης και η επεξεργασία

δορυφορικών δεδομένων (Price 2015). Εκτενής χρήση και σύγκριση τέτοιων αλγορίθμων έχει γίνει για την αυτοματοποιημένη αντιστοίχιση υπερφασματικών δεδομένων, όπου σε συνδυασμό με κατάλληλη μεθοδολογία, το αποτέλεσμα είναι επιτυχές (Vakalopoulou and Karantzalos 2014). Επιπλέον, οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν χρησιμοποιηθεί και σε άλλους τομείς, όπως η ιατρική, όπου με τη χρήση του αλγορίθμου SURF (Bay et al. 2008) γίνεται αντιστοίχιση ιατρικών εικόνων (Lukashevich et al. 2011).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μη γραμμικές μεθόδους αντιστοίχισης και τοπικούς μετασχηματισμούς με δυνατότητα τοπικών παραμορφώσεων. Μια μετρική ομοιότητας χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η πιθανότητα του κάθε εικονοστοιχείου της πρώτης εικόνας να ανήκει σε μια γειτονιά εικονοστοιχείων της δεύτερης, βρίσκοντας την καλύτερη μετατόπιση που αποκαθιστά τη γεωμετρία. Αυτού του είδους οι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές “υπολογιστικής όρασης” (computer vision) (Αληφραγκής,Μ. 2010) και σε ιατρικές εικόνες (Sotiras et al. 2013). Η σημασία τους για την ανάλυση ιατρικών εικόνων είναι μεγάλη και ήδη χρησιμοποιούνται πάνω από μια δεκαετία για το σκοπό αυτό (Crum et al. 2004, Δούμα,Χ. 2015, Μαρκάκη,Β. 2012). Πρόσφατα μάλιστα μια τέτοια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την αντιστοίχιση πολυφασματικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης από τους δορυφόρους Worldview-2, Pleiades και TerraSAR-X αλλά και δεδομένων που είχαν ληφθεί με χρήση drones και κάλυπταν μεγάλες περιοχές, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές ακρίβειες (Karantzalos et al. 2014).

Προς την κατεύθυνση αυτή, βασική επιδίωξη της διπλωματικής εργασίας αυτής ήταν η σύγκριση των δυο διαφορετικών μεθόδων για την αντιστοίχιση ποικίλων δορυφορικών εικόνων, αλλά και ακολουθιών βίντεο (Πίνακας 4.1). Για τη μέθοδο αντιστοίχισης με βάση τοπικούς περιγραφείς (DR: Descriptor-based Registration) χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι STAR (Agrawal et al. 2008) και FREAK (Alahi et al. 2012). Οι αντιστοιχίες που προέκυπταν χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού ομοιότητας που εφαρμόστηκε για την αντιστοίχιση του ζεύγους εικόνων. Για τη μέθοδο της δεύτερης κατηγορίας (MR: MRF-based Registration) χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο βασισμένο σε MRFs, με βάση το οποίο διατυπώθηκε μια εξίσωση ενέργειας, η ελαχιστοποίηση της οποίας έγινε με γραμμικό προγραμματισμό. Παράλληλα με τη χρήση μετρικών ομοιότητας υπολογιζόταν η μετατόπιση του κάθε εικονοστοιχείου. Οι μέθοδοι αξιολογήθηκαν ποσοτικά και ποιοτικά χρησιμοποιώντας επιλεγμένα σημεία ελέγχου (GCPs).

2

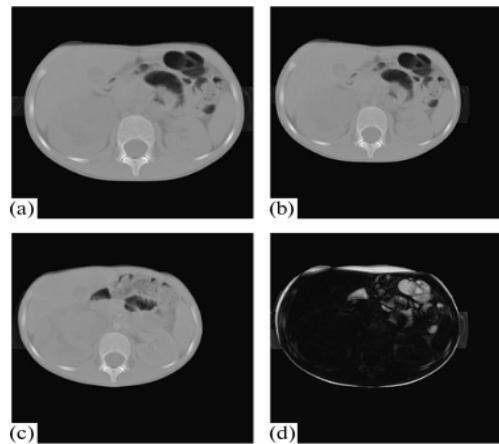
Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια καταγραφή της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Η βιβλιογραφία που παρατίθεται αφορά τη χρήση των μεθόδων αντιστοίχισης τόσο για γενικούς σκοπούς, όσο και για την αντιστοίχιση δορυφορικών δεδομένων.

2.1. Χρήση των μεθόδων αντιστοίχισης σε άλλες εφαρμογές

Η αντιστοίχιση παίζει σημαντικό ρόλο στην επίλυση προβλημάτων στην Όραση Υπολογιστών και σε εφαρμογές σε τομείς όπως η γεωπληροφορική, η ρομποτική και στην ιατρική για τη διάγνωση μεταβολών σε ασθενείς. Μια τέτοια εφαρμογή αντιστοίχισης σε ιατρικά δεδομένα με τη χρήση του αλγορίθμου SURF (Bay *et al.* 2008) γίνεται στο άρθρο "Medical Image Registration Based on SURF Detector" των P. V. Lukashevich, B. A. Zalesky, και S. V. Ablameyko (Lukashevich *et al.* 2011). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος για την αντιστοίχιση εικόνων αξονικών τομογράφων που άνηκαν στον ίδιο ασθενή και λήφθηκαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ακριβή διάγνωση, καθώς επιτρέπει την αναγνώριση νέων σχηματισμών και παρακολούθηση μικρών αλλαγών στον ιστό του ασθενή. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας του προβλήματος και της παρεμβολής διάφορων οργάνων και ρούχων των ασθενών, ήταν συχνή η δημιουργία παραμορφώσεων με αποτέλεσμα να μην ήταν επαρκής μια άκαμπτη αντιστοίχιση, όπως αυτή. Για να το αντιμετωπίσουν, αντιστοίχισαν μόνο το σημείο ενδιαφέροντος και όχι όλη την εικόνα, εφαρμόζοντας παράλληλα μορφολογικό άνοιγμα και κλείσιμο στην εικόνα για να διαχωρίσουν τα διακριτά στοιχεία. Τέλος, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SURF (Bay *et al.* 2008) και έναν προοπτικό μετασχηματισμό επιτεύχθηκε η αντιστοίχιση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.1.

Όμοιες εφαρμογές στην ιατρική υπάρχουν και για τη μέθοδο των παραμορφώσιμων μετασχηματισμών και μάλιστα η χρήση τους στον τομέα αυτόν είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη και σημαντική. Στο άρθρο "Non-rigid image registration: theory and practice" του βρετανικού περιοδικού ραδιολογίας από τους W. R. Crum, T. Hartkens και D. L. G. Hill, παρουσιάζονται οι μέχρι τότε διαθέσιμες τεχνικές χρήσης της ευέλικτης αντιστοίχισης καθώς επίσης και τα βασικά συστατικά της μεθόδου αυτής. Σε αντίθεση με την άκαμπτη μέθοδο, όπου οι εικόνες θεωρούνται ότι περιέχουν αντικείμενα που απλά

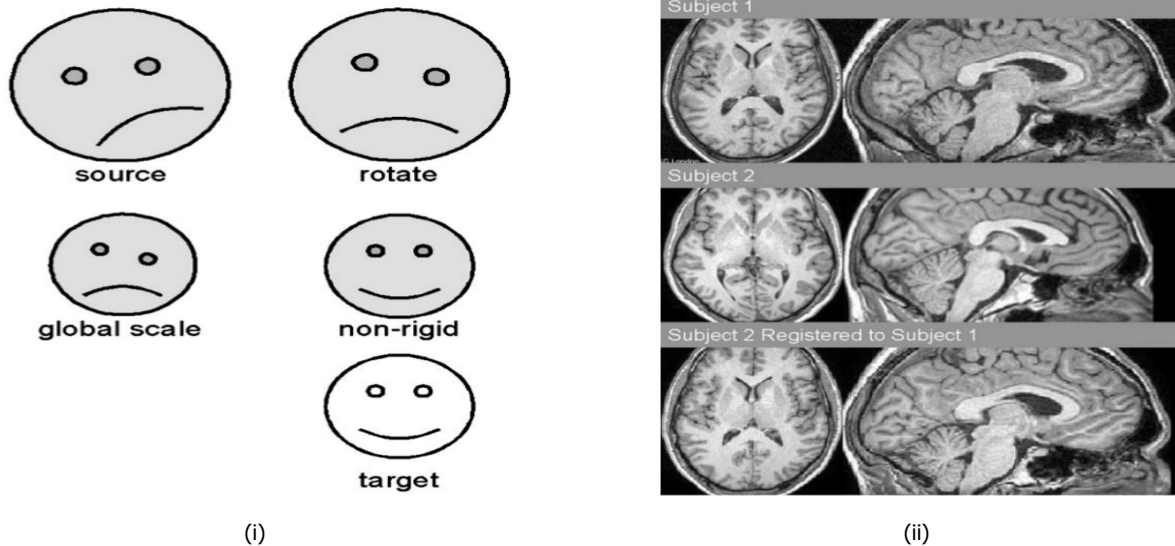


Σχήμα 2.1: Αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου (Lukashevich et al. 2011). Η αρχική εικόνα (a), η μετασχηματισμένη (b), η εικόνα αναφοράς (c) και οι μεταξύ τους διαφορές (d). Πηγή Lukashevich et al, 2011

πρέπει να περιστραφούν και να μετατοπιστούν για να επιτευχθούν οι αντιστοιχίες, στην ευέλικτη το αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με τοπικές παραμορφώσεις της εικόνας, σχήμα 2.2(i). Στη συνέχεια στο άρθρο αναλύονται οι βασικές αρχές της αντιστοίχισης εικόνων και της αντιστοίχιας σημείων καθώς επίσης τα βασικά συστατικά των αλγορίθμων τους, που είναι οι μετρικές ομοιότητας, σχήμα 2.3, που υπολογίζουν το πόσο ταιριάζουν οι δυο εικόνες, το μοντέλο μετασχηματισμού και τη διαδικασία βελτιστοποίησης, που βρίσκει τις καλύτερες παραμέτρους του μετασχηματισμού. Η εκτίμηση της επιτυχίας ή όχι της αντιστοίχισης, δεν μπορεί να γίνει αυτόματα, και πρέπει να πραγματοποιηθεί μετά τη διαδικασία χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά. Τέλος, στο άρθρο παρουσιάζονται εφαρμογές σε ιατρικά δεδομένα, σχήμα 2.2(ii).

2.2. Χρήση μεθόδων αυτόματης αντιστοίχισης σε δορυφορικά δεδομένα

Σημαντικές είναι και οι εφαρμογές της μεθόδου ανίχνευσης και περιγραφής σημείων κλειδιών σε δορυφορικά δεδομένα. Στο άρθρο "Automatic Descriptor-Based Co-Registration of Frame Hyperspectral Data", που δημοσιεύτηκε από τους Μαρία Βακαλοπούλου και Κωνσταντίνο Καράντζαλο (Vakalopoulou and Karantzalos 2014), στο περιοδικό "Remote Sensing", υλοποιείται μια αυτοματοποιημένη διαδικασία εύρεσης αντιστοιχιών στα φασματικά κανάλια πολυφασματικών δεδομένων για την αντιστοίχιση τους. Η ανάγκη για την αντιστοίχιση όλων των φασματικών καναλιών σε ένα κοινό σύστημα είναι μεγάλη, καθώς τα κανάλια αυτά λαμβάνονται από το δέκτη συνεχόμενα σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, με συνέπεια το παραγόμενο πολυφασματικό προϊόν να μην αντιστοιχίζεται κατά μήκος του άξονα z και οι μετατοπίσεις κάθε εικόνας να είναι σημαντικές εξαιτίας της κίνησης της πλατφόρμας λήψης των δεδομένων. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι SIFT (Lowe 2004), ASIFT (Morel and Yu 2009) και SURF (Bay et al. 2008) και αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία που περιλαμβάνει τρία βήματα, σχήμα 2.4(i). Το πρώτο βήμα ήταν η ταξινόμηση των φασματικών καναλιών σε κύριες φασματικές ομάδες, το δεύτερο η αντιστοίχιση των καναλιών σε κάθε ομάδα και το τρίτο και τελευταίο, η αντιστοίχιση μεταξύ των ομάδων. Η υλοποίηση της μεθόδου του άρθρου αυτού ήταν επιτυχής, καθώς κατάφερε να αντιστοιχίσει τα δεδομένα και με τις τρεις αλγορίθμους σε σύντομο χρονικό διάστημα, με μικρά σφάλματα που κυμαίνονται από 0.5 έως 3.5 εικονοστοιχεία. Ένα δείγμα των αποτελεσμάτων



Σχήμα 2.2: (i) Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης των αντιστοιχίσεων. Source είναι η προς αντιστοίχιση εικόνα, target η εικόνα αναφοράς στην οποία θα γίνει η αντιστοίχιση, rotate μια απλή στροφή της αρχικής εικόνας, global scale το αποτέλεσμα μιας μεθόδου με καθολικό μετασχηματισμό και non-rigid η ευέλικτη μέθοδος με δυνατότητες παραμόρφωσης.

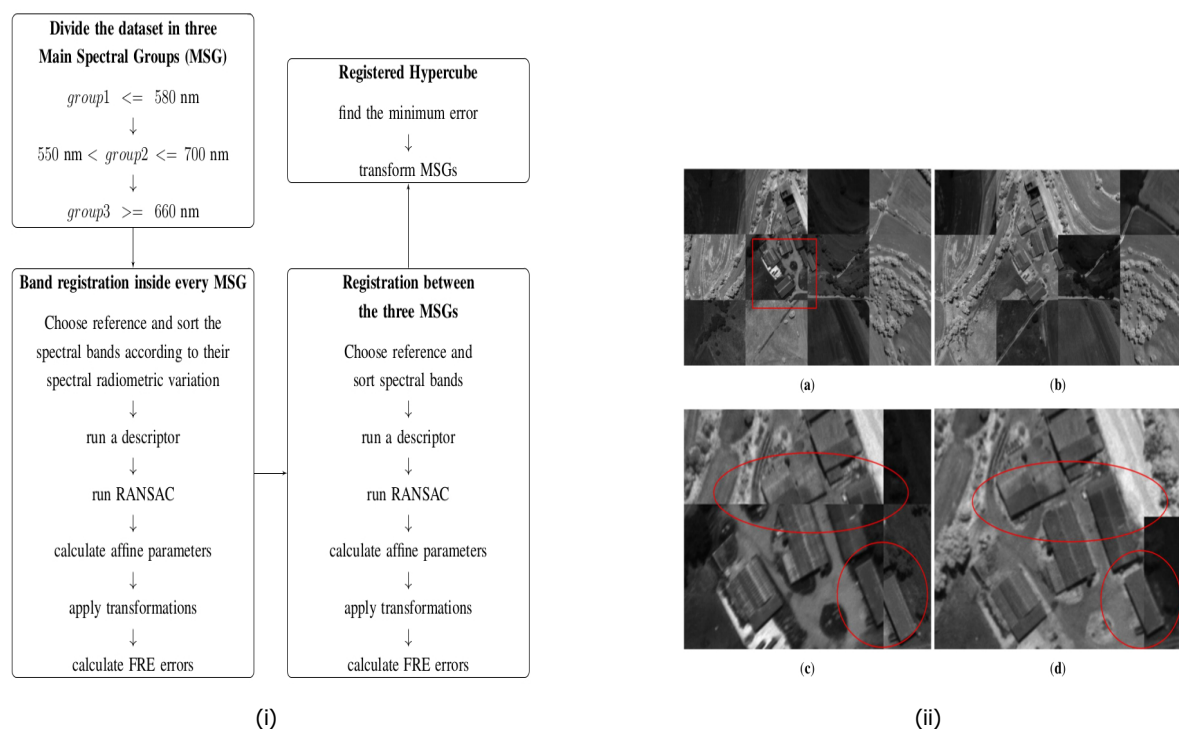
(ii) Αντιστοίχιση ιατρικών δεδομένων με τη χρήση παραμορφώσιμων μεθόδων. Το δεύτερο σετ αντιστοιχίζεται στο πρώτο. Πηγή Crum et al, 2004

Voxel similarity measure	Comment
Sum of Squared Differences $SSD = \frac{1}{N} \sum_x (T(x) - S(t(x)))^2$	Registered images differ only by Gaussian noise. Sensitive to small number of voxels that have very large intensity differences. Only for mono-modal image registration
Correlation coefficient $CC = \frac{\sum_x (T(x) - \bar{T})(S(t(x)) - \bar{S})}{\sqrt{\sum_x (T(x) - \bar{T})^2 \sum_x (S(t(x)) - \bar{S})^2}}$	Registered images have linear intensity relationship and objects of interest are in the field of view of both images. Segmentation of interesting features often necessary. Only for single-modal image registration
Correlation ratio $\eta = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_i N_i \sigma_i^2$	The correlation ratio assumes a functional relationship between intensities. It can be defined in terms of sums and sums of squares of source voxels that correspond to a number N_i of iso-intense voxels in the target image $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{\text{overlap } x} S(x)^2 - m^2, m = \frac{1}{N} \sum_{\text{overlap } x} S(x)$ $\sigma_i^2 = \frac{1}{N_i} \sum_{x:T(x)=i} S(x)^2 - m_i^2, m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{x:T(x)=i} S(x)$
Mutual information $MI = H_T + H_S - H_{TS}$	Assumes only a probabilistic relationship between intensities. Defined in terms of entropies of the intensity distribution $H_T = -\sum_i P_i \log P_i$, $H_S = -\sum_j Q_j \log Q_j$ and $H_{TS} = -\sum_{ij} p_{ij} \log p_{ij}$ where $P(Q)$ =probability of intensity I (J) occurring in target (source) and p_{ij} =joint probability of both occurring at the same place
Normalized mutual information $NMI = \frac{H_T + H_S}{H_{TS}}$	Proposed to minimize the overlap problem seen occasionally with mutual information

Σχήμα 2.3: Μερικές μετρικές ομοιότητας (similarity metrics) που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα αντιστοίχισης. $T(x)$ είναι η ένταση σε μια θέση x σε μια εικόνα και $S(t(x))$ είναι η ένταση στο αντίστοιχο σημείο που δίνεται από την προσωρινή εκτίμηση του μετασχηματισμού $t(x)$. N είναι οι στοιχειακοί όγκοι στην επικαλυπτόμενη περιοχή. Πηγή Crum et al, 2004

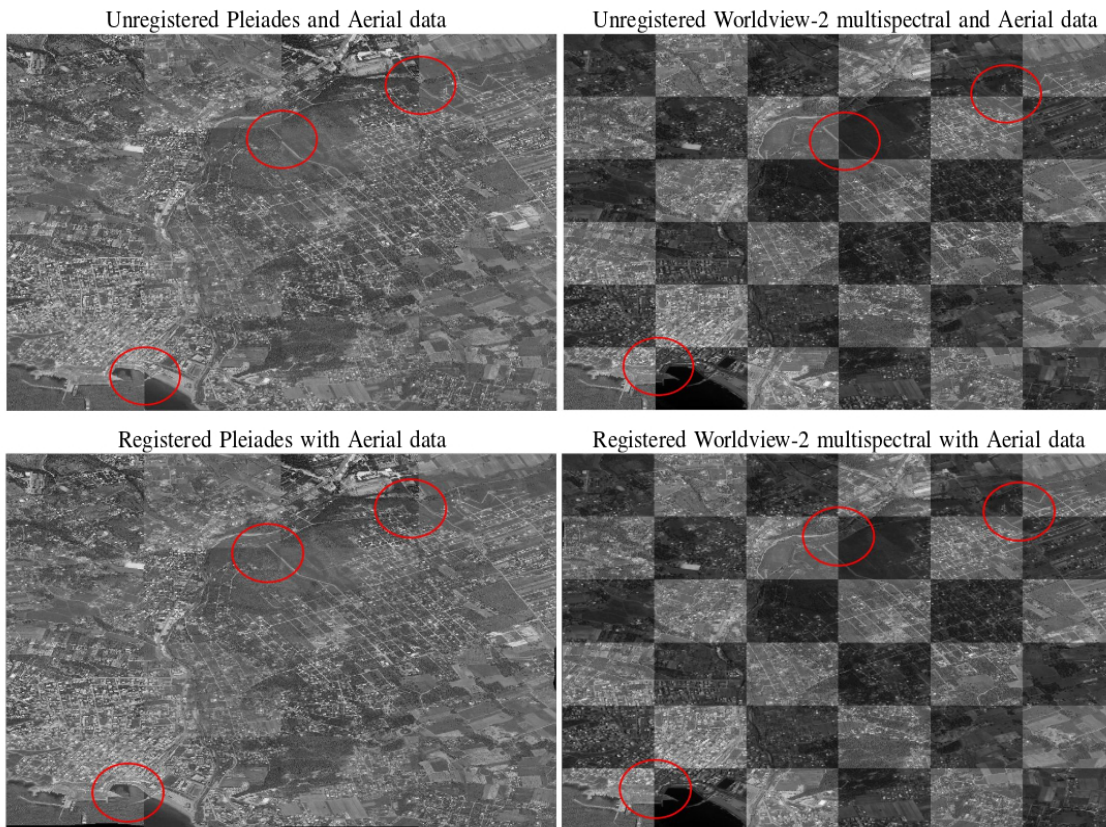
φαίνεται στο σχήμα 2.4(ii).

Η σημαντικότερη εφαρμογή της εύκαμπτης μεθόδου με τις τοπικές παραμορφώσεις σε δορυφορικά δεδομένα γίνεται στο άρθρο "Efficient and automated multimodal satellite data registration through MRFs and linear programming" των Κωνσταντίνου Καράντζαλου, Αριστείδη Σωτήρα και Νίκου Παραγιού *Karantzalos et al. (2014)*. Χρησιμοποιώντας μοντέλα MRF (Markov's random fields) και προγραμματισμό, ανέπτυξαν ένα μοντέλο ικανό να αντιστοιχεί αυτοματοποιημένα δορυφορικά δεδομένα με διαφορετικές χωρικές αναλύσεις, αποφεύγοντας έτσι τη χρήση ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων, που είναι επίπονα στην επεξεργασία και χρονοβόρα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δορυφορικές εικόνες από Pleiades, Worldview-2 και TerraSAR-X. Η αντιστοίχιση τους έγινε σε μωσαϊκό που λήφθηκε από εναέρια μέσα και ήταν επιτυχής. Τα μέσα σφάλματα της απόστασης δεν ξεπέρασαν σε καμία περίπτωση τα 3 εικονοστοιχεία. Ένα μέρος των αποτελεσμάτων φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4: (i) Αποτελέσματα από την εφαρμογή μεθόδων αντιστοίχισης με βάση τοπικούς περιγραφείς σε υπερφασματικά δεδομένα.

(ii) Δείγμα των αποτελεσμάτων της έρευνας. (a) Περιοχή πριν την αντιστοίχιση. (b) Περιοχή μετά την αντιστοίχιση με την προτεινομένη μέθοδο. (c) Περιοχή της εικόνας (a) με ζουμ. (d) Περιοχή της εικόνας (b) με ζουμ. Πηγή *Vakaloroulou et al, 2014*



Σχήμα 2.5: Αποτελέσματα της εύκαμπτης αντιστοίχισης. Αριστερά εικόνα από Pleiades και δεξιά από Worldview-2. Πάνω τα δεδομένα πριν την αντιστοίχιση και κάτω μετά. Πηγή Karantzas et al, 2014

3

Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι δύο μεθοδολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για την αντιστοίχιση των δεδομένων. Για τη διαδικασία αυτή έστω ότι έχουμε ένα ζευγάρι εικόνων. Ως εικόνα στόχος θεωρείται η εικόνα αναφοράς $I_t: \Omega \mapsto \mathbb{R}^2$ και ως πηγή $I_s: \Omega \mapsto \mathbb{R}^2$ η εικόνα που πρόκειται να αντιστοιχηθεί. Ο σκοπός της αντιστοίχισης είναι ο υπολογισμός εκείνου του μετασχηματισμού $I_t(x) = I_s(x) \circ T(x)$ που θα προβάλλει την πηγή στο στόχο.

3.1. Εισαγωγικές έννοιες

Πριν την ανάπτυξη των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, κρίνεται σκόπιμο να επεξηγηθούν κάποιες βασικές έννοιες και να δοθούν ορισμοί που κάνουν πιο εύκολη τη μετέπειτα κατανόηση των όσων γράφονται.

Αντιστοίχιση είναι ο καθορισμός ενός γεωμετρικού μετασχηματισμού που ευθυγραμμίζει σημεία ενός αντικειμένου σε μια εικόνα με αντίστοιχα σημεία σε μια άλλη εικόνα, του ίδιου ή άλλου αντικειμένου. Οι εικόνες αυτές είναι ψηφιακές, αποθηκευμένες ως ξεχωριστοί πίνακες τιμών έντασης φωτεινότητας και μπορεί να είναι δισδιάστατες ή τρισδιάστατες. Από λειτουργική σκοπιά λοιπόν, τα δεδομένα εισόδου είναι οι δύο εικόνες που θα αντιστοιχηθούν και το αποτέλεσμα ένας γεωμετρικός μετασχηματισμός, που είναι μια απλή καταγραφή σημείων από τη μία εικόνα στην άλλη. Εφόσον οι αντιστοιχίες σημείων κατατάσσονται μαζί, η αντιστοίχιση είναι επιτυχής. Ο καθαρισμός των αντιστοιχιών είναι ένα πρόβλημα που εξαρτάται από το είδος των αντικειμένων στις εικόνες και τον τομέα από τον οποίο προέρχονται (ιατρικές, δορυφορικές εικόνες, φωτογραφίες, κ.α.).

3.1.1. Κατηγοριοποίηση μεθόδων αντιστοίχισης

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι αντιστοίχισης και μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις ακόλουθες κατηγορίες (

i) Τις διαστάσεις της εικόνας. Τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής είναι δισδιάστατες εικόνες (δορυφορικές), ωστόσο στις ιατρικές εφαρμογές οι εικόνες είναι συνήθως τρισδιάστατες.

ii) Τη βάση της αντιστοίχισης. Με τον όρο αυτό εννοείται ο προσανατολισμός των εικόνων που συμμετέχουν στην αντιστοίχιση και οι γεωμετρικοί σχηματισμοί που δημιουργούνται εξαιτίας της μεταξύ

τους κλίσης. Για παράδειγμα η βάση μπορεί να είναι ένα γνωστό ζεύγος σημείων που αντιστοιχίζονται μεταξύ τους ή ένα σύνολο αντιστοιχιών της επιφάνειας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες θέσεις και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως γραμμές και επιφάνειες. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι αντιστοιχίες αυτές προέρχονται από αντικείμενα που τοποθετούνται στην εικόνα για να διευκολύνουν την αντιστοίχιση. Τέτοια αντικείμενα μπορεί να είναι το στερεοτακτικό περίγραμμα και σημειακά σημάδια. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τέτοια αντικείμενα ονομάζονται εξωγενείς ενώ όσες βασίζονται σε στοιχεία της ανατομίας της εικόνας μόνο, ενδογενείς. Σε περίπτωση που καμία αντιστοιχία δεν είναι γνωστή, η βάση της αντιστοίχισης είναι η ένταση των εικονοστοιχείων και αντιστοιχίζονται μοτίβα φωτεινότητας.

iii) Το γεωμετρικό μετασχηματισμό. Αναφέρεται στο μαθηματικό τύπο της γεωμετρικής καταγραφής που χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση σημείων από τον ένα χώρο (εικόνα) στον άλλο.

iv) Το βαθμό ανθρώπινης παρέμβασης. Αναφέρεται στο ποσοστό του ελέγχου που ασκείται από τον χειριστή στον αλγόριθμο της αντιστοίχισης. Η αλληλεπίδραση μπορεί να αποτελείται απλά από τον καθορισμό των τιμών εκκίνησης κάποιων παραμέτρων ή να περιλαμβάνει ρυθμίσεις καθ' όλη τη διαδικασία, σε ανταπόκριση της οπτικής αξιολόγησης του μετασχηματισμού ή σε ενδιάμεσες ενδείξεις για την επιτυχία της ευθυγράμμισης. Η ιδανική κατάσταση είναι ένας πλήρως αυτοματοποιημένος αλγόριθμος που δεν απαιτεί αλληλεπίδραση.

v) Τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αναφέρεται στην τυπική προσέγγιση στην αλγοριθμική αντιστοίχιση κατά την οποία η ποιότητα της αντιστοίχισης υπολογίζεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, μέσω μιας συνάρτησης των εικόνων και της καταγραφής των αντιστοιχιών μεταξύ τους. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος κατά την οποία η συνάρτηση αυτή μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται.

vi) Τον τρόπο απόκτησης των δεδομένων. Οι αλγόριθμοι αντιστοίχισης που αφορούν δεδομένα ίδιου τύπου ονομάζονται μονοτροπικοί και διαφέρουν από τους αλγόριθμους που αντιστοιχίζουν δεδομένα διαφορετικού τύπου μεταξύ τους και ονομάζονται πολυτροπικοί.

3.1.2. Γεωμετρικοί μετασχηματισμοί

Κάθε εικόνα που εμπλέκεται σε μία αντιστοίχιση αναφέρεται σε ένα σύστημα συντεταγμένων, που ορίζει ένα χώρο για αυτή. Η αντιστοίχιση βασίζεται σε γεωμετρικούς μετασχηματισμούς, που είναι καταγραφές σημείων από το χώρο X της μίας εικόνας στο χώρο Y μιας δεύτερης. Ο μετασχηματισμός T εφαρμοσμένος σε ένα σημείο x του χώρου X παράγει ένα μετασχηματισμένο σημείο x' , έτσι ώστε

$$x' = T(x) \quad (3.1)$$

Αν το σημείο y του χώρου Y αντιστοιχεί στο x , τότε μια επιτυχημένη αντιστοίχιση θα κάνει το x' ίσο, ή σχεδόν ίσο, με το y . Κάθε μη μηδενική μετατόπιση $T(x) - y$ είναι σφάλμα αντιστοίχισης. Το σύνολο όλων των πιθανών μετασχηματισμών T μπορεί να χωριστεί σε μη συμπαγείς και άκαμπτους μετασχηματισμούς.

Άκαμπτοι μετασχηματισμοί

Οι άκαμπτοι μετασχηματισμοί ορίζονται ως γεωμετρικοί μετασχηματισμοί που διατηρούν όλες τις αποστάσεις. Επίσης διατηρούν ίσιες τις γραμμές, την επιπεδότητα των επιφανειών και όλες τις μη μηδενικές γωνίες μεταξύ ίσων γραμμών. Τέτοιοι μετασχηματισμοί είναι εύκολο να ορισθούν και απαιτούν δύο στοιχεία, μία μετάθεση και μια στροφή. Η μετάθεση είναι ένας τρισδιάστατος πίνακας t

που μπορεί να ορισθεί συσχετίζοντας τις τρεις συντεταγμένες του t_x, t_y, t_z με ένα σεν x, y, z καρτεσιανών συντεταγμένων ή δίνοντας το μήκος του και δύο γωνίες για να προσδιορισθεί η διεύθυνση του σε πολικές σφαιρικές συντεταγμένες. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τον ορισμό της στροφής (Goldstein 1950, Rosenfield 1959, Hom 1986, Fu et al. 1987), με πιο χαρακτηριστικές, τους ορθογωνικούς πίνακες και τις γωνίες Euler.

Έστω T άκαμπτος μετασχηματισμός, τότε

$$x' = Rx + t \quad (3.2)$$

όπου R είναι ένας 3×3 ορθογωνικός πίνακας, δηλαδή $R^t R = R R^t = I$ και $R^{-1} = R^t$. Αυτή η κατηγορία πινάκων περιλαμβάνει τις κανονικές στροφές, που περιγράφουν τους φυσικούς μετασχηματισμούς των άκαμπτων αντικειμένων, αλλά και κάποιες ανεπιθύμητες. Οι ανεπιθύμητες απαλείφονται απαιτώντας $\det(R) = +1$.

Οι κανονικές στροφές μπορούν να παραμετροποιηθούν σε όρους τριών γωνιών στροφής, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, γύρω από τον αντίστοιχο καρτεσιανό άξονα. Η γωνία περιστροφής γύρω από ένα δοσμένο άξονα, με σπάνιες εξαιρέσεις, θεωρείται θετική αν η φορά περιστροφής γύρω από τον άξονα είναι ίδια με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Η περιστροφή ενός αντικειμένου στους άξονες x, y, z δίνεται από τον τύπο:

$$(3.3) \quad R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) \cos(\theta_z) & -\cos(\theta_x) \sin(\theta_z) + \sin(\theta_x) \sin(\theta_y) \cos(\theta_z) & \sin(\theta_x) \sin(\theta_z) + \cos(\theta_x) \sin(\theta_y) \cos(\theta_z) \\ \cos(\theta_y) \sin(\theta_z) & \cos(\theta_x) \cos(\theta_z) + \sin(\theta_x) \sin(\theta_y) \sin(\theta_z) & -\sin(\theta_x) \cos(\theta_z) + \cos(\theta_x) \sin(\theta_y) \sin(\theta_z) \\ -\sin(\theta_y) & \sin(\theta_x) \cos(\theta_y) & \cos(\theta_x) \cos(\theta_y) \end{bmatrix}$$

όπου οι τρεις πίνακες της πρώτης γραμμής αντιπροσωπεύουν τις στροφές $R_z(\theta_z), R_y(\theta_y), R_x(\theta_x)$ γύρω από τους z, y, x αντίστοιχα.

Μη συμπαγείς μετασχηματισμοί

Οι μη συμπαγείς μετασχηματισμοί είναι χρήσιμοι όταν υπάρχουν μη γραμμικές διαστρεβλώσεις στη διαδικασία απόκτησης της εικόνας. Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι ακόλουθοι (Πατιάς.Π. 1999, Kraus 1993).

ι) Μετασχηματισμοί κλίμακας

Οι πιο απλοί μη συμπαγείς μετασχηματισμοί είναι οι άκαμπτοι με εξαίρεση την κλίμακα,

$$x' = RSx + t \quad (3.4)$$

και

$$x' = SRx + t \quad (3.5)$$

όπου $S = \text{diag}(s_x, s_y, s_z)$ είναι ένας διαγώνιος πίνακας τα στοιχεία του οποίου αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές κλίμακας κατά μήκος των τριών αξόνων. Επειδή ο όρος RS γενικά δεν ισούται με τον όρο SR , αυτές οι εξισώσεις αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικά είδη μετασχηματισμών. Τέτοιοι μετασχηματισμοί χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν σφάλματα βαθμονόμησης σε συστήματα

απόκτησης εικόνων. Αυτός ο μετασχηματισμός διατηρεί ίσιες τις γραμμές και τις γωνίες μεταξύ τους και είναι αποτελεσματικός όταν η κλίμακα της εικόνας κατά την απόκτηση της είναι λανθασμένη ή άγνωστη.

ii) Αφινικοί μετασχηματισμοί

Ο προηγούμενος μετασχηματισμός είναι ειδική περίπτωση του αφινικού μετασχηματισμού,

$$x' = Ax + t \quad (3.6)$$

στον οποίο δεν υπάρχει μετασχηματισμός των στοιχείων a_{ij} του πίνακα A . Ο αφινικός μετασχηματισμός διατηρεί την επιπεδότητα, ωστόσο επιτρέπει την αλλαγή γωνιών μεταξύ των γραμμών. Είναι ιδανικός όταν η εικόνα έχει στρεβλωθεί κατά την απόκτηση της. Ακολουθεί η αναπαράσταση του μετασχηματισμού με ομογενοποιημένες συντεταγμένες. Οι πίνακες A και t εισάγονται σε έναν 4×4 πίνακα M , τα στοιχεία του οποίου ορίζονται όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση. Για την επίτευξη του μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται οι επαυξημένοι πίνακες u και u' για τους οποίους ισχύει $u_i = x_i$ και $u'_i = x'_i$ για $i = 1, 2, 3$ και $u_4 = u'_4 = 1$.

$$u' = \begin{bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \\ u'_3 \\ 1 \end{bmatrix} = Mu = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & t_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & t_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(3.7)

iii) Προβολικοί μετασχηματισμοί

Οι μετασχηματισμοί αυτοί αποτελούν πιο γενική μορφή και εκφράζονται από τον τύπο:

$$x' = (Ax + t)/(p + a) \quad (3.8)$$

και σε μορφή ομογενοποιημένων συντεταγμένων:

$$u' = \begin{bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \\ u'_3 \\ u'_4 \end{bmatrix} = Mu = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & t_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & t_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & t_3 \\ p_1 & p_2 & p_3 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(3.9)

iv) Προοπτικοί μετασχηματισμοί

Αποτελούν υποσύνολο των προβολικών μετασχηματισμών. Θέτοντας $f = 1/|p|$ και έστω \hat{p} ένα μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση του άξονα προβολής, p έχουμε:

$$x' = fx/(x \cdot \hat{p} + af) \quad (3.10)$$

Αν το a είναι μη μηδενικό δεν αποτελεί προοπτικό μετασχηματισμό. Ωστόσο ο προοπτικός μετασχηματισμός μπορεί να παραχθεί μηδενίζοντας τον όρο του x' στη διεύθυνση του p :

$$x' \rightarrow x' - (x' \cdot \hat{p})\hat{p} \quad (3.11)$$

v) Καμπύλοι μετασχηματισμοί

Οι μετασχηματισμοί αυτοί δε διατηρούν την ευθύτητα των γραμμών. Η απλούστερη μορφή εξίσωσης για τον μετασχηματισμό T είναι ένα πολυώνυμο των όρων του x (Goshtasby 1986, Maguire et al. 1991),

$$x' = \sum_{ijk} c_{ijk} x^i y^j z^k \quad (3.12)$$

όπου c_{ijk} είναι πίνακας τριών στοιχείων των συντελεστών των i, j, k όρων του πολυονύμου για τους τρεις όρους x', y', z' του \mathbf{x}' . Μετατροπές μπορεί να γίνουν έτσι ώστε να περιλαμβάνονται όλοι οι όροι για τους οποίους $i + j + k \leq M$. Αυτοί οι μετασχηματισμοί σπάνια χρησιμοποιούνται για τιμές των I, J και K μεγαλύτερες από 2 ή για τιμές του M πάνω από 5, εξαιτίας των ανεπιθύμητων παραμορφώσεων που σχετίζονται με το πολυώνυμο μεγάλου βαθμού.

Οι παραμορφώσεις αυτές μπορούν να ελαττωθούν ή να εξαλειφθούν εφαρμόζοντας τμηματικά πολυώνυμα. Οι μετασχηματισμοί που αξιοποιούν τέτοια πολυώνυμα ονομάζονται *splines* (Shikin and Plis 1995, Schumaker 1981). Ο πιο συνηθισμένος βαθμός πολυονύμου είναι $m = 3$, παράγοντας τις "κυβικές *splines*", στις οποίες ο μετασχηματισμός T , καθώς και η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος του είναι συνεχής. Οι καμπύλες *splines* βαθμού m ονομάζονται *B-splines*, και εκφράζονται με όρους πολυωνύμων του ίδιου βαθμού. Σημειώνοντας ότι οι συντεταγμένες κάθε \mathbf{x} πρέπει να είναι ίσες με $u_i \cdot (l + \alpha)$, $v_j \cdot (m + \beta)$, $w_k \cdot (n + \gamma)$ για κάποιο μοναδικό σεντ $l, m, n, \alpha, \beta, \gamma$ όπου l, m, n είναι ακέραιοι και $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$, η ανάπτυξη της "κυβικής *spline*" σε όρους των *B-splines* είναι η ακόλουθη:

$$\mathbf{x}'(l, m, n, \alpha, \beta, \gamma) = \sum_{ijk} B_{i-l}(\alpha) B_{j-m}(\beta) B_{k-n}(\gamma) c_{ijk} \quad (3.13)$$

όπου κάθε $B_q(t)$ είναι ένα κομμάτι της κυβικής *B-spline*, με $B_q(t) = 0$ εκτός αν $-1 \leq q \leq 2$. Για τον καθορισμό της μορφής των $B_q(t)$ υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι και στην απλούστερη μορφή που $u_i = u, v_j = v, w_k = w$ είναι (Shikin and Plis 1995, Pavlidis 1982, Ballard and Brown 1982):

$$B_{-1}(t) = (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)/6, \quad B_0(t) = (3t^3 - 6t^2 + 4)/6, \quad B_1(t) = (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)/6, \quad B_2(t) = t^3/6 \quad (3.14)$$

Ένας από τους μετασχηματισμούς με τη μεγαλύτερη χρήση σε δισδιάστατα δεδομένα είναι ο "*thin-plate spline*" (Harder and Desmarais 1972, Duchon 1977, Meinguet 1978, Goshtasby 1988), το βασικό πλεονέκτημα του οποίου είναι ότι τα σημεία ελέγχου τοποθετούνται τυχαία και όχι σε ορθογώνιο κάναβο, όπως στις κυβικές *splines*. Ακολουθεί ο τύπος:

$$x' = Ax + t + \sum_i^N c_i r_i^2 \ln r_i^2 \quad (3.15)$$

όπου $r_i = |x - x_i|$ και x_i είναι σημείο ελέγχου.

3.1.3. Μέθοδοι βασισμένες στην ραδιομετρία των εικόνων

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η αντιστοίχιση μπορεί να βασίζεται σε σημεία ή χαρακτηριστικά επιφανειών, καθώς επίσης και στην ένταση της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων των εικόνων. Οι μέθοδοι που

χρησιμοποιήθηκαν και που περιγράφονται παρακάτω στηρίζονται σε μεθόδους έντασης, οπότε κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθούν περαιτέρω.

Οι μέθοδοι αντιστοίχισης που στηρίζονται στην ένταση περιλαμβάνουν τον υπολογισμό του μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας μόνο τις τιμές των *pixel* ή *voxel*. Στην πιο απλή μορφή ο μετασχηματισμός αντιστοίχισης σχηματίζεται από την επαναλαμβανόμενη βελτιστοποίηση μερικών μετρικών ομοιότητας που υπολογίζονται από όλες τις τιμές των εικονοστοιχείων ή *voxel*. Πρακτικά πολλοί αλγόριθμοι αντιστοίχισης βασισμένοι στην ένταση χρησιμοποιούν μόνο ένα υποσύνολο των τιμών και απαιτούν ένα είδος προεπεξεργασίας. Το υποσύνολο αυτό μπορεί να επιλέγεται με βάση έναν κανονικό κλίμακα ή τυχαία. Η επιλογή ενός υποσυνόλου μπορεί να κάνει τον αλγόριθμο πιο γρήγορο ή πιο αξιόπιστο. Η χρήση μεθόδων έντασης απαιτεί μικρότερη αλληλεπίδραση με το χρήστη και κάνει πιο εύκολη την αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστοίχιση εικόνων ίδιας ή διαφορετικής διάστασης, για την αντιστοίχιση άκαμπτων ή παραμορφωμένων αντικειμένων και την αντιστοίχιση εικόνων που προέρχονται από ίδια ή διαφορετικά συστήματα. Οι διαθέσιμες μετρικές ομοιότητας αναφέρονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

3.2. Μέθοδος βασισμένη σε τοπικές παραμορφώσεις και MRFs

Η μέθοδος αυτή (MRF-based Registration ή MR για συντομία) βασίζεται σε μια παραμορφώσιμη αντιστοίχιση χρησιμοποιώντας διάφορες μετρικές ομοιότητας. Ορίζεται ένα μοντέλο MRF (Markov random field) και η λύση του είναι η ελαχιστοποίηση της εξίσωσης ενέργειας [3.16 \(Glocker et al. 2011\)](#). Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθεί ο τρόπος λειτουργίας των MRFs. Αρχικά, οι εικόνες κατακερματίζονται σε ένα σύνολο κόμβων, που αντιστοιχούν σε ένα εικονοστοιχείο ή σε συσσωρεύσεις από εικονοστοιχεία (*superpixel*). Οι κόμβοι αυτοί δημιουργούν ένα γράφο ο οποίος σχηματίζεται πάνω από την εικόνα. Στη συνέχεια εισάγονται τυχαίες μεταβλητές, που σχετίζονται με τους κόμβους, σε ένα μοντέλο σχεδιασμένο να εξηγεί τις τιμές όλων των εικονοστοιχείων. Οι τυχαίες αυτές μεταβλητές αποτελούν το τυχαίο πεδίο. Έπειτα, δημιουργείται ένα αρθρωτό πιθανολογικό μοντέλο ανάμεσα στις τιμές των εικονοστοιχείων και τις τυχαίες μεταβλητές. Οι άμεσες στατιστικές εξαρτήσεις ανάμεσα στις τυχαίες μεταβλητές εκφράζονται ομαδοποιώντας αναλυτικά τις τυχαίες μεταβλητές. Αυτές οι ομάδες είναι συχνά ζεύγη που απεικονίζονται ως αιχμές στο γράφο. Η σημειογραφία για τους γράφους εικόνας είναι ότι ο γράφος $G = (V, \varepsilon)$ αποτελείται από κορυφές $V = (1, 2, \dots, i, \dots, N)$ που αντιστοιχούν, για παράδειγμα, στα εικονοστοιχεία της εικόνας και ένα σύνολο από αιχμές ε , όπου μια τυπική αιχμή είναι (i, j) , με $i, j \in V$. Οι αιχμές θεωρούνται χωρίς φορά, έτσι ώστε (i, j) και (j, i) να αναφέρονται στην ίδια αιχμή. Ο λόγος δημιουργίας τέτοιων γράφων είναι η σύνδεση των τυχαίων μεταβλητών που σχετίζονται με τους κόμβους. Για παράδειγμα, για το διαχωρισμό της εικόνας σε προσκήνιο και παρασκήνιο, κάθε κόμβος i (εικονοστοιχείο ή *superpixel*) έχει μια σχετική τυχαία μεταβλητή X_i , που μπορεί να πάρει την τιμή 0 ή 1, για προσκήνιο και παρασκήνιο αντίστοιχα. Για να αντιπροσωπευτεί η τάση των εικονοστοιχείων που είναι συναφή, οι γειτονικοί κόμβοι είναι πιθανόν να έχουν την ίδια ετικέτα. Έτσι, όπου $(i, j) \in \varepsilon$, κάποιου είδους πιθανολογική τάση χρειάζεται να συσχετιστεί με την αιχμή (i, j) , έτσι ώστε X_i και X_j να τήνουν να έχουν την ίδια ετικέτα, ή και τα δυο 0 ή και τα δυο 1. Στην πραγματικότητα, όλα τα εικονοστοιχεία που είναι κοντά και όχι απλά παρακείμενα, είναι πιθανόν να έχουν την ίδια ετικέτα. Από την άλλη μεριά, η αναλυτική σύνδεση όλων των εικονοστοιχείων σε μια τυπική εικόνα, που οι ετικέτες προσκήνιου/παρασκήνιου έχουν αλληλοσυσχετίσεις, θα οδηγούσε σε ένα πυκνά συνδεδεμένο γράφο. Αυτό με τη σειρά του θα είχε ως αποτέλεσμα υπολογιστικά ακριβούς αλγορίθμους. Τα μοντέλα Markov αντιπροσωπεύουν αναλυτικά μόνο τις συσχετίσεις μεταξύ σχετικά λίγων ζευγαριών εικονοστοιχείων,

εκείνων που ορίζονται ως γείτονες εξαιτίας του ότι μοιράζονται μια αιχμή στο ε . Το πλεονέκτημα των MRF είναι ότι αξιοποιούν ένα αλυσιδωτό γεγονός. Οι αναλυτικές μικρής εμβέλειας συνδέσεις προκαλούν τις μεγάλης έκτασης διασυνδέσεις. Έτσι, οι αλληλοσυσχετίσεις σε μεγάλα εύρη, στις διευθύνσεις τυπικών αντικειμένων, μπορούν να γίνουν χωρίς υπερβολικό υπολογιστικό κόστος (Blake *et al.* 2011).

Για τη διαδικασία της αντιστοίχισης, το σύνολο των πιθανών ετικετών κάθε κόμβου για το μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις πιθανές μετατοπίσεις (d^1, \dots, d^n) , όπως $l_p = [d^1, \dots, d^n]$. Ένα γράφημα τοποθετείται πάνω από την εικόνα στόχο και κάθε κόμβος ενώνεται με μία γειτονιά από εικονοστοιχεία χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση παρεμβολής $\eta(\cdot)$. Οι βέλτιστες μετατοπίσεις προβάλλονται από τους κόμβους πίσω στα εικονοστοιχεία χρησιμοποιώντας την ίδια εξίσωση. Ακολουθεί ο τύπος:

$$E_{reg} = \sum_{p \in G} V_p + \lambda \cdot \sum_{p \in G} \sum_{q \in N(p)} V_{pq} \quad (3.16)$$

όπου p, q είναι κόμβοι στο γράφημα G , V_p είναι ο μοναδιαίος όρος, V_{pq} είναι ο όρος του ζεύγους και λ το βάρος.

Συνεχίζοντας, ο μοναδιαίος όρος και ο όρος ζεύγους διατυπώνονται ως εξής:

$$V_p = \int_{\Omega} \hat{\eta}(\|x - p\|) \rho(I_s(x), I_t(x + d^{l_p})) dx \quad (3.17)$$

όπου ρ είναι η εξίσωση ομοιότητας που χρησιμοποιήθηκε (normalised cross correlation, mutual information, κτλ).

$$V_{pq} = \|d^{l_p} - d^{l_q}\| \quad (3.18)$$

όπου ο όρος V_{pq} επιβάλλει στους γειτονικούς κόμβους διαφορετικές ετικέτες μετατόπισης, που βασίζονται στη διαφορά της μετατόπισης τους.

Για τον υπολογισμό του κόστους υπάρχουν διάφορες μετρικές ομοιότητας. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες που χρησιμοποιούνται αρκετά στην πρόσφατη βιβλιογραφία.

1) Σύνολο των απόλυτων διαφορών (SAD)

$$E(T) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{x \in \omega} |I_1(x) - I_2(T(x))| \quad (3.19)$$

όπου I_1 και I_2 είναι η εικόνα στόχος και η εικόνα πηγή και T ο μετασχηματισμός.

2) Άθροισμα του συνόλου απόλυτων τιμών και του συνόλου των διαβαθμισμένων εσωτερικών προϊόντων (SADG)

$$E(T) = \frac{1}{|\omega|} (1 - \gamma) \cdot \sum_{x \in \omega} |I_1(x) - I_2(T(x))| + \gamma \cdot \sum_{x \in \omega} \left| \frac{\nabla I_1(x)}{|\nabla I_1(x)|} \cdot \frac{\nabla I_2(T(x))}{|\nabla I_2(T(x))|} \right| \quad (3.20)$$

όπου το γ ελέγχει την ισορροπία μεταξύ των δύο όρων.

3) Σύνολο των τετραγωνικών διαφορών (SSD)

$$E(T) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{x \in \omega} (I_1(x) - I_2(T(x)))^2 \quad (3.21)$$

4) Κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης (NCC)

$$E(T) = - \left| \frac{\sum_{x \in \omega} (I_1(x) - \mu_1) (I_2(T(x)) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{x \in \omega} (I_1(x) - \mu_1)^2 \sum_{x \in \omega} (I_2(T(x)) - \mu_2)^2}} \right| \quad (3.22)$$

5) Κανονικοποιημένη μορφή αμοιβαίων πληροφοριών (NMI)

$$E(T) = - \frac{2MI(I_1, I_2 \circ T)}{H(I_1) + H(I_2 \circ T)} \quad (3.23)$$

όπου MI είναι η αμοιβαία πληροφορία και H η εντροπία.

6) Ποσοστό αλληλοσυσχέτισης (CR)

$$E(T) = -CR(I_1 | I_2 \circ T) \quad (3.24)$$

7) Σύνολο διαβαθμισμένων εσωτερικών προϊόντων (GRAD)

$$E(T) = \frac{1}{|\omega|} \cdot \sum_{x \in \omega} \left| \frac{\nabla I_1(x)}{|\nabla I_1(x)|} \cdot \frac{\nabla I_2(T(x))}{|\nabla I_2(T(x))|} \right| \quad (3.25)$$

8) Άθροισμα του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης και του συνόλου των διαβαθμισμένων εσωτερικών προϊόντων (CCGIP)

$$E(T) = (1 - \gamma) \left(- \left| \frac{\sum_{x \in \omega} (I_1(x) - \mu_1) (I_2(T(x)) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{x \in \omega} (I_1(x) - \mu_1)^2 \sum_{x \in \omega} (I_2(T(x)) - \mu_2)^2}} \right| \right) + \gamma \cdot \sum_{x \in \omega} \left| \frac{\nabla I_1(x)}{|\nabla I_1(x)|} \cdot \frac{\nabla I_2(T(x))}{|\nabla I_2(T(x))|} \right| \quad (3.26)$$

9) Απόσταση Hellinger (HD)

$$E(T) = \sum_{x \in \omega} \left(\sqrt{\rho_1(I_1(x))} - \sqrt{\rho_2(I_2(T(x)))} \right)^2 \quad (3.27)$$

10) Αμοιβαίες πληροφορίες (MI)

$$E(T) = -(H(I_1) + H(I_2 \circ T) - JE(I_1, I_2 \circ T)) \quad (3.28)$$

11) Αρθρωτή εντροπία

$$E(T) = - \sum_{x \in \omega} p(I_1(x), I_2(T(x))) \cdot \log(p(I_1(x), I_2(T(x)))) \quad (3.29)$$

Παράλληλα με τη χρήση του μοντέλου MRF, έχουν ορισθεί προγραμματιστικά διάφορες μεταβλητές και παράμετροι που βοηθούν στην διαμόρφωση του γράφου, ώστε να ανταποκρίνεται στις εκάστοτε ανάγκες κάθε εικόνας με το βέλτιστο τρόπο. Οι παράμετροι αυτές είναι η αρχική απόσταση των κόμβων, η μέθοδος παρεμβολής, τα επίπεδα εικόνας και γράφου, οι επαναλήψεις, ρυθμίσεις απόστασης και μετατόπισης ετικέτας, η μετρική ομοιότητας που θα χρησιμοποιηθεί και οι παράμετροι αυτής, καθώς επίσης και η μέθοδος προβολής που μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε κυβική καμπύλη B (cubic B-spline), η οποία και χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα δορυφορικά δεδομένα. Έτσι, η υλοποίηση αυτή εκτελείται σε πολλαπλές κλίμακες, τόσο για την εικόνα όσο και για το γράφημα, πράγμα που σημαίνει ότι η ενέργεια υπολογίζεται σε διαφορετικά επίπεδα κανάβου και εικόνας. Όσον αφορά τα επίπεδα κανάβου, ξεκινάμε από μια καθορισμένη τιμή και σε κάθε επίπεδο γίνεται πιο πυκνός. Σε κάθε επίπεδο εκτελείται ένας αριθμός από προσεγγίσεις ώστε να υπολογιστεί η ελάχιστη ενέργεια. Σε κάθε επίπεδο κανάβου η εικόνα πηγή μετασχηματίζεται και ανανεώνεται για να είναι πιο κοντά στην εικόνα στόχο στο επόμενο επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο το πλαίσιο χώρου για τις μετατοπίσεις αλλάζει κι αυτό σε κάθε επίπεδο και πλησιάζει τις ιδανικές μετατοπίσεις. Τέλος, το διαφορετικό επίπεδο εικόνας εκτελεί δειγματοληψία στην εικόνα όταν το πλέγμα του κανάβου είναι αραιό, για μείωση της υπολογιστικής συνθετότητας.

Προκειμένου να αποφέρει σωστά αποτελέσματα αυτή η μέθοδος απαιτείται προσαρμογή των παραμέτρων της στα εκάστοτε δεδομένα. Το σύνολο των τιμών των παραμέτρων που απαιτούνται για μια επιτυχή αντιστοίχιση βρίσκεται εμπειρικά και κατόπιν δοκιμών. Ο χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας αντιστοίχισης ξεκινάει από μερικά λεπτά για σχετικά μικρές και απλές περιοχές και μπορεί να ανέλθει σε αρκετές ώρες για πολύ μεγάλες εικόνες με σύνθετες ρυθμίσεις παραμέτρων.



Σχήμα 3.1: Καρέ από το βίντεο του Burj Khalifa της Skybox.

Ξεκινώντας από τα βίντεο, για το Burj Khalifa της Skybox (3.1), ορίστηκαν: 10 εικονοστοιχεία

απόσταση μεταξύ των κόμβων, 2 επίπεδα εικόνας και 3 επίπεδα κανάβου με 5 επαναλήψεις σε κάθε επίπεδο. Το πλαίσιο του χώρου άλλαζε σε κάθε επίπεδο κανάβου σε 0.8 του προηγούμενου. Η εξίσωση ομοιότητας που χρησιμοποιήθηκε είναι η Normalized Cross Correlation (NCC), καθώς αποδεδειγμένα δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες για την αντιστοίχιση τηλεπισκοπικών δεδομένων (Karantzalos *et al.* 2014). Τέλος, το λάμδα τέθηκε 40, τα βήματα δειγματοληψίας 25 και ως μέθοδος παρεμβολής ορίστηκαν οι κυβικές καμπύλες B (cubic b-splines). Επειδή οι μετατοπίσεις μετά από αρκετά καρτέ ήταν μεγάλες και η απευθείας αντιστοίχιση των καρτέ στο πρώτο δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα, μετά από δοκιμές, έγινε σταδιακή αντιστοίχιση σε ενδιάμεσα καρτέ πριν την τελική στο πρώτο. Έτσι, ομαδοποιήθηκαν τα καρτέ ανά 300 (2-300,301-600,601-900). Η αντιστοίχιση όλων των καρτέ στο τελευταίο γκρουπ έγινε χρησιμοποιώντας ως καρτέ αναφοράς το 600, το 300 και έπειτα το 1, με το αποτέλεσμα του κάθε μετασχηματισμού να αντικαθιστά την εικόνα πηγή κάθε φορά. Όμοια, τα καρτέ αναφοράς για το δεύτερο γκρουπ (301-600) ήταν το 300 και το 1 και για το πρώτο έγινε αντιστοίχιση απευθείας στο 1 (2-300). Όσον αφορά τα δυο βίντεο του Λας Βέγκας, οι παράμετροι περιλαμβάνουν όπως και πριν 10 εικονοστοιχεία απόσταση κόμβων, 3 επίπεδα κανάβου και 2 εικόνας. Αυτή τη φορά ωστόσο, ο αριθμός των επαναλήψεων αυξήθηκε στις 15, ο αριθμός βημάτων δειγματοληψίας στα 65, η τιμή του λάμδα τέθηκε 15 και το πλαίσιο του χώρου άλλαζε σε κάθε επίπεδο κανάβου σε 0.67 του προηγούμενου. Η μετρική ομοιότητας και η μέθοδος παρεμβολής παρέμειναν οι ίδιες. Ακολουθήθηκε η ίδια μέθοδος ενδιάμεσων μετασχηματισμών με την ομαδοποίηση των καρτέ να γίνεται ανά 300 στο βίντεο που είναι ημέρα και 150 στο βίντεο της νυχτερινής λήψης.

Για τα δεδομένα από Quickbird και Worldview-2 η απόσταση κόμβων είναι 120 εικονοστοιχεία, τα επίπεδα εικόνας και κανάβου 3, οι επαναλήψεις κάθε επιπέδου 5, τα βήματα δειγματοληψίας 41, το λάμδα 8 και ο συντελεστής πλαισίου 0.67.

Έχοντας ως εικόνα αναφοράς την εικόνα Sentinel-1 και ως εικόνα πηγή τη δορυφορική εικόνα της Google, η απόσταση μεταξύ κόμβων ξεκινάει στα 2350 εικονοστοιχεία, τα επίπεδα εικόνας και κανάβου είναι 8 και 3 αντίστοιχα, οι επαναλήψεις 5, τα βήματα δειγματοληψίας 36, το λάμδα 1 και ο συντελεστής χώρου μετατοπίσεων 0.61. Αντίστοιχα με μια εικόνα του δορυφόρου Proba, η απόσταση κόμβων μειώθηκε στα 1720 εικονοστοιχεία, τα επίπεδα εικόνας, οι επαναλήψεις, η δειγματοληψία και το λάμδα παρέμειναν ίδια, τα επίπεδα κανάβου αυξήθηκαν σε 6 και ο συντελεστής χώρου 0.67.

Με μια εικόνα αναφοράς από τον Sentinel-2 και εικόνα-πηγή από Google Satellite οι παράμετροι που επιλέχθηκαν μετά από δοκιμές έχουν ως εξής: 2700 εικονοστοιχεία απόσταση κόμβων, 9 επίπεδα εικόνας, 6 κανάβου, 41 βήματα δειγματοληψίας, λάμδα 1 και συντελεστής μετατοπίσεων 0.61. Με εικόνα πηγή Landsat-8 οι αντίστοιχες τιμές είναι 320, 3, 3, 41, 8 και 0,67. Για πηγή από Modis 1020, 3, 6, 41, 8 και 0.67. Με πηγή Proba 1620, 8, 6, 36, 1 και 0.67. Τέλος, έχοντας ως πηγή Sentinel-1 εικόνα, οι τιμές είναι 2920, 6, 4, 36, 1 και 0.67. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αριθμός επαναλήψεων ανά επίπεδο κανάβου ήταν 5.

Ως εικόνα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε επίσης Google Satellite εικόνα. Οι παράμετροι για την αντιστοίχιση του πρώτου καρτέ από το βίντεο του Μπουρτζ Χαλίφα σε αυτή, είναι 900 εικονοστοιχεία απόσταση κόμβων, 7 επίπεδα εικόνας, 5 επίπεδα κανάβου με 8 επαναλήψεις στο καθένα, 41 βήματα δειγματοληψίας, λάμδα ίσο με 8 και 0.61 συντελεστής χώρου μετατοπίσεων. Για το μετασχηματισμό των δεδομένων της Planet Labs οι αντίστοιχοι παράμετροι είναι 253, 9, 6, 5, 41, 10 και 0.61.

Δεδομένα	Απ. κόμβων	Επ. εικόνας	Επ. Κανάβου	Επαναλήψεις	Δειγματοληψία	λ	Συντ. μετατοπ.
Εικόνες							
Quickbird και Worldview-2	120	3	3	5	41	8	0.67
Burj Khalifa σε Google	10	2	3	5	25	40	0.8
Planet labs σε Google	253	9	6	5	41	10	0.61
Google Maps σε Sentinel-2	2700	9	6	5	41	1	0.61
Sentinel 1 σε Sentinel-2	2920	6	4	5	36	1	0.67
Landsat-8 σε Sentinel-2	320	3	3	5	41	8	0.67
Proba-ChristV σε Sentinel-2	1620	8	6	5	36	1	0.67
Google Maps σε Sentinel-1	2350	8	3	5	36	1	0.61
Proba-Chris-V σε Sentinel-1	1720	8	6	5	36	1	0.67
Modis σε Sentinel-2	1020	3	6	5	36	1	0.67
Βίντεο							
Skybox Burj Khalifa	10	2	3	5	25	40	0.8
Skybox Las Vegas	10	2	3	15	15	65	0.67
Skybox Las Vegas night	10	2	3	15	15	65	0.67

Πίνακας 3.1: Οι συνδυασμοί παραμέτρων της μεθόδου που βασίζεται σε MRFs (MR) για κάθε πείραμα.

3.3. Μέθοδος αντιστοίχισης με βάση περιγραφείς εικόνων

Η μέθοδος αυτή (Descriptor-based Registration ή DR για συντομία) υπολογίζει έναν καθολικό μετασχηματισμό για την εικόνα που θα αντιστοιχηθεί. Η διαδικασία αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη : i) τον αλγόριθμο που ανιχνεύει τα σημεία κλειδιά και διατηρεί πληροφορίες για τη θέση τους σε κάθε εικόνα , ii) τον αλγόριθμο που περιγράφει τα σημεία κλειδιά, ο οποίος περιέχει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των σημείων, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση τους, iii) τον αλγόριθμο που κάνει τις συγκρίσεις μεταξύ των σημείων και αντιστοιχεί τα σωστά σημεία ανάμεσα στις εικόνες και τέλος, iv) τη μέθοδο μετασχηματισμού, η οποία υπολογίζει τις παραμέτρους του μετασχηματισμού με βάση τις αντιστοιχίες των σημείων. Με βάση αυτά, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν γι αυτή την εφαρμογή είναι : ο Star Detector (STAR), βασισμένος στον αλγόριθμο Center Surround Extremas (Censure) (Agrawal *et al.* 2008) για την ανίχνευση των σημείων, ο Fast Retina Keypoint (FREAK) (Alahi *et al.* 2012), για την περιγραφή των σημείων και αλγόριθμος βασισμένος σε brute force (BFMatcher) για τη σύγκριση και αντιστοίχιση των σημείων, ο οποίος προτιμήθηκε αν και χρονοβόρος, γιατί ήταν δυνατό να παράξει τα ίδια αποτελέσματα για το ίδιο σετ παραμέτρων, πράγμα το οποίο δεν μπορούσε να επιτύχει αλγόριθμος βασισμένος σε προσέγγιση εγγύτερου γείτονα (Flann), εξαιτίας των τυχαίων δέντρων αναζήτησης που παρήγαγε. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε μετασχηματισμός ομοιότητας.

Ο αλγόριθμος STAR ανιχνεύει ένα μεγάλο αριθμό σημείων κλειδιών, οι αντιστοιχίες των οποίων δεν είναι πάντα σωστές. Για να μειωθούν τα σφάλματα της αντιστοίχισης τα οποία έχουν αντίκτυπο στον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος RANSAC (Fischler and Bolles 1981) με κατώφλι επαναπροβολής το 1 εικονοστοιχείο. Επιπλέον, οι λανθασμένες αντιστοιχίσεις μειώθηκαν, χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο που επέτρεπε μόνο σε αυτές που βρίσκονταν κάτω από ένα όριο να συμμετάσχουν στη δημιουργία του πίνακα μετασχηματισμού. Το όριο αυτό ήταν ένα ποσοστό της μέγιστης απόστασης μεταξύ των αντιστοιχιών. Έτσι, μόνο οι αντιστοιχίες με απόσταση ίση και μικρότερη από το 65% της μέγιστης απόστασης συνέβαλαν στον σχηματισμό του μετασχηματισμού.

Όπως είναι λογικό, ο αριθμός των αντιστοιχιών που υπολογίζεται υπερβαίνει τον ελάχιστο που απαιτείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματισμού. Έτσι, αυτές προκύπτουν ύστερα από την ελαχιστοποίηση της ακόλουθης εξίσωσης σφάλματος (εξίσωση 3.30).

$$\min \left[\sum_i \left(x'_i - \frac{h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \right)^2 + \left(y'_i - \frac{h_{21}x_i + h_{22}y_i + h_{23}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \right)^2 \right] \quad (3.30)$$

όπου $h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33}$ είναι οι παράμετροι ομοιότητας, x_i, y_i είναι οι συντεταγμένες του σημείου κλειδιού i στην εικόνα πηγή και x'_i, y'_i οι συντεταγμένες του σημείου κλειδιού i στην εικόνα αναφοράς.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα σταθερό σύνολο παραμέτρων δεν αποδίδει το ίδιο, ακόμα και σε διαδοχικά καρέ από το ίδιο βίντεο που προέρχονται από τον ίδιο δορυφόρο και απεικονίζουν την ίδια περιοχή, αφού ακόμα και η μικρότερη μετατόπιση μεταξύ των καρέ επηρεάζει την ανίχνευση σημείων κλειδιών και αυτό με τη σειρά του την συνολική ακρίβεια. Γι αυτόν το λόγο η ρύθμιση των παραμέτρων δε γίνεται εξαρχής, αλλά εκτελούνται εκατοντάδες χιλιάδες μετασχηματισμοί με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς από ένα σύνολο τιμών και αναζητείται το καλύτερο αποτέλεσμα. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να εκμεταλλευτεί πολλαπλούς πυρήνες και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση ενός μετασχηματισμού είναι μόλις 1 με 2 δευτερόλεπτα, ωστόσο ο συνολικός χρόνος για την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος αυξάνεται σε πολλές ώρες μέχρι να εκτελεστούν όλοι οι συνδυασμοί.

Όπως είναι γνωστό, η βιβλιοθήκη της Open Source Computer Vision (OpenCV) (Culjak *et al.* 2012) διαθέτει πολλούς αλγορίθμους με εφαρμογές στην ανίχνευση, αναγνώριση και ταυτοποίηση αντικειμένων, ανίχνευση κίνησης και πολλά άλλα. Μέσα σε αυτή την πληθώρα αλγορίθμων υπάρχουν πολλοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντιστοίχιση εικόνων. Γι αυτό το λόγο η μέθοδος αυτή υλοποιήθηκε με τη χρήση της βιβλιοθήκης της OpenCV. Οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης και περιγραφής σημείων κλειδιών είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται από την Planet Labs στο πρότζεκτ Rectifying the Planet. Ο κώδικας γραμμένος σε c++ βρίσκεται στο παράρτημα B.

Αρχικά δημιουργείται ένα αρχείο στο οποίο καταγράφονται κάποιες σημαντικές πληροφορίες για τον κάθε μετασχηματισμό. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν τον αριθμό των τελικών αντιστοιχιών μετά τις διορθώσεις, τις αποστάσεις κατά x και y πριν και μετά τον μετασχηματισμό, καθώς επίσης και τις τιμές των παραμέτρων με τις οποίες επετεύχθη το εκάστοτε αποτέλεσμα, ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή του οποιαδήποτε στιγμή άμεσα. Προφανώς επειδή οι μετασχηματισμοί είναι εκατοντάδες χιλιάδες και δεν χρειάζεται πληροφορία για όλους, στο αρχείο καταγράφονται οι αντιστοιχίσεις με μέσο σφάλμα απόστασης μικρότερο από τον προηγούμενο που καταγράφηκε, έτσι ώστε στο τέλος του αρχείου να βρίσκεται ο βέλτιστος συνδυασμός (κώδικας 3.1).

Κώδικας 3.1: Αρχείο πληροφοριών

```
std::ofstream listfile;
listfile.open ("/home/user/Desktop/REPORT.txt");

if ((sqrt(W*W+Q*Q)) <= (sqrt(K*K+L*L))) {
    L= Q;
    K=W;
    listfile<<"matching points = "<<good_matches.size()<<std::endl;
    listfile<<"dx προςδιορθωσημειονδιορθωμενο:"<<C<<std::endl;
    listfile<<"dy προςδιορθωσημειονδιορθωμενο:"<<D<<std::endl;
    listfile<<"dx σωστομειονδιορθωμενο:"<<Q<<std::endl;
```

```
listfile<<"dy σωστομειονδιορθωμενο:"<<W<<std::endl;
listfile<<"παραμετροι:"<<o<<" | "<<p<<" | "<<q<<" | "<<r<<" | "<<s<<" |
    "<<u<<" | "<<v<<std::endl;
```

Στη συνέχεια οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία και δέχονται πολλές διαφορετικές τιμές μπήκαν σε επαναλήψεις. Όσες δεν βρίσκονται σε αυτό το τμήμα, είτε δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα, είτε έχουν μοναδική τιμή που δίνει αποδεκτό αποτέλεσμα. Συνολικά είναι επτά, οι τέσσερις πρώτες ανήκουν στον STAR, οι επόμενες δύο στον FREAK και η τελευταία είναι ο συντελεστής που καθορίζει το ποσοστό της μέγιστης απόστασης για το οποίο γίνονται αποδεκτές οι αντιστοιχίες σημείων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν σταθερός στα 65, ωστόσο σε περιπτώσεις μικρού αριθμού αντιστοιχίσεων ή αυξημένου αριθμού σημείων, μεταβαλλόταν για να αποδίδει καλύτερα (κώδικας 3.2).

Κώδικας 3.2: Παράμετροι

```
for (int o=25;o<=33;o++) { // PARAMETER VALUES
    for(int p=14;p<=26;p+=4){
        for(int q=5; q<=26;q+=5){
            for (int r=15;r<=26;r+=2){
                for (int s=8;s<=36;s+=2){
                    for (int u=2;u<=9;u++){
                        for (int v=65;v<=65;v+=5){
```

Έπειτα διαβάζονται τα αρχεία των δυο εικόνων. Η λειτουργία αυτή γίνεται μετά τις επαναλήψεις και όχι πριν γιατί κατά το μετασχηματισμό γίνονται εγγραφές πάνω σε αυτά, οπότε προκύπτει η ανάγκη της εκ νέου ανάγνωσης τους για την επόμενη δοκιμή. Ακολουθεί η αναγνώριση των σημείων από τον STAR που έχει πέντε παραμέτρους. Οι σημαντικότερες είναι οι 2 πρώτες, με την πρώτη να καθορίζει το μέγεθος του στοιχείου και να δέχεται διακριτές τιμές, με ελάχιστη τα 4 και μέγιστη τα 128 εικονοστοιχεία και τη δεύτερη να καθορίζει την ποιότητα τους. Για εικόνες με υψηλή χωρική ανάλυση επιλεγόταν μια μικρή τιμή μεγέθους στοιχείου, ενώ για εικόνες χαμηλής ανάλυσης επιλεγόταν μια μεγάλη (κώδικας 3.3).

Κώδικας 3.3: Αλγόριθμος STAR

```
//STAR DETECTOR
// values :4, 6, 8, 11, 12, 16, 22, 23, 32, 45, 46, 64, 90, 128
Ptr<Feature2D>f2d=xfeatures2d::StarDetector::create(45,o,p,q,r);
std::vector<Keypoint> keypointsA, keypointsB;
f2d->detect( imgA, keypointsA );
f2d->detect( imgB, keypointsB );
std::cout<<"keypointsA detected: "<<keypointsA.size()<<std::endl;
std::cout<<"keypointsB detected: "<<keypointsB.size()<<std::endl;
```

Κατόπιν είναι ο FREAK που περιέχει 4 παραμέτρους, οι δυο είναι λογικές και δουλεύουν αποτελεσματικά για την τιμή false, ενώ οι άλλες δύο, όπως αναφέρθηκε, βρίσκονται στις αρχικές δομές επανάληψης (κώδικας 3.4).

Κώδικας 3.4: Αλγόριθμος FREAK

```
// FREAK DESCRIPTOR
Ptr<Feature2D> det2d=xfeatures2d::FREAK::create(false,false,s/1.0f,u);
Mat descriptorsA, descriptorsB;
det2d->compute( imgA, keypointsA, descriptorsA );
det2d->compute( imgB, keypointsB, descriptorsB );
std::cout<<"descriptorsA size: "<<descriptorsA.size()<<std::endl;
std::cout<<"descriptorsB size: "<<descriptorsB.size()<<std::endl;
```

Στη συνέχεια ακολουθεί η αντιστοίχιση των σημείων και το φιλτράρισμα τους (κώδικας 3.5).

Κώδικας 3.5: Αντιστοίχιση σημείων

```
//MATCHER--BFMATCHER
BFMatcher matcher(NORM_HAMMING,false);
std::vector<std::vector<cv::DMatch> > matches;
matcher.knnMatch(descriptorsA,descriptorsB, matches,2);
cout<<"matches:"<<matches.size()<<std::endl;

// REDUCE BAD MATCHES
vector<DMatch> good_matches;

for (int i = 0; i < matches.size(); ++i){
    const float ratio = (v/100.0f);
    if (matches[i][0].distance <= ratio * matches[i][1].distance){
        good_matches.push_back(matches[i][0]);
    }
}
}
```

Έχοντας υπολογίσει τις τελικές αντιστοιχίες σημείων γίνεται ο υπολογισμός του πίνακα μετασχηματισμού. Στις παραμέτρους του ορίζεται ο αλγόριθμος RANSAC για βελτίωση του αποτελέσματος, το όριο επαναπροβολής εικονοστοιχείων 1 και το επίπεδο εμπιστοσύνης στο 0.995. Αφού υπολογιστεί ο πίνακας, υπολογίζεται το μέσο σφάλμα απόστασης και εφόσον είναι μικρότερο από το προηγούμενο, το πρόγραμμα προχωράει στον μετασχηματισμό και την αποθήκευση του αρχείου (κώδικας 3.6).

Κώδικας 3.6: Πίνακας μετασχηματισμού

```
Mat H = findHomography( goodA, goodB,CV_RANSAC,1,noArray(),2000,0.995);
```

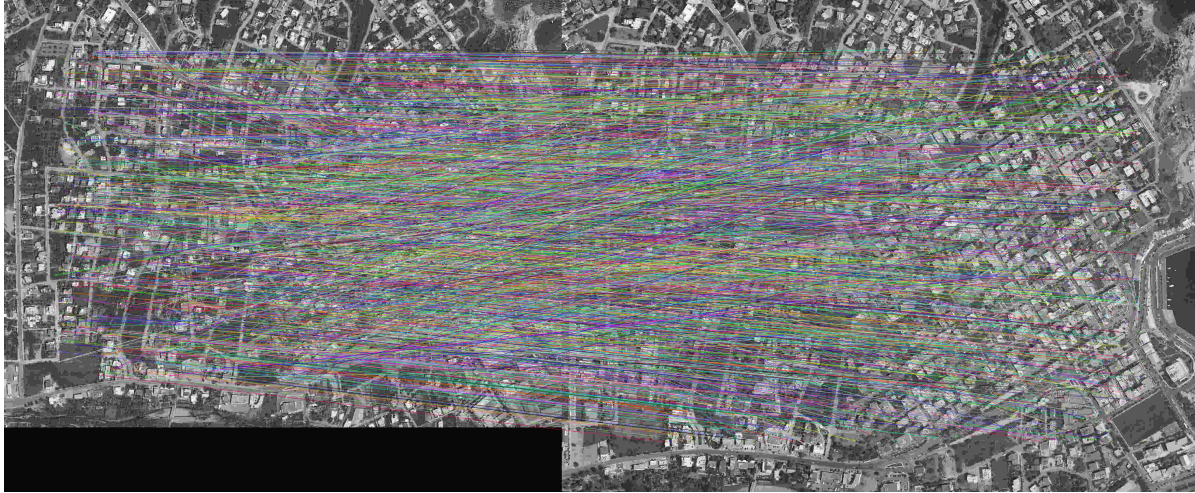
```
warpPerspective (imgA, imgB, H, imgB.size(), INTER_CUBIC, BORDER_CONSTANT);
```

Αυτό γίνεται για τη μείωση του συνολικού χρόνου εκτέλεσης, του απαιτούμενου χώρου αποθήκευσης αλλά και για να είναι πιο εύκολα αξιολογήσιμα οπτικά τα αποτελέσματα, αφού θα είναι λίγα στον αριθμό. Τα αρχεία ονομάζονται με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους, καθώς ο κάθε συνδυασμός είναι μοναδικός, διευκολύνοντας έτσι την εύρεση και αναγνώριση τους, αλλά και της αναπαραγωγής τους. Παράλληλα με την εκτέλεση του προγράμματος εμφανίζονται και μηνύματα με διάφορες πληροφορίες για τη διαδικασία. Τέλος, μετά το πέρας μιας επανάληψης γίνεται καθαρισμός όλων των πινάκων και το πρόγραμμα τρέχει μέχρι να τελειώσουν όλες οι επαναλήψεις ή να τερματιστεί από το χρήστη σε περίπτωση εύρεσης ικανοποιητικού αποτελέσματος.

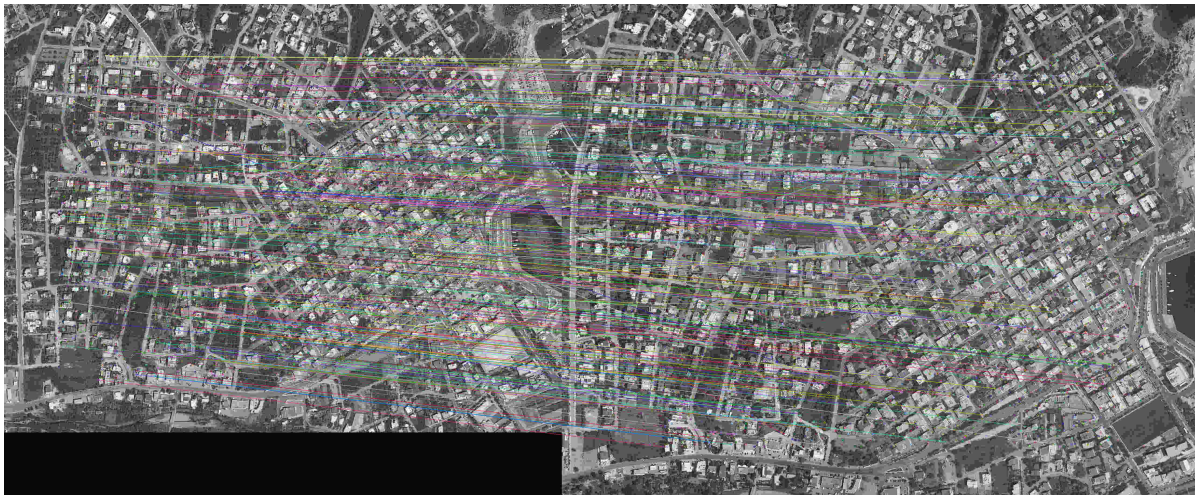
Στο σχήμα 3.2 με τη χρήση του κώδικα 3.7 γίνεται οπτική απεικόνιση των αντιστοιχίσεων, έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η ποιότητα τους σε κάθε αποτέλεσμα.

Κώδικας 3.7: Απεικόνιση των αντιστοιχίσεων

```
drawMatches( imgA, keypointsA, imgB, keypointsB,  
            good_matches, img_matches, Scalar::all(-1), Scalar::all(-1),  
            vector<char>(), DrawMatchesFlags::NOT_DRAW_SINGLE_POINTS ); */  
imshow("matches", img_matches);
```



(i) Αντιστοιχίες σημείων χωρίς φίλτρο



(ii) Αντιστοιχίες σημείων με φίλτρο

Σχήμα 3.2: Αριστερά εικόνα Quickbird προς αντιστοίχιση και δεξιά εικόνα αναφοράς του O.K.X.E.. Στην εικόνα (i) οι αντιστοιχίες είναι πολύ περισσότερες, ωστόσο περιλαμβάνονται αρκετές λάθος και αυτό φαίνεται από τη διεύθυνσή των γραμμών αντιστοίχισης. Στην εικόνα (ii) μετά την εφαρμογή του φίλτρου μειώθηκαν αρκετά οι αντιστοιχίες, ωστόσο είναι περισσότερες από τον απαιτούμενο ελάχιστο αριθμό των τεσσάρων αντιστοιχιών, ποιοτικότερες και συμβάλουν στο σωστότερο υπολογισμό του πίνακα μετασχηματισμού.

4

Αποτελέσματα και αξιολόγηση

4.1. Δεδομένα

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφονται τα χαρακτηριστικά όλων των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα.

Τα δεδομένα προέρχονται από πέντε διαφορετικές περιοχές και πιο συγκεκριμένα από Ελλάδα, Ιταλία, Καλιφόρνια, Λας Βέγκας και Ντουμπάι. Συνεπώς, ήταν αναγκαίο οι εικόνες που αναφέρονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή να έχουν κοντινές ημερομηνίες λήψης ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες για ύπαρξη μεταβολών στα αντικείμενα και στις κατηγορίες στις εικόνες. Ωστόσο, αυτό δεν ήταν πάντα εφικτό εξαιτίας των καιρικών συνθηκών και των διαθέσιμων προϊόντων. Η προεπεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει τρία κυρία στάδια. Αρχικά, για να γίνει η επεξεργασία των δεδομένων πιο αποτελεσματική και λιγότερο χρονοβόρα, όλες οι εικόνες μετατράπηκαν σε 8-bit PNG μορφή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου των εικόνων, με ταυτόχρονη μείωση των απαραίτητων υπολογιστικών πόρων και κυρίως μνήμης ραμ, η χρήση της οποίας ξεπέρασε τα 16 Gbs σε ορισμένες περιπτώσεις. Έπειτα έγινε προσαρμογή των διαστάσεων των εικόνων ανά ζεύγος ώστε να έχουν το ίδιο μέγεθος. Τέλος, έγινε μια αντιστοίχιση των ιστογραμμάτων μεταξύ των εικόνων του ζεύγους, καθώς παρότι δεν ήταν υποχρεωτικό, αποδείχθηκε ότι βελτιώνει το αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις. Η κατηγοριοποίηση των δεδομένων έγινε με βάση τη χωρική τους ανάλυση σε τρεις κατηγορίες.

4.1.1. Δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης

Στην πρώτη κατηγορία έχουμε δυο τύπους δεδομένων με χωρική ανάλυση ίση και μικρότερη των τριών μέτρων(3m).

Δορυφορικά δεδομένα Βίντεο

Τα βίντεο που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα έχουν ανάλυση 0.9 μέτρων (skysat) και προέρχονται από τη Skybox Imaging. Το πρώτο είναι από το Μπουρτζ Χαλίφα, έχει διάρκεια 30 δευτερολέπτων, αποτελείται από 900 καρέ με διαστάσεις 1280x900 εικονοστοιχεία και καλύπτει μια περιοχή 1.8km² περίπου. Το δεύτερο απεικονίζει μια περιοχή στο Λας Βέγκας, διαρκεί 60 δευτερόλεπτα, έχει 1800 καρέ ίδιων διαστάσεων με το προηγούμενο και καλύπτει 1.3km². Τέλος, το τρίτο βίντεο είναι νυχτερινή λήψη

Δεδομένα	Ανάλυση	Κανάλια	Διαστάσεις	Όγκος	Ημ/νια	Περιοχή
Εικόνες						
Worldview-2	0,5m	8	2381x1808	68,9 Mbs	2010	Ελλάδα
Worldview-2	0,5m	8	2286x1774	64,9 Mbs	2011	Ελλάδα
Quickbird	0,6m	4	2069x1646	27,3 Mbs	2006	Ελλάδα
Quickbird	0,6m	4	1895x1507	22,9 Mbs	2007	Ελλάδα
Quickbird	0,6m	4	1883x1510	22,8 Mbs	2009	Ελλάδα
Google Maps	1m	1	3526x1942	2,8 Mbs	2015	Μπουρτζ Χαλίφα
Google Maps	3m	1	6408x3776	19,0 Mbs	2015	Καλιφόρνια
Planet labs	3m	1	2038x1195	8,3 Mbs	19/9/15	Καλιφόρνια
Google Maps	10m	1	7817x8711	101,5 Mbs	2015	Ιταλία
Sentinel 2	10m	13	20982x20982	880,7 Mbs	18/08/2015	Ιταλία
Sentinel 1	20m	1	44115x39416	175,4 Mbs	08/10/2015	Ιταλία
Landsat-8	30m	11	16441x13565	62,3 Mbs	09/08/2015	Ιταλία
Proba-Chris-V	100m	4	2481x1750	52,0 Mbs	09/04/15	Ιταλία
Modis	250m	2	6018x5175	62,3 Mbs	02/06/15	Ιταλία
Βίντεο						
Skybox	1m	1	1280x720	0,5 Mbs	9 /4/2014	Μπουρτζ Χαλίφα
Skybox	1m	1	1280x720	0,5 Mbs	25/3/2014	Λας Βέγκας
Skybox Night	1m	1	1920x1080	0,4 Mbs	11/2014	Λας Βέγκας

Πίνακας 4.1: Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα.

μιας ελαφρώς διαφορετικής περιοχής στο Λας Βέγκας, έκτασης $2.1km^2$, διάρκειας 30 δευτερολέπτων, αποτελούμενο από 887 καρέ ανάλυσης 1920×1080 εικονοστοιχεία.

Δορυφορικές πολυφασματικές εικόνες

Ξεκινώντας με τα δεδομένα καλύτερης ανάλυσης, στα 0.5 μέτρα έχουμε δυο εικόνες από Worldview-2 με 8 κανάλια του 2010 και 2011, με διαστάσεις 2381×1808 και 2286×1774 εικονοστοιχεία αντίστοιχα, που απεικονίζουν μια περιοχή στη Ραφήνα έκτασης $1.12km^2$. Στα 0.6 μέτρα έχουμε τρεις δορυφορικές λήψεις από Quickbird των χρονολογιών 2006, 2007 και 2009 με αντίστοιχες διαστάσεις 2069×1646 , 1895×1507 και 1883×1510 εικονοστοιχεία. Απεικονίζουν την ίδια ακριβώς περιοχή με τις Worldview-2 και αποτελούνται από τέσσερα κανάλια.

Στη συνέχεια, στα 3 μέτρα (dove satellite) έχουμε τα δεδομένα της Planet Lab's στην Καλιφόρνια. Η εικόνα που χρησιμοποιήθηκε καλύπτει μια περιοχή $19.4km^2$ και έχει διαστάσεις 2038×1195 εικονοστοιχεία, 3 κανάλια και ημερομηνία λήψης 19 Σεπτεμβρίου του 2015.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν δυο εικόνες-μωσαϊκά από την Google. Η πρώτη με χωρική ανάλυση περίπου 1 μέτρο καλύπτει την ίδια περιοχή με το βίντεο από το Μπουρτζ Χαλίφα και έχει διαστάσεις 3526×1942 εικονοστοιχεία. Η δεύτερη με ανάλυση κάτω από τα 3 μέτρα και μέγεθος 6408×3776 εικονοστοιχεία, καλύπτει την ίδια περιοχή στην Καλιφόρνια με τα δεδομένα της Planet Labs.

4.1.2. Δεδομένα υψηλής ανάλυσης

Το πρώτο σετ σε αυτή την κατηγορία, που αποτελείται από προϊόντα με χωρική ανάλυση από 10 έως 30 μετρά, είναι μια εικόνα από Sentinel-2 με 10 μέτρα ανάλυση και 13 κανάλια, η οποία λήφθηκε στις 18/08/2015. Παράχθηκε ενώνοντας 4 μικρότερα πλακάκια σε ένα, καλύπτει μια περιοχή έκτασης

43220km² στην Βόρεια Ιταλία και έχει διαστάσεις 20982x20982.

Το δεύτερο σετ είναι μια εικόνα Sentinel-1 (ραντάρ) με ανάλυση 20 μέτρα, 1 κανάλι και λήψη στις 08/10/2015. Η εικόνα προήρθε από τη χρήση ενός προϊόντος εδάφους (ground product), το οποίο επεξεργάστηκε κατάλληλα με το Sentinel-1 toolbox. Οι διαστάσεις είναι 44115x39416 εικονοστοιχεία και καλύπτουν την ίδια περιοχή με το Sentinel-2.

Το τρίτο σετ, με ημερομηνία λήψης 09/08/2015, είναι μια εικόνα Landsat-8, αποτελούμενη από 11 κανάλια και ανάλυση 30 μέτρων. Καλύπτει ένα μικρότερο τμήμα έκτασης 22900km² στην ίδια περιοχή με τους Sentinel. Το μέγεθος της ανέρχεται σε 5271x4420 εικονοστοιχεία.

Με την ίδια μέθοδο που αναφέρθηκε πριν, αποκτήθηκε μια εικόνα-μωσαϊκό από τη Google, διαστάσεων 7817x8711 εικονοστοιχεία, ανάλυσης λίγο πιο πάνω από τα 10 μέτρα, η οποία καλύπτει την ίδια περιοχή με τα δεδομένα αυτής της κατηγορίας.

4.1.3. Δεδομένα μέσης ανάλυσης

Σε αυτήν την κατηγορία υπάρχουν 2 εικόνες και απεικονίζουν την ίδια περιοχή στην Ιταλία με τα δεδομένα των Sentinel. Η πρώτη είναι Proba Chris-V, με κύρια χρήση την παρακολούθηση βλάστησης. Λήφθηκε στις 09/04/2015, έχει 100 μέτρα ανάλυση, 4 κανάλια και διαστάσεις 2481x1750 εικονοστοιχεία. Η δεύτερη είναι Modis, επεξεργασμένη στα 250 μέτρα ανάλυσης, με 2 κανάλια, 6018x5175 εικονοστοιχεία και ημερομηνία λήψης στις 02/06/2015.

4.2. Αποτελέσματα αξιολόγησης

Οι δυο μέθοδοι αξιολογήθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά χρησιμοποιώντας τα ίδια ζευγάρια δεδομένων. Για την ποιοτική προσέγγιση δημιουργήθηκαν προβολές με σκακιέρες, ώστε να είναι άμεσα ορατά τα αποτελέσματα της αντιστοίχισης. Για την δημιουργία αυτών των εικόνων κατασκευάστηκε πρόγραμμα γραμμένο σε C. Η ποσοτική αξιολόγηση βασίστηκε σε χειροκίνητη συλλογή φωτοσταθερών σημείων (GCPs) για κάθε αποτέλεσμα. Χρησιμοποιώντας αυτά τα φωτοσταθερά, μετρήθηκε το μέσο σφάλμα σε κάθε άξονα (DX,DY) καθώς επίσης και το μέσο σφάλμα της απόστασης (DS) σε εικονοστοιχεία. Για τη διαδικασία αυτή αυτή κατασκευάστηκε πρόγραμμα σε Matlab που κάνει χρήση της η συνάρτησης ginput. Το σύνολο των σημείων ανά εικόνα ποικίλει αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι μικρότερο από 12.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν ανά ζεύγη εικόνων. Η εικόνα που πρόκειται να αντιστοιχηθεί θεωρείται ως εικόνα πηγή και η εικόνα στην οποία θα γίνει η αντιστοίχιση θεωρείται ως εικόνα αναφοράς. Για τα βίντεο ως εικόνα αναφοράς ορίστηκε το πρώτο καρτέ, ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν σταδιακά και ενδιάμεσα καρτέ ως αναφορά για βελτίωση του αποτελέσματος, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2. Επιπλέον, το πρώτο καρτέ από το βίντεο του Μπουρτζ Χαλίφα χρησιμοποιήθηκε ως πηγή μαζί με μια εικόνα-μωσαϊκό από Google ως αναφορά. Όλες οι Quickbird και Worldview-2 εικόνες αντιστοιχήθηκαν σε δεδομένα που προήρθαν από τον ΟΚΧΕ. Η εικόνα του Sentinel-2 χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για τις Landsat-8, Proba, Modis, Sentinel-1 και Google. Επιπροσθέτως, η Sentinel-1 χρησιμοποιήθηκε και ως αναφορά για τις εικόνες από Proba και Google. Τέλος, τα δεδομένα της Planet Labs αντιστοιχήθηκαν σε εικόνα-μωσαϊκό από τη Google.

Τα ίδια πειράματα έγιναν και με τις δυο μεθόδους, ωστόσο μόνο αυτή που αξιοποιεί τα MRFs ήταν ικανή να αντιστοιχίσει όλα τα δεδομένα. Όντας ευέλικτη με δυνατότητα τοπικών μετασχηματισμών με τοπικές παραμορφώσεις, μπορεί να αντιστοιχήσει δεδομένα πολύ υψηλής έως χαμηλής χωρικής ανάλυσης, ακόμα και αν υπάρχουν μεταβολές που προήλθαν εξαιτίας του χρόνου ή του ανθρώπινου

Εικόνα αναφοράς	Εικόνα πηγή
Πρώτο καρέ του βίντεο	Skybox Imaging: Burj Khalifa , Las Vegas, Las Vegas-night
Sentinel-1	Google satellite, Proba Chris-V
Sentinel-2	Google satellite, Landsat-8, Modis, Proba Chris-V, Sentinel-1
Google satellite	Planet Labs, Skybox Imaging: Burj Khalifa
OKXE	Quickbird, Worldview-2

Πίνακας 4.2: Τα ζευγάρια των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων αντιστοίχισης. Ως εικόνα αναφοράς θεωρείται η εικόνα πάνω στην οποία γίνεται η αντιστοίχιση και ως εικόνα πηγή, η εικόνα που θα αντιστοιχηθεί.

παράγοντα. Η δεύτερη μέθοδος, που βασίζεται σε τοπικούς περιγραφείς, δεν ήταν ικανή να ανταπεξέλθει σωστά με τα δεδομένα των Modis, Proba, Sentinel-1 και Skybox. Για τις εικόνες από Modis και Proba το πρόβλημα ήταν η χαμηλή χωρική ανάλυση σε συνδυασμό με το όριο των 128 εικονοστοιχεία για το μέγεθος στοιχείων του αλγορίθμου STAR, το οποίο επηρεάζει την αναγνώριση σημείων-κλειδιών. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό καθώς, για παράδειγμα, ο μέγιστος αριθμός κλειδιών που ανιχνεύει είναι περίπου 800 στην εικόνα του Modis, ενώ στην εικόνα από Sentinel-2 χιλιάδες. Το ίδιο ισχύει και για την εικόνα από Proba. Αντιθέτως, στη Sentinel-1 αν και ανιχνεύονται πολλές χιλιάδες σημεία, φαίνεται πως το γεγονός ότι η εικόνα είναι ραντάρ έχει αρνητική επίδραση στην ποιότητα των κλειδιών, καθώς πολλά από αυτά είναι λανθασμένα, κάνοντας την αντιστοίχιση αδύνατη. Όσον αφορά τα βίντεο, ο άκαμπος μετασχηματισμός αυτής της μεθόδου και η μεγάλη μετατόπιση των κτιρίων, που δημιουργείται εξαιτίας της συνεχώς μεταβαλλόμενης θέσης του ήλιου, είναι οι λόγοι που αυτή η μέθοδος (DR) αποτυγχάνει σε αυτή την περίπτωση. Η μέθοδος με τους τοπικούς περιγραφείς φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα με δεδομένα υψηλής και πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, όταν οι μεταβολές είναι μικρές ή ανύπαρκτες.

Όσον αφορά την ποσοτική αξιολόγηση, χρησιμοποιώντας την πρώτη μέθοδο τα δεδομένα της Skybox Imaging αντιστοιχίστηκαν επιτυχώς. Το βίντεο του Μπουρτζ Χαλίφα είχε μέσο σφάλμα απόστασης κάτω από 1 εικονοστοιχείο, του Λας Βέγκας 1.5 εικονοστοιχεία, ενώ το βίντεο με τη βραδινή λήψη 1 εικονοστοιχείο. Σε αυτά τα σετ δεδομένων οι δυσκολίες ήταν πολλές εξαιτίας της μεγάλης κλίμακας, των ψηλών κτιρίων και των σκιών τους, καθώς επίσης και των κινούμενων αντικειμένων, όπως τα σύννεφα και ένα αεροπλάνο σε ένα από τα τρία βίντεο. Τα αντικείμενα που βρίσκονται στο επίπεδο του εδάφους και τα κτίρια χαμηλού και μέσου ύψους αντιστοιχίζονται σωστά, ενώ τα ψηλά κτίρια αποτέλεσαν πρόβλημα. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αντιστοίχισης με τους τοπικούς περιγραφείς τα σφάλματα ήταν κοντά στις αρχικές τιμές πριν την εφαρμογή της διαδικασίας και σε μερικές περιπτώσεις τα ξεπερνούσαν, φανερώνοντας την αναποτελεσματικότητα της μεθόδου για αυτό τον τύπο δεδομένων. Η αντιστοίχιση ενός καρέ του Μπουρτζ Χαλίφα στην εικόνα-μωσαϊκό από τη Google με την πρώτη μέθοδο έδωσε μέσο σφάλμα απόστασης 1.6 εικονοστοιχεία.

Οι εικόνες Quickbird αντιστοιχίστηκαν και με τις δυο μεθόδους. Η πρώτη έδωσε μέσο σφάλμα απόστασης περίπου 2 εικονοστοιχεία, ενώ το σφάλμα της δεύτερης κυμαίνεται από 3.0 έως 4.9 εικονοστοιχεία για τις 3 λήψεις. Όμοια, τα δεδομένα από το Worldview-2 είχαν 2.1 και 7.1 εικονοστοιχεία σφάλμα αντίστοιχα με την κάθε μέθοδο.

Στη συνέχεια, η Landsat-8 σε Sentinel-2 παρουσίασε σφάλμα 3.7 (MRFs) και 3.9 (open-cv) εικονοστοιχεία. Όμοια η Google σε Sentinel-2 είχε 2.5 και 6,3 εικονοστοιχεία σφάλμα. Οι εικόνες από Proba, Sentinel-1 και Modis αντιστοιχίστηκαν επιτυχώς στην ίδια εικόνα αναφοράς με την πρώτη μέθοδο

μόνο και είχαν σφάλμα 5.8, 5.0 και 14.2 εικονοστοιχεία αντίστοιχα. Το μέσο σφάλμα απόστασης του Modis φαίνεται μεγάλο αλλά λαμβάνοντας υπόψιν τα 250 μέτρα χωρικής ανάλυσης του δορυφόρου και τη δυσκολία συλλογής φωτοσταθερών σημείων για την αξιολόγηση σε αυτή, είναι φυσιολογικό και η αντιστοιχισή είναι επιτυχής, όπως φαίνεται και από τις εικόνες. Οι εικόνες από Proba και Google αντιστοιχίστηκαν επίσης σε Sentinel-1 με την πρώτη μέθοδο, με αντίστοιχα σφάλματα 8.6 και 7.0 εικονοστοιχεία. Τα σχετικά μεγάλα σφάλματα οφείλονται ξανά εν μέρει στη δυσκολία συλλογής φωτοσταθερών.

Τέλος, τα δεδομένα της Planet Labs αντιστοιχίστηκαν σε μια εικόνα-μωσαϊκό της Google και με τις δυο μεθόδους, παρουσιάζοντας σφάλμα 2.2 εικονοστοιχεία με την πρώτη και 2.5 με τη δεύτερη. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί το γεγονός ότι η επιλογή των αλγορίθμων της δεύτερης μεθόδου έγινε με βάση το πρότζεκτ Rectify the Planet της Planet Labs, που κάνει χρήση αυτών των μεθόδων και τα αποτελέσματα της μεθόδου στα δεδομένα της, καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή λειτουργεί σωστά.

Δεδομένα	MR			DR		
	Dx (pixel)	Dy (pixel)	D (pixel)	Dx (pixel)	Dy (pixel)	D (pixel)
Εικόνες						
Quickbird 2006 σε OKXE	1.534	1.062	1.866	4.156	2.007	4.615
Quickbird 2007 σε OKXE	1.633	1.097	1.967	2.582	4.127	4.869
Quickbird 2009 σε OKXE	0.972	1.666	1.929	2.139	2.052	2.964
Worldview-2 2010 σε OKXE	1.479	1.511	2.114	1.670	6.893	7.092
Worldview-2 2011 σε OKXE	1.462	1.546	2.127	6.367	3.360	7.199
Burj Khalifa σε Google	1.170	1.132	1.628	-	-	-
Planet labs σε Google	1.424	1.731	2.241	1.681	1.938	2.566
Google Maps σε Sentinel-2	1.889	1.690	2.535	3.366	5.353	6.323
Sentinel 1 σε Sentinel-2	3.218	3.805	4.983	-	-	-
Landsat-8 σε Sentinel-2	1.841	3.190	3.683	2.286	3.104	3.855
Proba-Chris-V σε Sentinel-2	3.641	4.482	5.775	-	-	-
Google Maps σε Sentinel-1	3.632	5.956	6.976	-	-	-
Proba-Chris-V σε Sentinel-1	6.266	5.882	8.594	-	-	-
Modis σε Sentinel-2	10.659	9.448	14.244	-	-	-
Βίντεο						
Skybox Burj Khalifa	0.356	0.757	0.836	0.445	3.828	3.853
Skybox Las Vegas	0.742	1.261	1.463	0.964	0.964	8.880
Skybox Las Vegas night	0.763	0.763	1.079	3.052	13.352	13.696

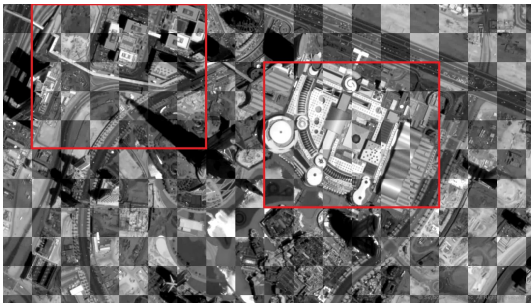
Πίνακας 4.3: Τα αποτελέσματα της ποσοτικής αξιολόγησης σε επίπεδο εικονοστοιχείου, μετά την εφαρμογή των μεθόδων αντιστοιχισής. Η μέθοδος βασισμένη στους τοπικούς περιγραφείς (DR) δεν κατάφερε να αντιστοιχήσει όλα τα δεδομένα.

Αρχικά, στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται η περιοχή του Burj Khalifa από το πρώτο βίντεο της Skybox Imaging. Οι σκακιέρες αυτές δημιουργήθηκαν από το πρώτο και το τελευταίο καρέ του βίντεο, και σε κάθε τετράγωνο γίνεται εναλλαγή μεταξύ τους. Παράλληλα, στο σχήμα 4.3 έχει γίνει εστίαση σε δύο χαρακτηριστικές υποπεριοχές. Στο σχήμα 4.2(iii) πριν την αντιστοιχισή παρατηρείται η λάθος θέση και η μη σύμπτωση των σχηματισμών του συγκροτήματος κτιρίων. Στο σχήμα 4.2(iv) μετά την αντιστοιχισή, είναι ορατή η αποκατάσταση της γεωμετρίας. Όμοια στο σχήμα 4.2(v) φαίνονται τα προβλήματα στα κτίρια εξαιτίας της διαφορετικής γωνίας λήψης των καρέ. Στο σχήμα 4.2(vi) μετά την

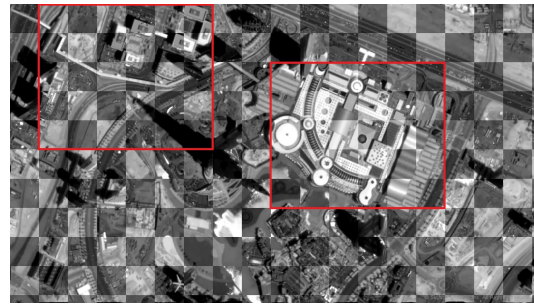
(i) Καρέ από το βίντεο της περιοχής του *Burj Khalifa* πριν την αντιστοίχιση(ii) Καρέ από το βίντεο της περιοχής του *Burj Khalifa* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.1: Το πρώτο και το τελευταίο καρέ από το βίντεο της *Skybox Imaging*, που απεικονίζει την περιοχή του *Burj Khalifa*. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, που ήταν και η μόνη ικανή να αντιστοιχίσει αυτό το σετ δεδομένων. Το μέσο σφάλμα αντιστοίχισης στη περίπτωση αυτή είναι κάτω από 1 εικονοστοιχείο.

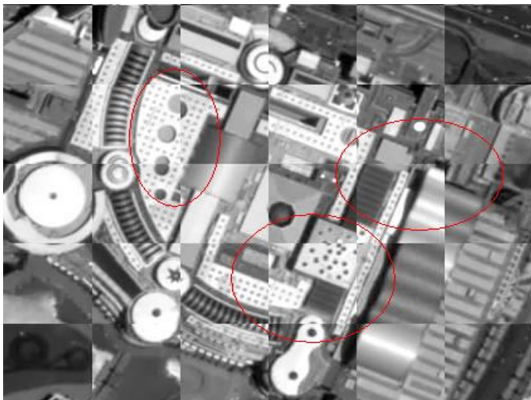
αντιστοίχιση το πρόβλημα αυτό βελτιώθηκε αρκετά, ωστόσο δημιουργήθηκαν κάποιες παραμορφώσεις εξαιτίας του μετασχηματισμού. Η αντιστοίχιση έγινε με την πρώτη μέθοδο, όπως και για τα υπόλοιπα δύο βίντεο. Προχωρώντας στο επόμενο βίντεο, στο σχήμα 4.3 απεικονίζεται η περιοχή του Λας Βέγκας με όμοιο τρόπο. Η περιοχή αυτή περιέχει πολλά ψηλά κτίρια, τα οποία σε συνδυασμό με την αλλαγή στη γωνία λήψης του δορυφόρου κάνουν δύσκολη την αντιστοίχιση. Στα σχήματα 4.4(iii) και 4.4(v) που είναι εστιασμένες περιοχές, διακρίνονται οι ασυνέχειες στο οδικό δίκτυο και οι λάθος θέσεις των κτιρίων. Στο σχήμα 4.4(iv) μετά την αντιστοίχιση, η γέφυρα, ο δρόμος και το κτίριο στα δεξιά, έχουν αντιστοιχηθεί επιτυχώς. Ωστόσο, τα ψηλά κτίρια στα αριστερά δεν ήταν δυνατό



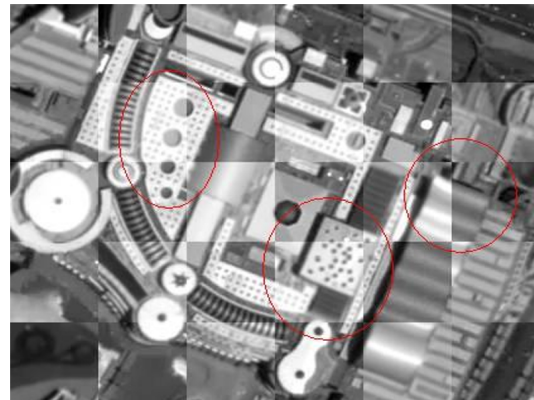
(i) Περιοχές του σχήματος 4.1(i) προς εστίαση



(ii) Περιοχές του σχήματος 4.1(ii) προς εστίαση



(iii) Πρώτη εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση



(iv) Πρώτη εστιασμένη περιοχή μετά την αντιστοίχιση



(v) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση



(vi) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή μετά την αντιστοίχιση

Σχήμα 4.2: Εστιασμένες περιοχές από τα δεδομένα του σχήματος 4.1. Οι εικόνες αριστερά είναι πριν την αντιστοίχιση και δεξιά μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο. Η αποκατάσταση της γεωμετρίας των κτιρίων είναι εμφανής. Παρατηρούνται ωστόσο μερικές παραμορφώσεις, που οφείλονται στο μετασχηματισμό.

να αντιστοιχηθούν. Όμοια στο σχήμα 4.4(vi) υπήρξε σημαντική βελτίωση στα κτίρια και ιδιαίτερα σε αυτό με το σχήμα σταυρού που είχε μεγάλες αποκλίσεις αρχικά. Ταυτόχρονα, στις άκρες του κτιρίου παρατηρούνται κάποιες παραμορφώσεις εξαιτίας του μετασχηματισμού. Στο τρίτο και τελευταίο βίντεο που απεικονίζεται το Λας Βέγκας σε νυχτερινή λήψη (σχήμα 4.5), παρατηρούνται αρκετές ασυνέχειες στα κτίρια, οι οποίες διακρίνονται καλύτερα στα σχήματα 4.6(iii) και 4.2(v). Μετά την αντιστοίχιση, στα σχήματα 4.6(iv) και 4.6(vi) φαίνεται το βελτιωμένο αποτέλεσμα. Τέλος, ακολουθεί η αντιστοίχιση του πρώτου καρέ από το βίντεο του Burj Khalifa σε εικόνα-μωσαϊκό της Google (σχήμα 4.7). Στο σχήμα



(i) Καρέ από το βίντεο που καλύπτει την περιοχή του Λας Βέγκας πριν την αντιστοίχιση



(ii) Καρέ από το βίντεο που καλύπτει την περιοχή του Λας Βέγκας μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.3: Απεικόνιση σκακιέρας για τα καρέ του βίντεο της Skybox Imaging από την περιοχή του Λας Βέγκας. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου μεταξύ πρώτου και τελευταίου καρέ. Η περιοχή αυτή διαθέτει αρκετά ψηλά κτίρια που επηρεάζουν το μετασχηματισμό, ωστόσο οι δρόμοι και τα χαμηλά κτίρια έχουν αντιστοιχηθεί σωστά.

4.7(i) πριν την αντιστοίχιση παρατηρούνται ασυνέχειες στο οδικό δίκτυο και διαφορές στο κεντρικό κτιριακό συγκρότημα. Τα προβλήματα αυτά επιλύονται μετά το μετασχηματισμό στο σχήμα 4.7(ii), με το πρόβλημα στα ψηλά κτίρια να παραμένει.

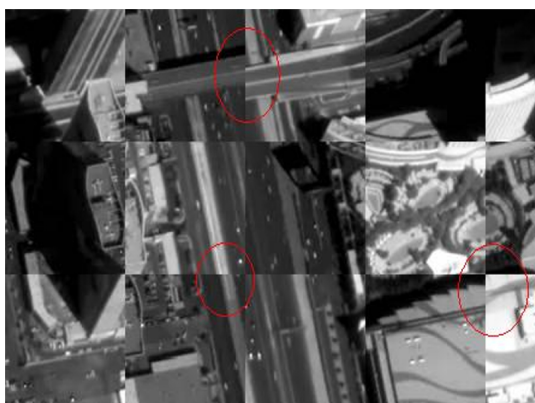
Συνεχίζοντας με τα αποτελέσματα των δορυφορικών εικόνων, στο σχήμα 4.8 βρίσκονται οι σκακιέρες από την αντιστοίχιση της εικόνας του Quickbird από το 2006 στην εικόνα του O.K.X.E.. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 4.8(i) πριν την αντιστοίχιση παρατηρούνται οι ασυνέχειες στο οδικό δίκτυο σε διάφορα σημεία της εικόνας. Στο σχήμα 4.8(ii) έχει γίνει αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο ενώ



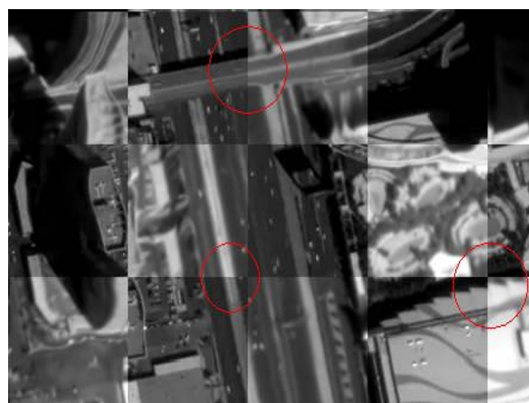
(i) Περιοχές του σχήματος 4.3(i) προς εστίαση



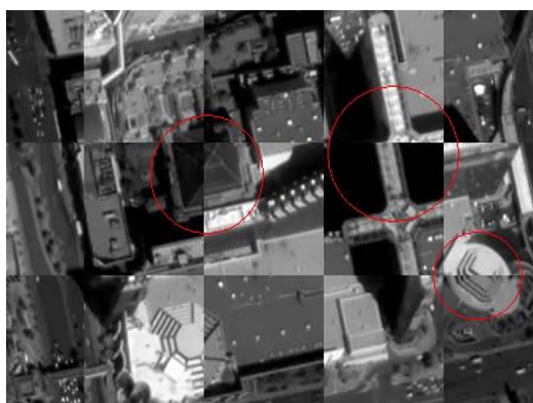
(ii) Περιοχές του σχήματος 4.3(ii) προς εστίαση



(iii) Πρώτη εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση



(iv) Πρώτη εστιασμένη περιοχή μετά την αντιστοίχιση



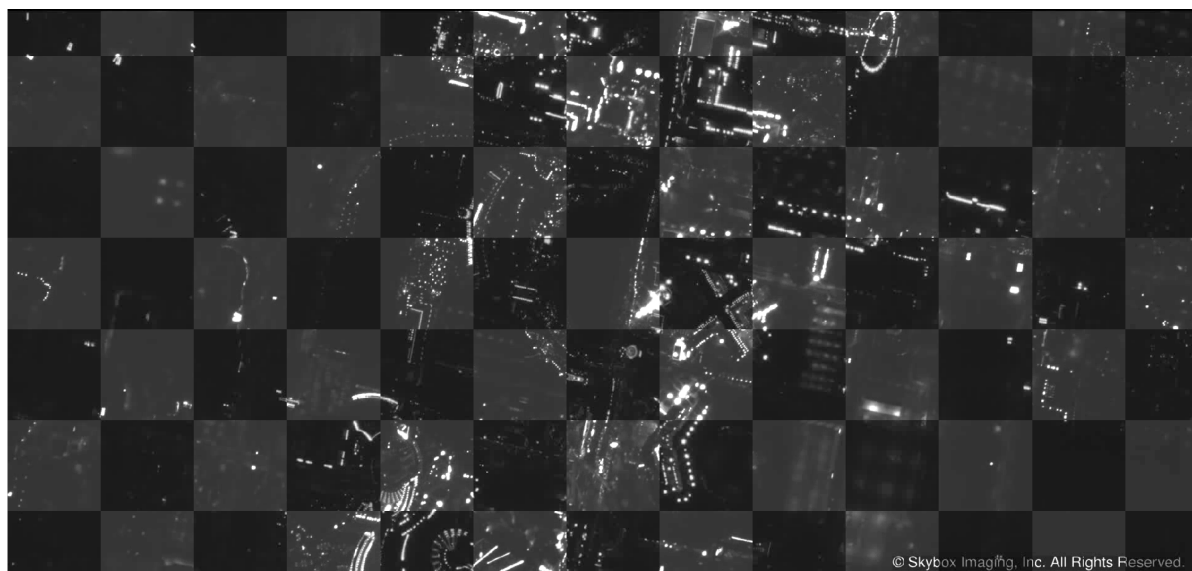
(v) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση



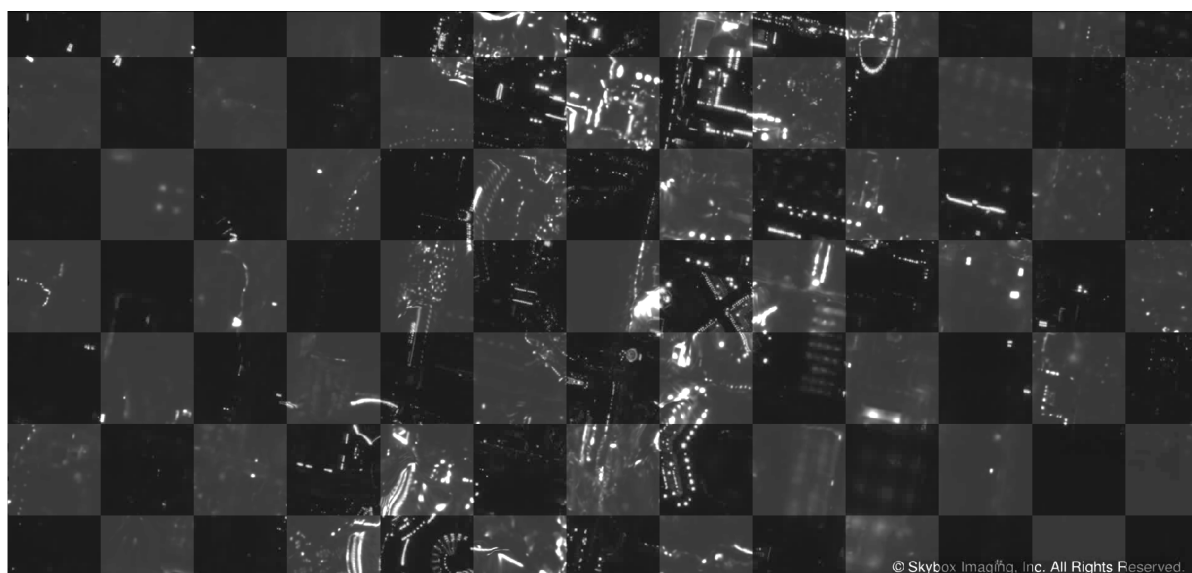
(vi) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή μετά την αντιστοίχιση

Σχήμα 4.4: Εστιασμένες περιοχές από τα δεδομένα του σχήματος 4.3. Οι εικόνες αριστερά είναι πριν την αντιστοίχιση και δεξιά μετά. Τα αποτελέσματα είναι με τη χρήση της πρώτης μεθόδου, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι δρόμοι και τα χαμηλά κτίρια αντιστοιχίζονται σωστά, ωστόσο προβλήματα παραμένουν στα ψηλά κτίρια. Οι παραμορφώσεις στις άκρες του σταυροειδούς κτιρίου της δεύτερης περιοχής δημιουργούνται εξαιτίας του απαιτητικού μετασχηματισμού, η χρήση του οποίου είναι αναγκαία λόγω των πολλών κτιρίων και της μεγάλης διαφοράς ανάμεσα στη γωνία λήψης των εικόνων.

στο σχήμα 4.8(iii) με τη δεύτερη. Το αποτέλεσμα της πρώτης μεθόδου είναι καλύτερο ποσοτικά, 1.9 εικονοστοιχεία περίπου έναντι 4.6, ωστόσο ποιοτικά δε διαφέρει πολύ. Όμοια στο σχήμα 4.9 έχουμε την ίδια περιοχή και την εικόνα του Worldview-2 από το 2011 που αντιστοιχίζεται στην εικόνα του O.K.X.E.. Στο σχήμα 4.9(i) είναι το σετ πριν την αντιστοίχιση, με παρόμοια προβλήματα με το προηγούμενο, στο σχήμα 4.9(ii) το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης με την πρώτη μέθοδο και στο 4.9(iii)



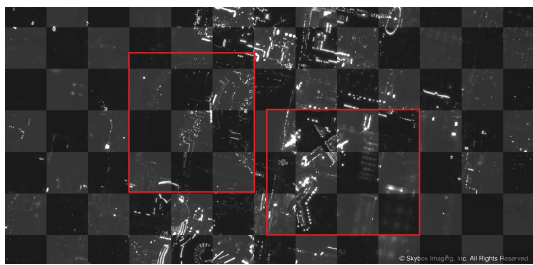
(i) Καρέ από το βίντεο της νυχτερινής λήψης του *Las Βέγκας* πριν την αντιστοίχιση



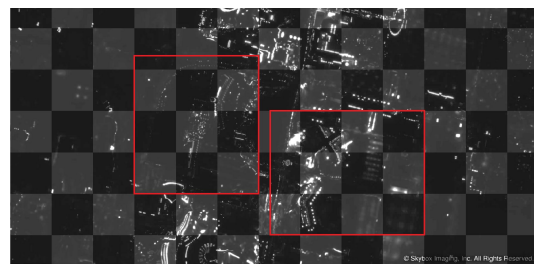
(ii) Καρέ από το βίντεο της νυχτερινής λήψης του *Las Βέγκας* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.5: Το πρώτο και το τελευταίο καρέ από το βίντεο της *Skybox Imaging* που απεικονίζει το *Las Βέγκας* σε νυχτερινή λήψη. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, καθώς η δεύτερη δεν ήταν ικανή να τα αντιστοιχίσει. Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτού του σετ είναι ότι οι σχηματισμοί που παρατηρούνται προέρχονται από το φωτισμό. Η γεωμετρία των κτιρίων αποκαθίσταται σε μεγάλο βαθμό μετά την αντιστοίχιση, με μερικές ατέλειες να παραμένουν ανά περιοχές.

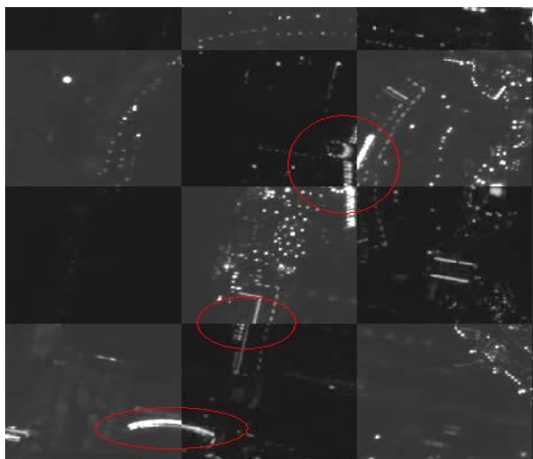
με τη δεύτερη. Εδώ το σφάλμα της πρώτης μεθόδου ανέρχεται σε 2.1 εικονοστοιχεία και της δεύτερης σε 7.2. Η διαφορά αυτή γίνεται αντιληπτή και ποιοτικά όπως φαίνεται και από την κυκλωμένη περιοχή στο πάνω μέρος των εικόνων, καθώς στο σχήμα 4.9(iii) δεν αντιστοιχίζεται το ίδιο καλά. Στο σχήμα 4.10 βρίσκονται οι σκακιέρες πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας του *Landsat-8* στην εικόνα του *Sentinel-2* και με τις δύο μεθόδους. Στο σχήμα 4.11(i) απεικονίζεται μια εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση, με προβλήματα στην ακτογραμμή και στο περιγράμμα της λίμνης. Τα προβλήματα



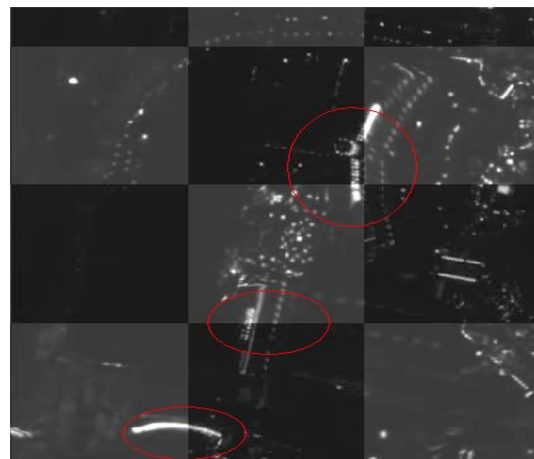
(i) Περιοχές του σχήματος 4.5(i) προς εστίαση



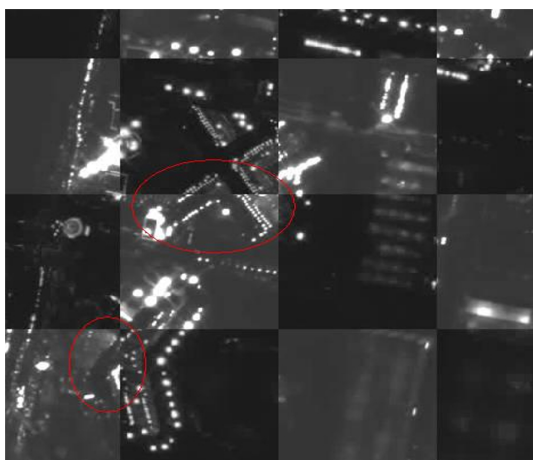
(ii) Περιοχές του σχήματος 4.5(ii) προς εστίαση



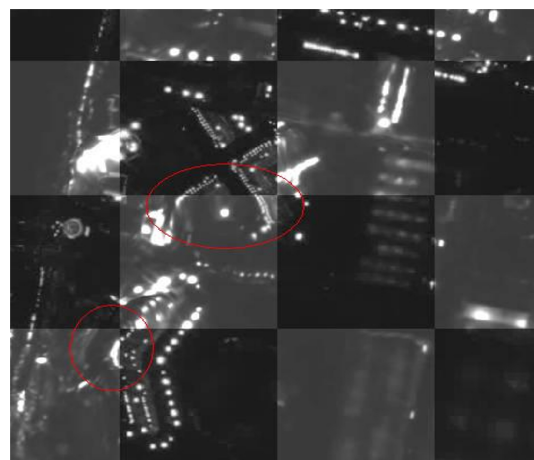
(iii) Πρώτη εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση



(iv) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή μετά την αντιστοίχιση



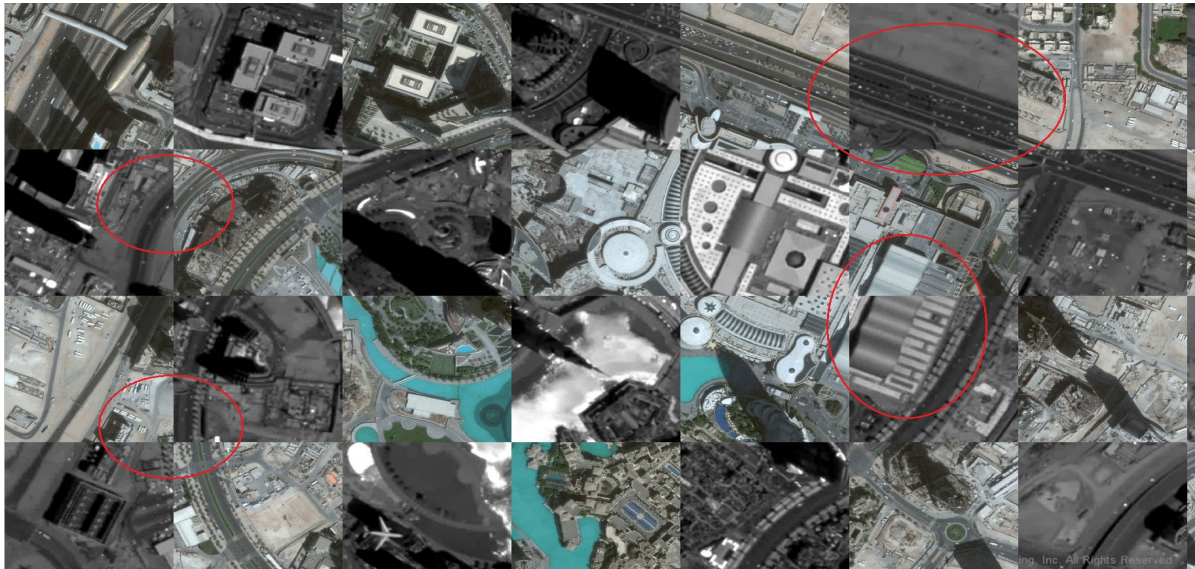
(v) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή πριν την αντιστοίχιση



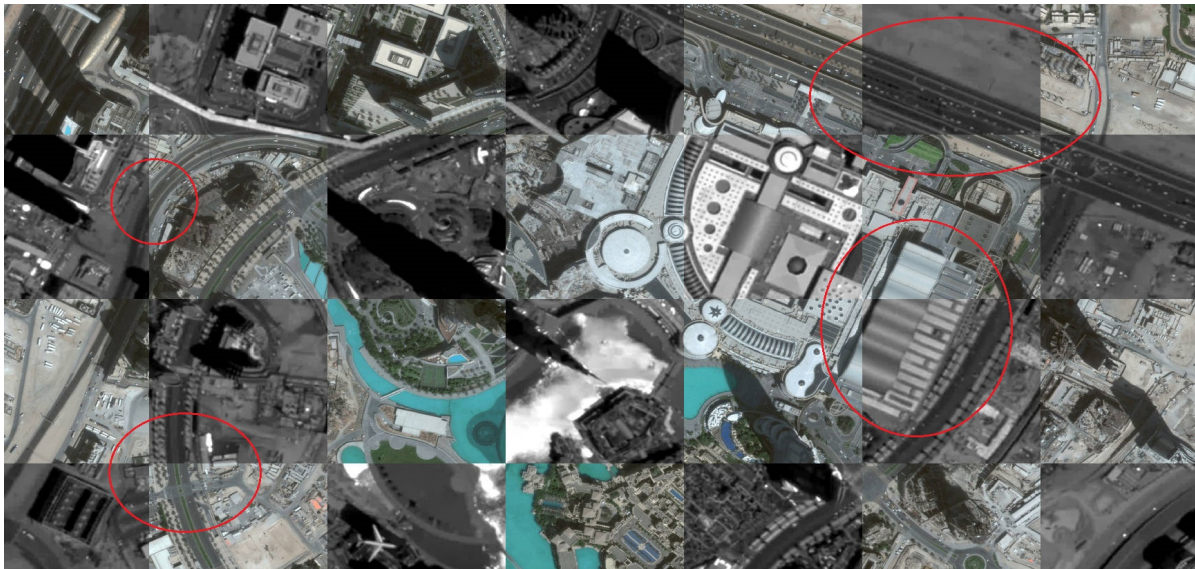
(vi) Δεύτερη εστιασμένη περιοχή μετά την αντιστοίχιση

Σχήμα 4.6: Εστιασμένες περιοχές από τα δεδομένα του σχήματος 4.5. Αριστερά πριν και δεξιά μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο. Τα κτίρια επανέρχονται στις σωστές θέσεις τους. Το μέσο σφάλμα της αντιστοίχισης είναι 13.7 εικονοστοιχεία, ωστόσο οφείλεται αρκετά στη δυσκολία συλλογής σημείων ελέγχου. Λαμβάνοντας υπόψιν και την ιδιαιτερότητα αυτών των δεδομένων, η αντιστοίχιση είναι επιτυχή.

αυτά αποκαθίστανται μετά την αντιστοίχιση, σχήματα 4.11(ii) (MR) και 4.11(iii) (DR). Η πρώτη μέθοδος παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα κατά 1.5 εικονοστοιχεία περίπου, 2.3 έναντι 3.9, ωστόσο σε αυτή την ανάλυση (30m) δεν υπάρχει κάποια ποιοτικά εμφανής διαφορά. Στα σχήματα 4.12 και 4.13 απεικονίζεται σε σκακιέρες η εικόνα του Chris Proba-V πριν και μετά την αντιστοίχιση της με την πρώτη μέθοδο



(i) Το πρώτο καρέ από το βίντεο της περιοχής του *Burj Khalifa* πριν την αντιστοίχιση σε εικόνα-μωσαϊκό της Google



(ii) Το πρώτο καρέ από το βίντεο της περιοχής του *Burj Khalifa* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο στην εικόνα της Google

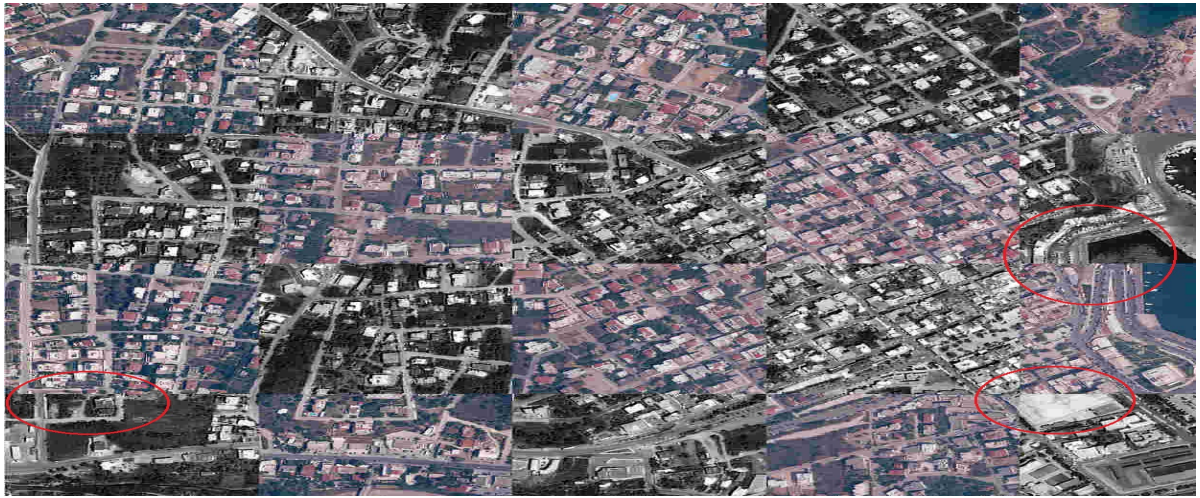
Σχήμα 4.7: Αντιστοίχιση του πρώτου καρέ του βίντεο της *Skybox Imaging* από το *Burj Khalifa* σε εικόνα-μωσαϊκό της Google. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου (MR). Η DR δεν ήταν ικανή να μετασχηματίσει σωστά την εικόνα. Το οδικό δίκτυο, οι σχηματισμοί του εδάφους, τα χαμηλά και μεσαίου ύψους κτίρια έχουν αντιστοιχηθεί σωστά. Πρόβλημα αποτελούν τα ψηλά κτίρια που εξαιτίας της αλλαγής κλίσης και της φαινομενικής μετατόπισης που αυτή προκαλεί, δεν καταφέρνουν να αντιστοιχηθούν.

στις εικόνες των Sentinel-1 και Sentinel-2. Εστιάζοντας σε υποπεριοχές, στο σχήμα 4.14(i) πριν την αντιστοίχιση στο Sentinel-1, διακρίνονται οι ασυνέχειες στην ακτογραμμή και το οδικό δίκτυο. Στο σχήμα 4.14(ii) μετά την αντιστοίχιση τα αρχικά προβλήματα έχουν λυθεί. Όμοια, στα σχήματα 4.14(iii) και 4.14(iv) βρίσκεται εστιασμένη υποπεριοχή πριν και μετά την αντιστοίχιση στο Sentinel-2, όπου το περίγραμμα της λίμνης έχει διορθωθεί μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου. Στη συνέχεια, στο

σχήμα 4.15 έχουμε τις σκακιέρες πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας-μωσαϊκό της Google στην εικόνα του Sentinel-1 με την πρώτη μέθοδο, ενώ στο σχήμα 4.16 γίνεται αντιστοίχιση της ίδιας εικόνας στην εικόνα του Sentinel-2 και με τις δύο μεθόδους.

Στο σχήμα 4.17 παρατηρούνται οι ασυνέχειες του οδικού δικτύου πριν την αντιστοίχιση (4.17(i),4.17(iii)) και η αποκατάστασή τους μετά από αυτή (4.17(ii), 4.17(iv), 4.17(v)) Ακολουθώντας το ίδιο μοτίβο, στο σχήμα 4.18 είναι οι σκακιέρες πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας του Modis στην εικόνα του Sentinel-1 με την πρώτη μέθοδο, ενώ στο σχήμα 4.19 βρίσκονται οι σκακιέρες από την αντιστοίχιση της εικόνας τους Sentinel-1 στην εικόνα του Sentinel-2 με την ίδια μέθοδο.

Τέλος, στο σχήμα 4.22(i) βρίσκεται η εικόνα της Planet Labs πριν την αντιστοίχιση σε εικόνα-μωσαϊκό της Google. Παρατηρούνται οι ασυνέχειες του οδικού δικτύου σε αρκετά σημεία. Στο σχήμα 4.22(ii) είναι το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης με την πρώτη μέθοδο και στο σχήμα 4.22(iii) με τη δεύτερη. Η αντιστοίχιση είναι εξίσου καλή και με τις δύο μεθόδους, γεγονός που συμφωνεί και με τα σφάλματα που μετρήθηκαν και είναι 2.2 εικονοστοιχεία για την πρώτη και 2.5 για τη δεύτερη (πίνακας 4.3).



(i) Η εικόνα του *Quickbird 2006* πριν την αντιστοίχιση

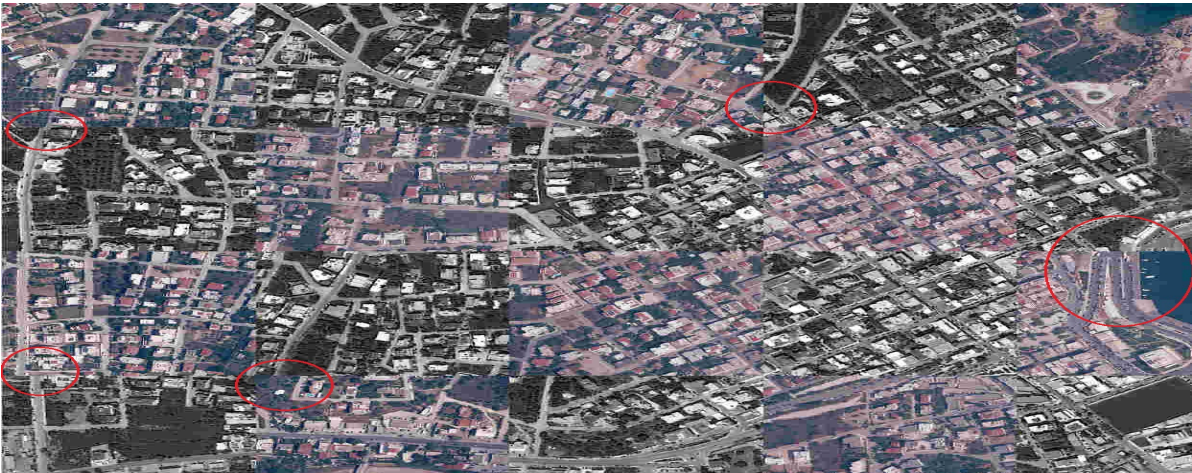


(ii) Η εικόνα του *Quickbird 2006* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

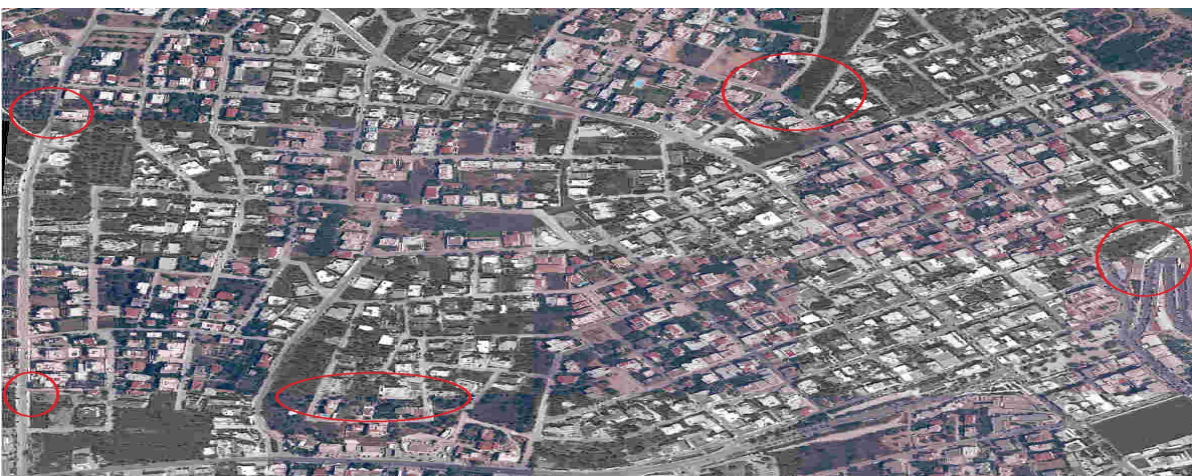


(iii) Η εικόνα του *Quickbird 2006* μετά την αντιστοίχιση με την δεύτερη μέθοδο

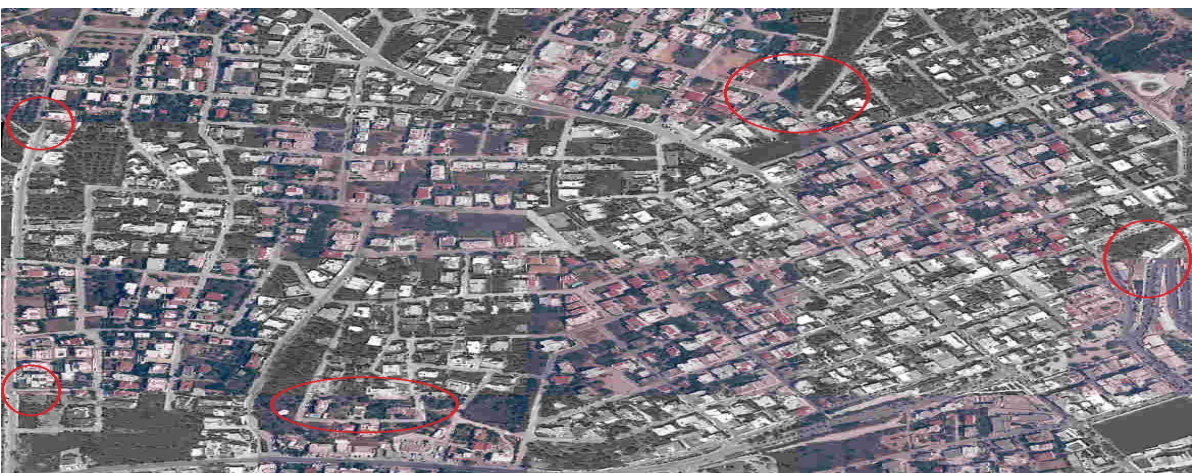
Σχήμα 4.8: Αντιστοίχιση της *Quickbird 2006* από περιοχή της Ραφήνας σε δεδομένα του Ο.Κ.Χ.Ε.. Πριν και μετά την εφαρμογή των δυο μεθόδων. Η αντιστοίχιση είναι επιτυχής και στις δυο περιπτώσεις. Το μέσο σφάλμα της απόστασης για την πρώτη μέθοδο ανέρχεται περίπου στα 2 εικονοστοιχεία, ενώ για τη δεύτερη στα 4.5.



(i) Δεδομένα του 2011 από τον δορυφόρο *Worldview-2* πριν την αντιστοίχιση

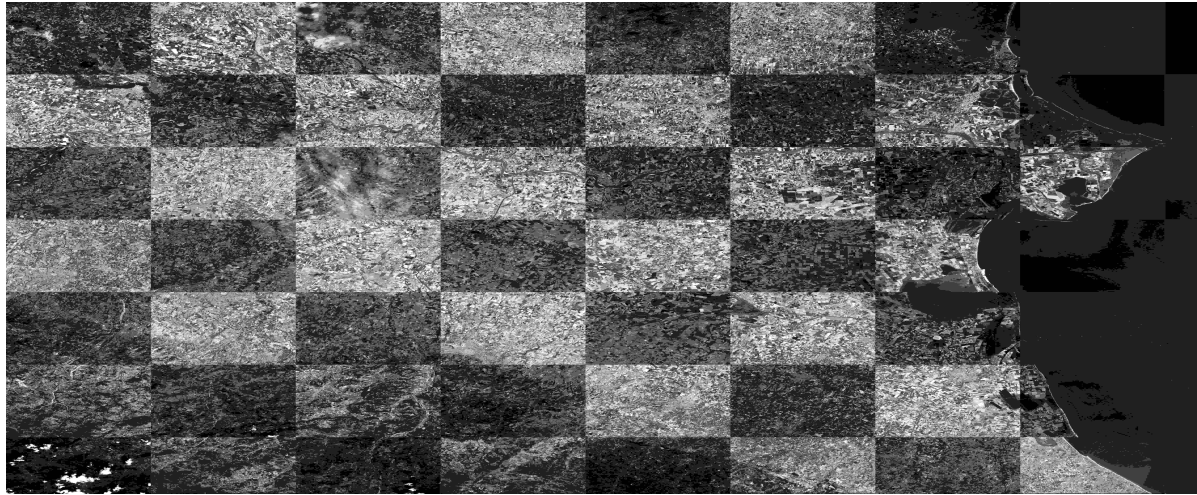


(ii) Η εικόνα του 2011 από *Worldview-2* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

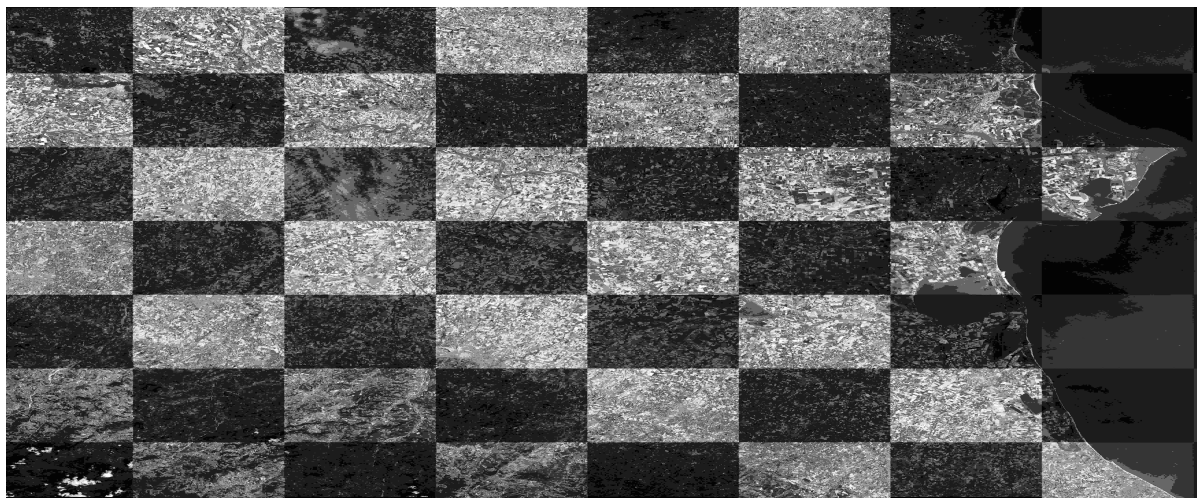


(iii) Η εικόνα του 2011 από *Worldview-2* μετά την αντιστοίχιση με την δεύτερη μέθοδο

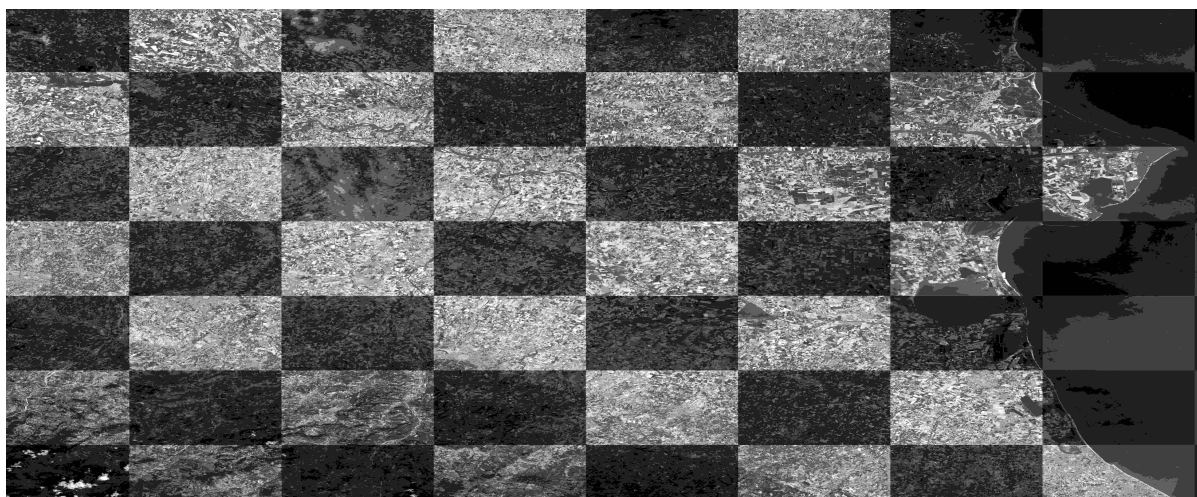
Σχήμα 4.9: Αντιστοίχιση της *Worldview-2* εικόνας του 2011 με δεδομένα του *O.K.X.E.*. Καλύπτει την ίδια περιοχή με τα *Quickbird* δεδομένα του σχήματος 4.8. Το σφάλμα μέσης απόστασης της πρώτης μεθόδου ανέρχεται στα 2 εικονοστοιχεία περίπου ενώ, της δεύτερης στα 7. Λαμβάνοντας υπόψιν την υψηλή ανάλυση της εικόνας, τα 7 εικονοστοιχεία είναι αρκετά μεγάλη τιμή και αυτό αντικατοπτρίζεται και στο αποτέλεσμα καθώς έχουν παραμείνει προβλήματα σε ορισμένα σημεία.



(i) Η δορυφορική εικόνα του *Landsat-8* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*



(ii) Η δορυφορική εικόνα του *Landsat-8* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

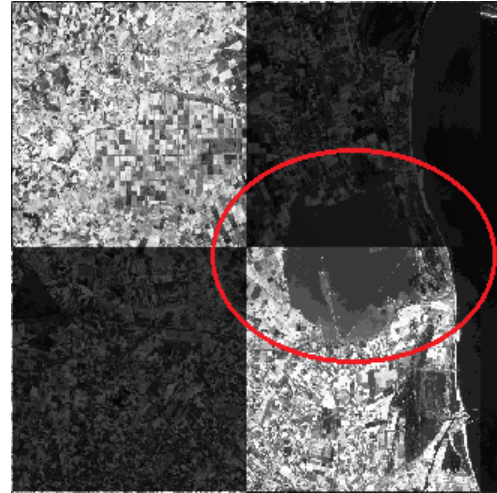


(iii) Η δορυφορική εικόνα του *Landsat-8* μετά την αντιστοίχιση με τη δεύτερη μέθοδο

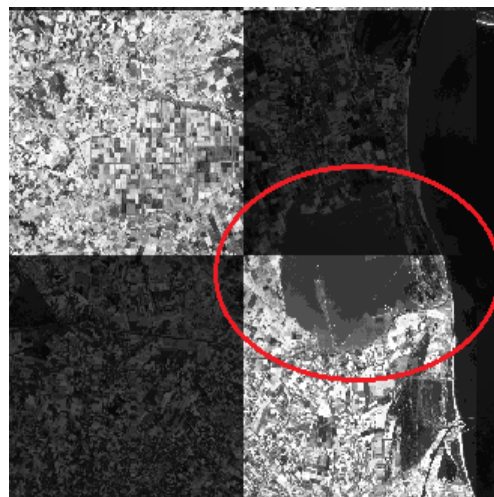
Σχήμα 4.10: Πριν και μετά την αντιστοίχιση της *Landsat-8* εικόνας με την εικόνα του *Sentinel-2*. Η αντιστοίχιση έγινε και με τις δύο μεθόδους και καλύπτει μια ευρεία περιοχή στη Νότια Ιταλία.



(i) Εστιασμένη περιοχή από *Landsat-8* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*

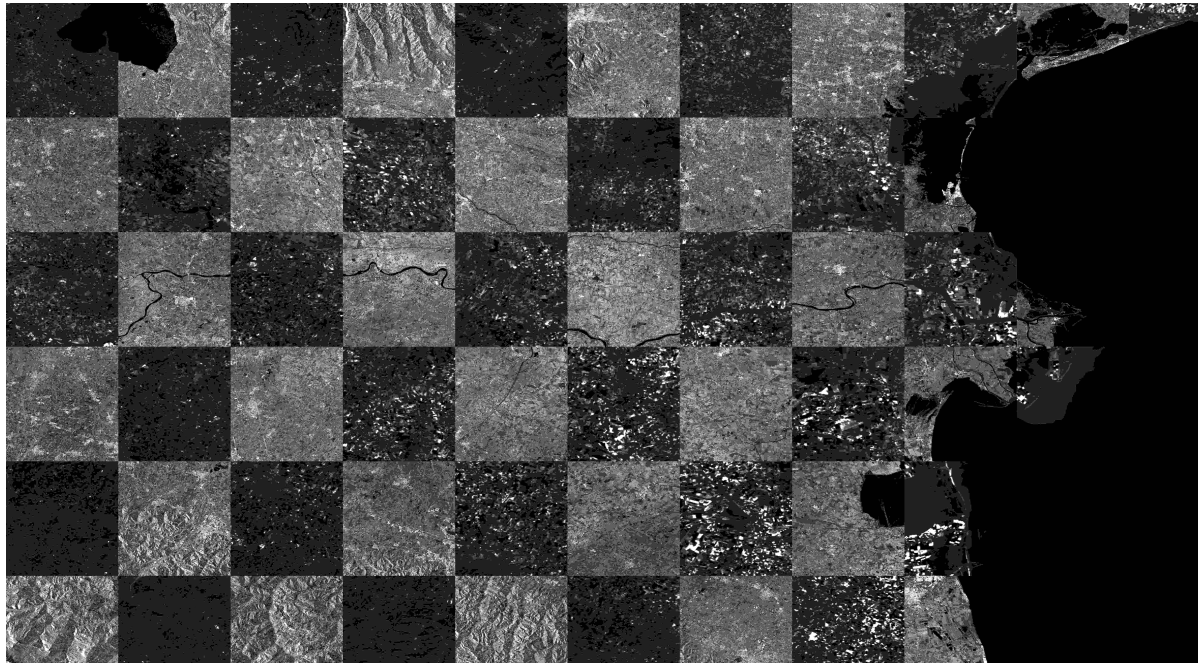


(ii) Εστιασμένη περιοχή από *Landsat-8* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

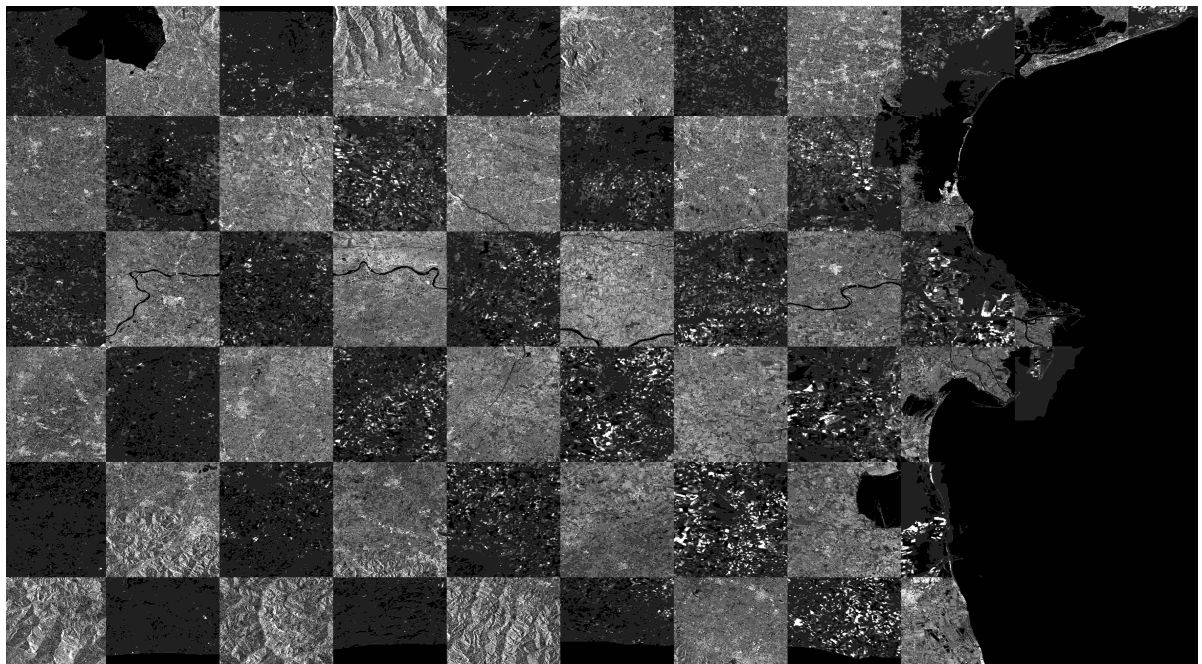


(iii) Εστιασμένη περιοχή από *Landsat-8* μετά την αντιστοίχιση με την δεύτερη μέθοδο

Σχήμα 4.11: Εστιασμένη περιοχή πριν και μετά την αντιστοίχιση της *Landsat-8* εικόνας με την εικόνα του *Sentinel-2*. Στην εικόνα (i) είναι ορατή η παραμόρφωση της λίμνης και της ακτογραμμής λόγω της μη αντιστοίχισης των εικόνων. Στις εικόνες (ii) και (iii) η ακτογραμμή έχει επανέρθει στη θέση της και το περίγραμμα της λίμνης έχει διορθωθεί.

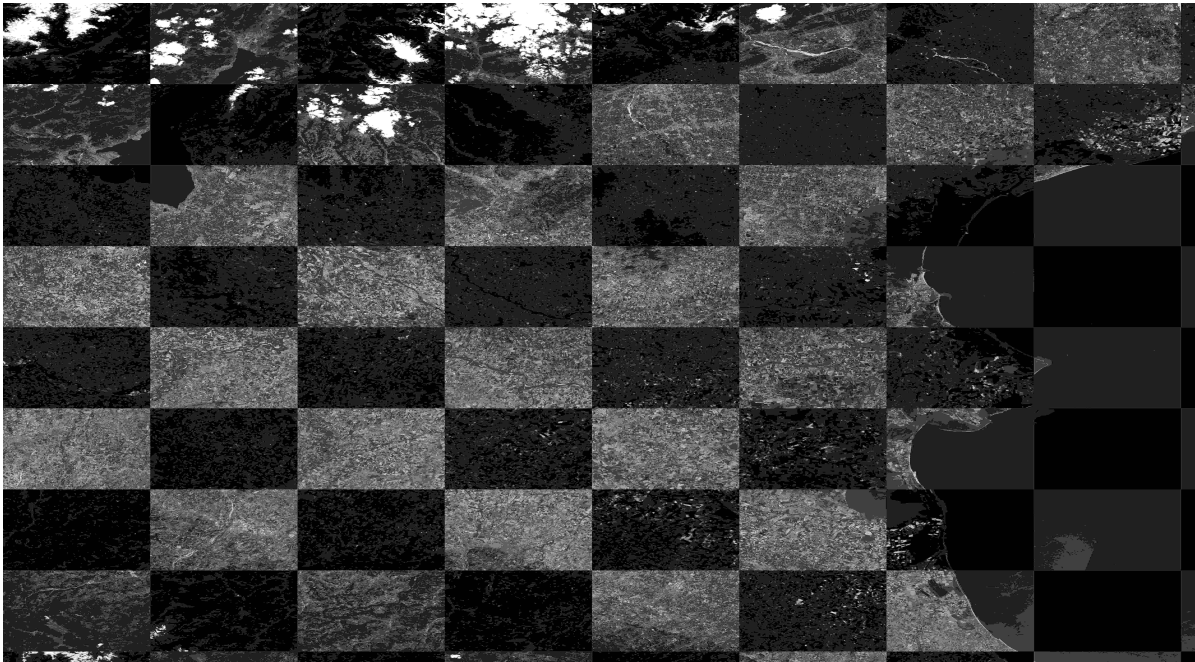


(i) *Chris Proba-V* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-1*

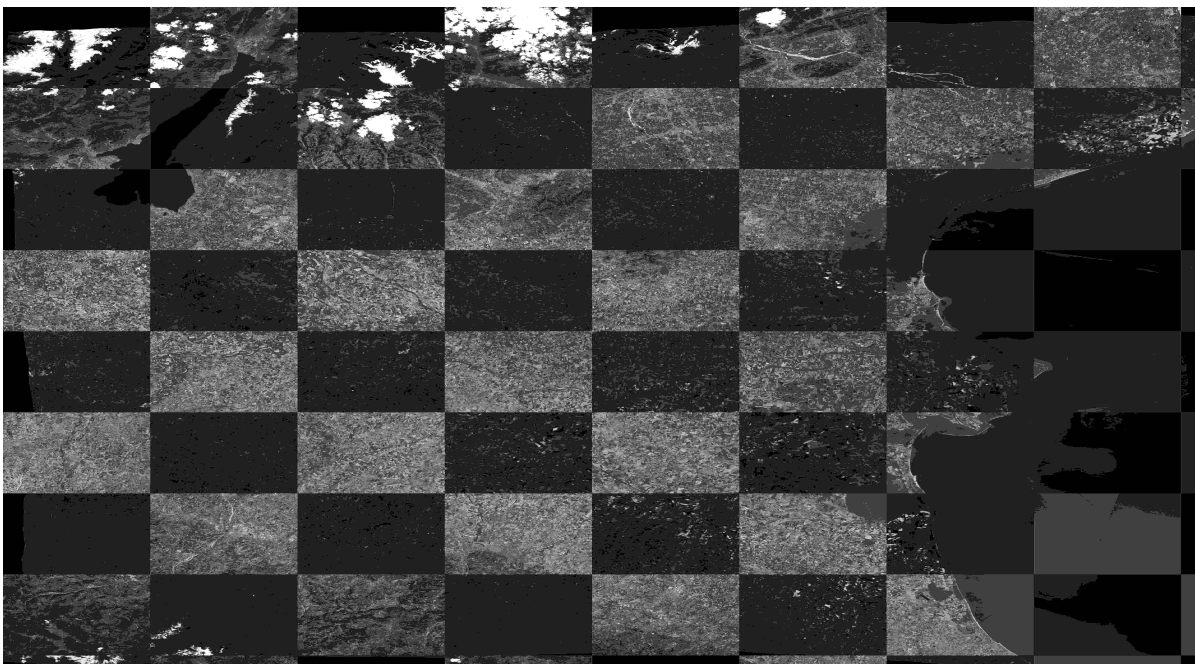


(ii) *Chris Proba-V* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-1* με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.12: Πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας από *Chris Proba-V* με την εικόνα του *Sentinel-1*. Η αντιστοίχιση έγινε με την πρώτη μέθοδο, καθώς η δεύτερη δεν ήταν αποτελεσματική. Απεικονίζει την ίδια περιοχή στην Ιταλία με την εικόνα 4.10.



(i) *Chris Proba-V* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2

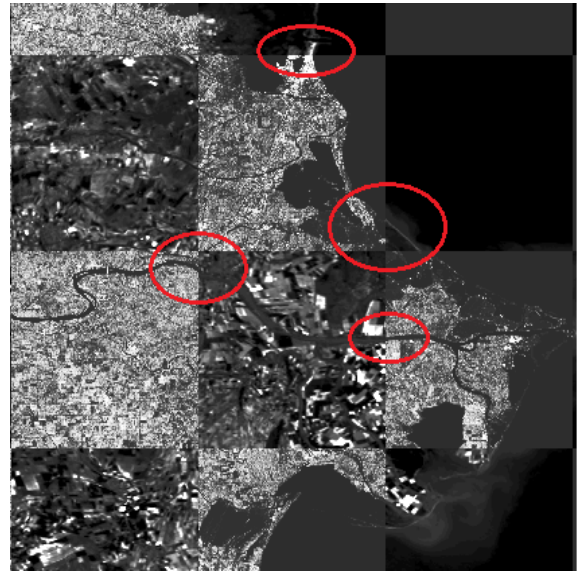


(ii) *Chris Proba-V* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2 με την πρώτη μέθοδο

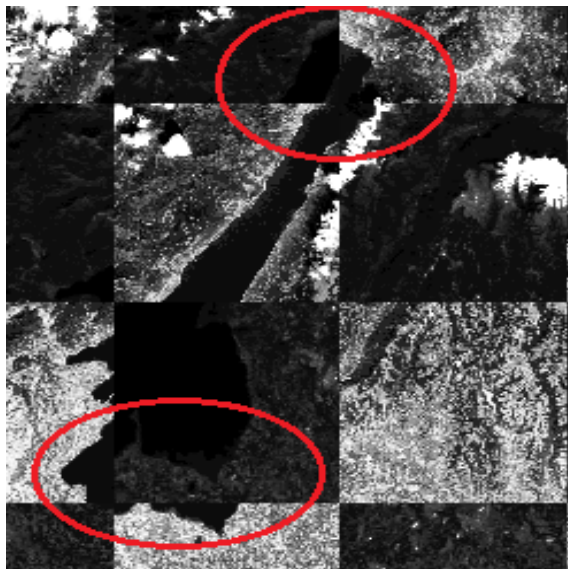
Σχήμα 4.13: Πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας από *Chris Proba-V* με την εικόνα του Sentinel-2. Όμοια με το σχήμα 4.12, η αντιστοίχιση έγινε με την πρώτη μέθοδο και απεικονίζει την ίδια σχεδόν περιοχή.



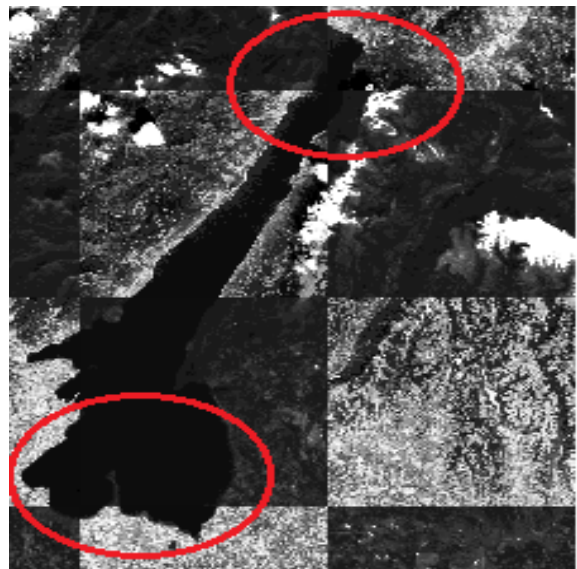
(i) Εστιασμένη περιοχή από *Chris Proba-V* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-1



(ii) Εστιασμένη περιοχή από *Chris Proba-V* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-1 με την πρώτη μέθοδο

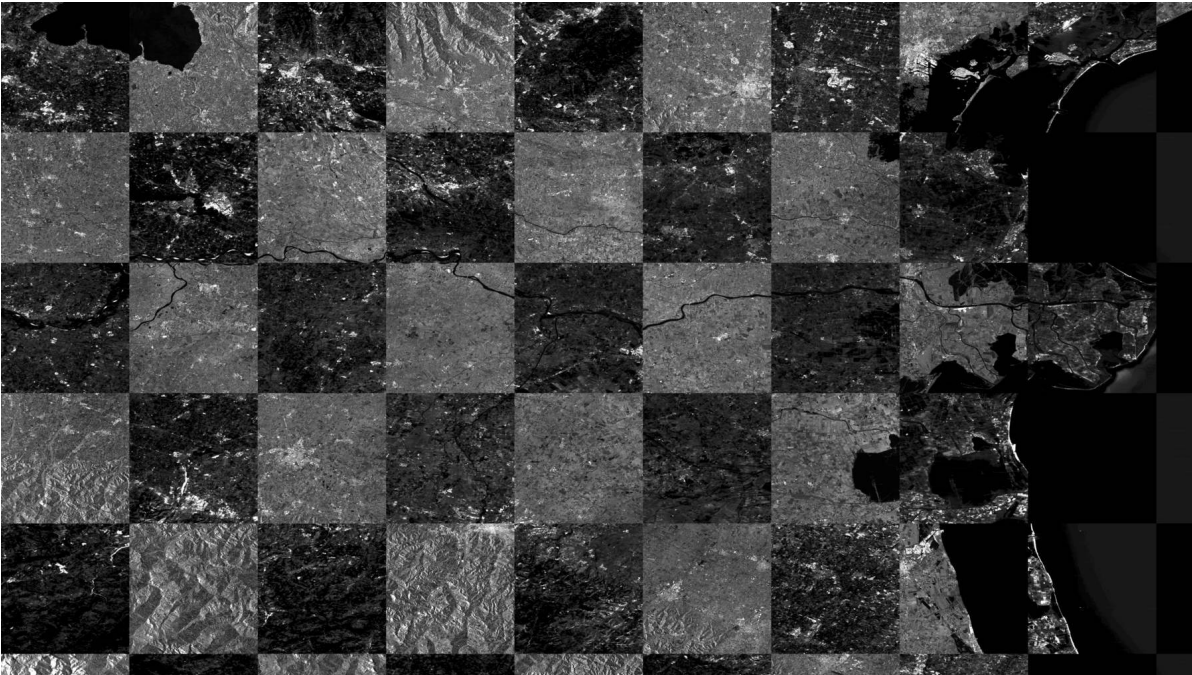


(iii) Εστιασμένη περιοχή από *Chris Proba-V* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2

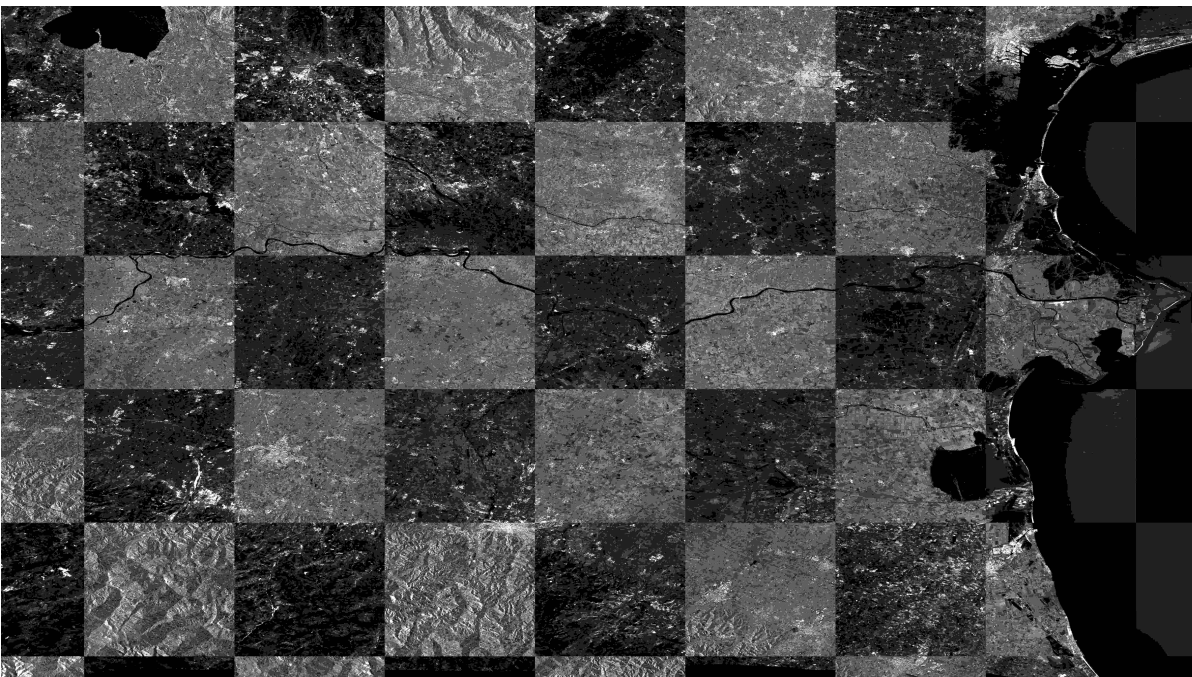


(iv) Εστιασμένη περιοχή από *Chris Proba-V* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2 με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.14: Εστιασμένες περιοχές πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας από *Chris Proba-V* με τις εικόνες των Sentinel-1 και Sentinel-2. Στην εικόνα (i) διακρίνονται οι διαταραχές στο οδικό δίκτυο και την ακτογραμμή ενώ στην εικόνα (iii) το λάθος περίγραμμα της λίμνης. Στις εικόνες (ii) και (iv) τα στοιχεία αυτά αποκαθίστανται με την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου. Τα σφάλματα αντιστοίχισης είναι φυσιολογικά με δεδομένη την χωρική ανάλυση των 100 μέτρων.

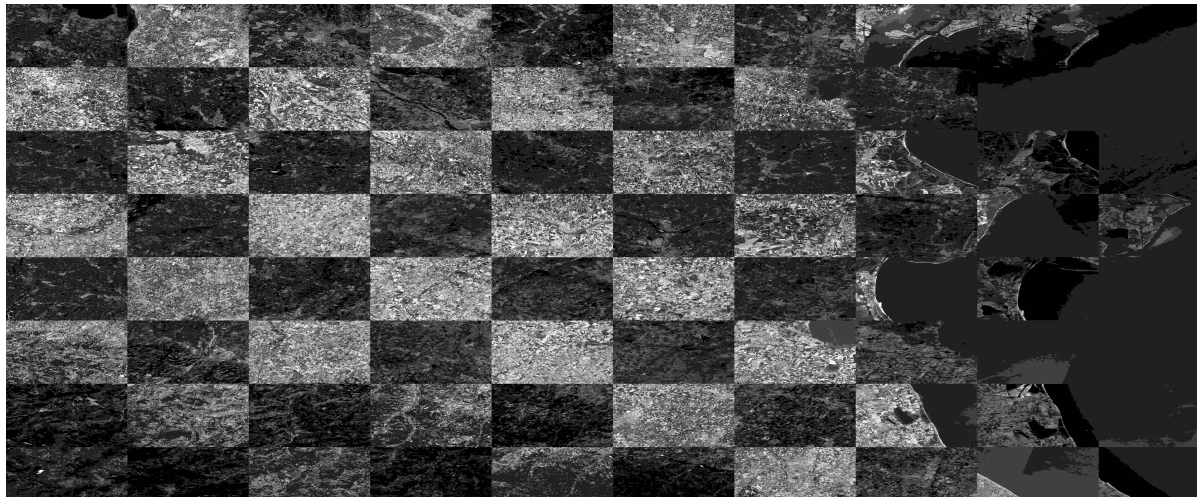


(i) Εικόνα-μωσαϊκό της *Google* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-1

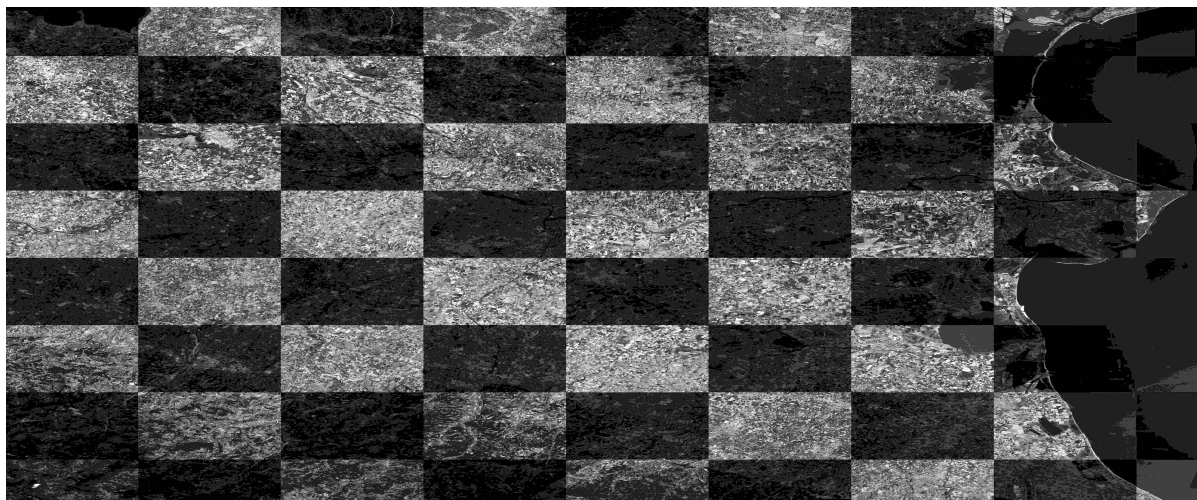


(ii) Εικόνα-μωσαϊκό της *Google* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-1 με την πρώτη μέθοδο

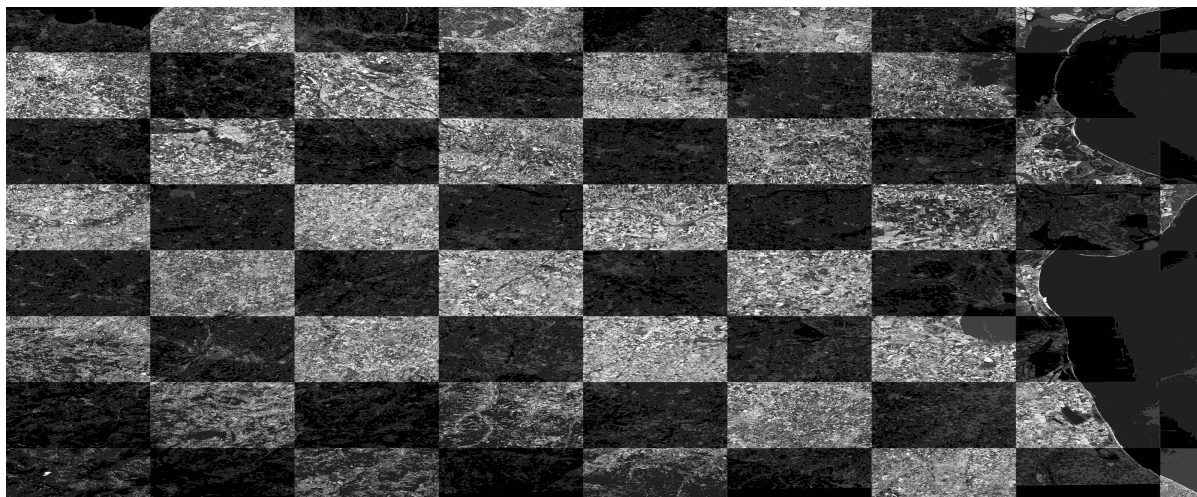
Σχήμα 4.15: Πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας της *Google* με την εικόνα του Sentinel-1. Όμοια με τα προηγούμενα σχήματα, απεικονίζει την ίδια περιοχή στην Ιταλία.



(i) Εικόνα-μωσαϊκό της *Google* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2

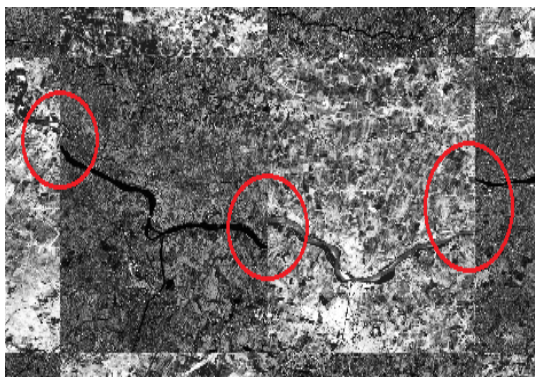


(ii) Εικόνα-μωσαϊκό της *Google* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2 με την πρώτη μέθοδο

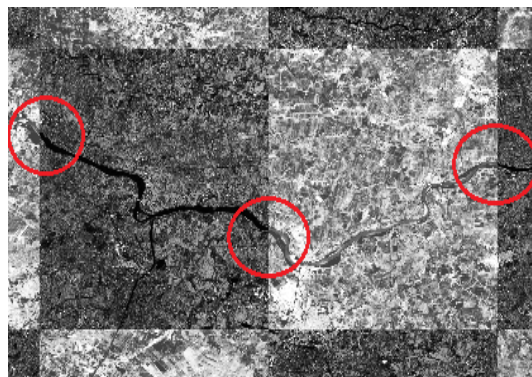


(iii) Εικόνα-μωσαϊκό της *Google* μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2 με τη δεύτερη μέθοδο

Σχήμα 4.16: Πριν και μετά την αντιστοίχιση της ίδιας με το σχήμα 4.15 εικόνας της *Google* με την εικόνα του Sentinel-2. Η αντιστοίχιση έγινε και με τις δύο μεθόδους.



(i) Εστιασμένη περιοχή από δορυφορική εικόνα της Google πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-1



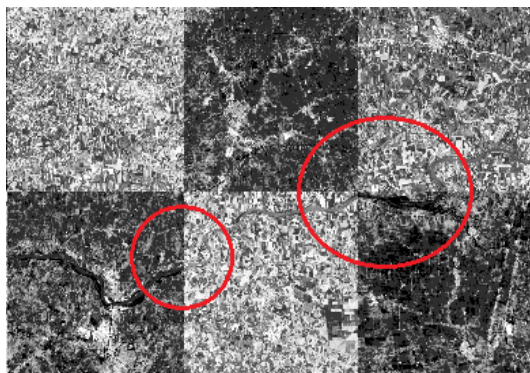
(ii) Εστιασμένη περιοχή από εικόνα-μωσαϊκό της Google μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-1 με την πρώτη μέθοδο



(iii) Εστιασμένη περιοχή από εικόνα-μωσαϊκό της Google πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2

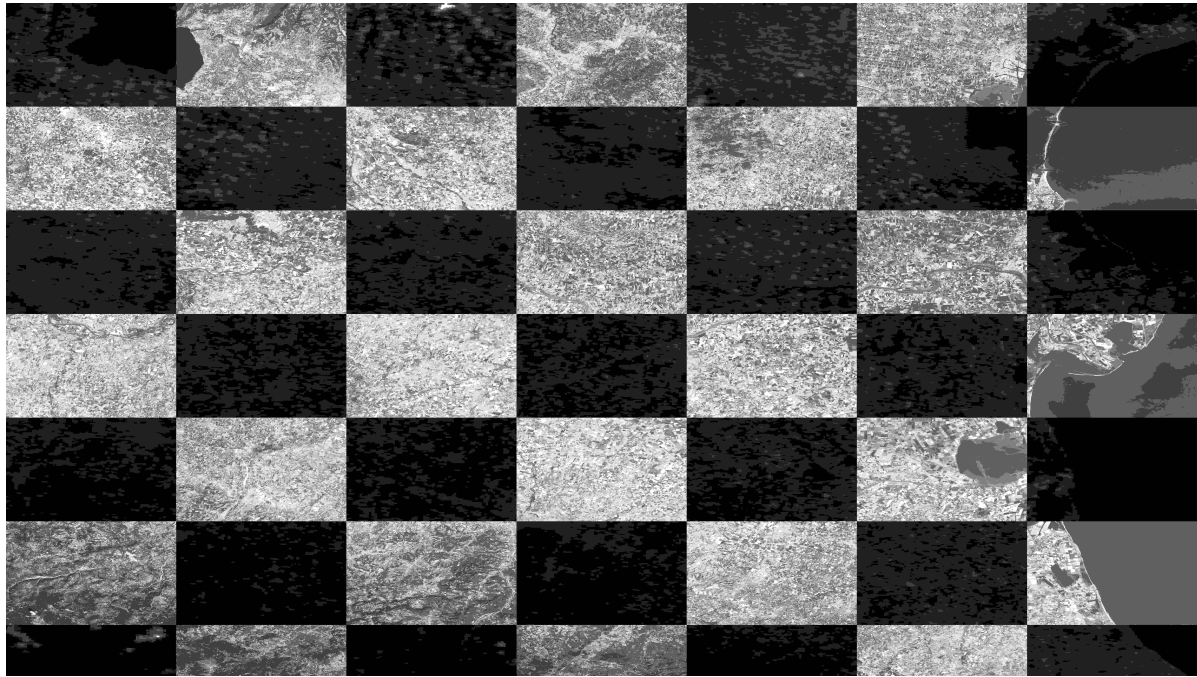


(iv) Εστιασμένη περιοχή από εικόνα-μωσαϊκό της Google μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2 με την πρώτη μέθοδο

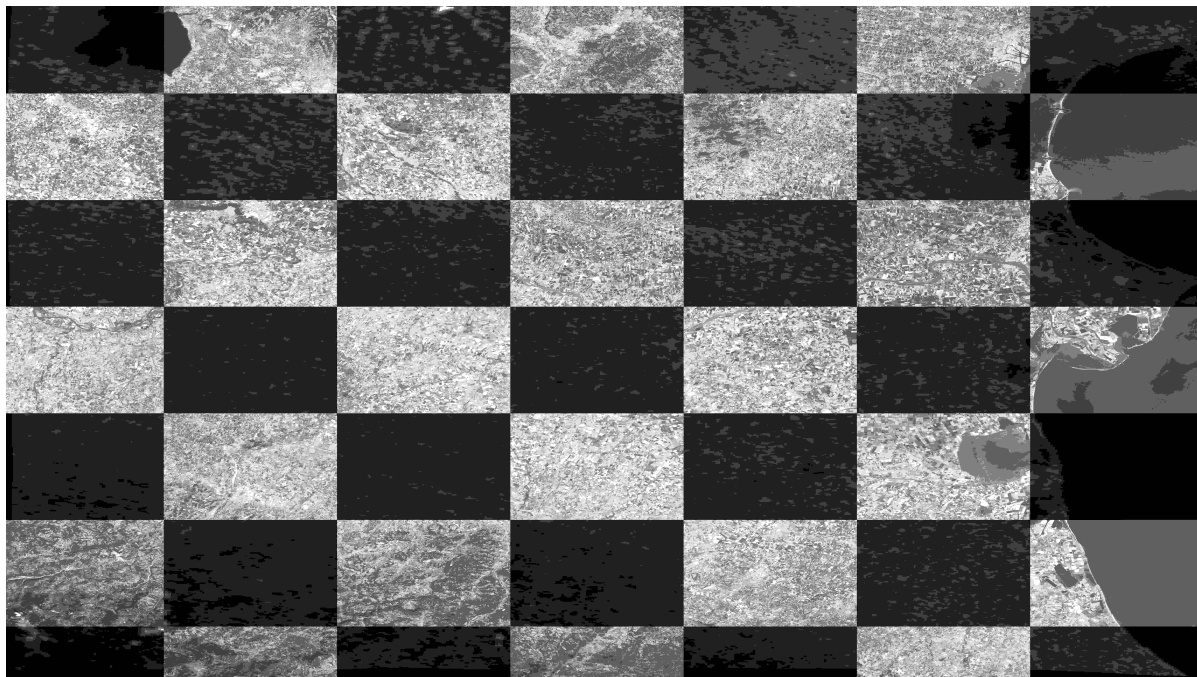


(v) Εστιασμένη περιοχή από εικόνα-μωσαϊκό της Google μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2 με τη δεύτερη μέθοδο

Σχήμα 4.17: Εστιασμένη περιοχή πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας της Google στις εικόνες των Sentinel-1 και Sentinel-2. Στις εικόνες (i) και (iii) διακρίνονται οι ασυνέχειες στους δρόμους, οι οποίες αποκαθίστανται στις εικόνες (ii), (iv) και (v). Η αντιστοίχιση στον Sentinel-1 επιτεύχθηκε με την πρώτη μέθοδο, ενώ στο Sentinel-2 και με τις δύο, έχοντας εξίσου καλό αποτέλεσμα. Το σφάλμα αντιστοίχισης ανέρχεται στα 7 εικονοστοιχεία περίπου για την εικόνα του Sentinel-1, 2,5 για την εικόνα του Sentinel-2 με την πρώτη μέθοδο και 6,5 με τη δεύτερη. Η διαφορά αυτή είναι φυσιολογική εξαιτίας της ραντάρ απεικόνισης και των δυσκολιών της, τόσο στην αντιστοίχιση όσο και στην συλλογή φωτοσταθερών.

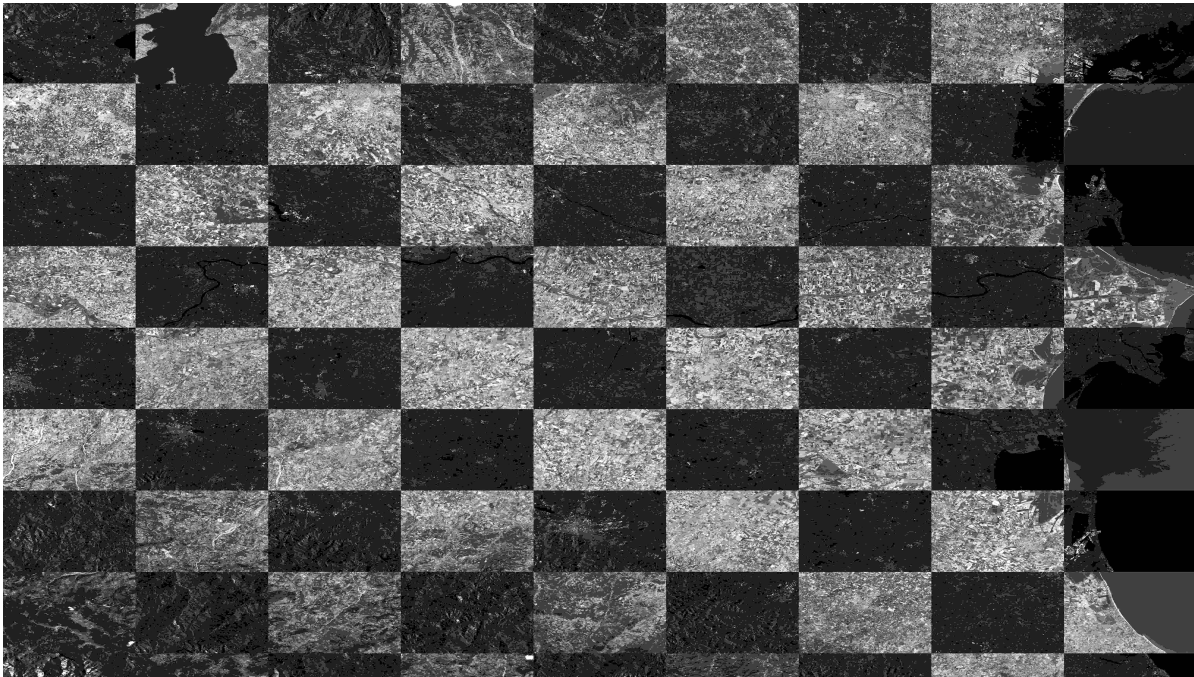


(i) Εικόνα του δορυφόρου *Modis* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2

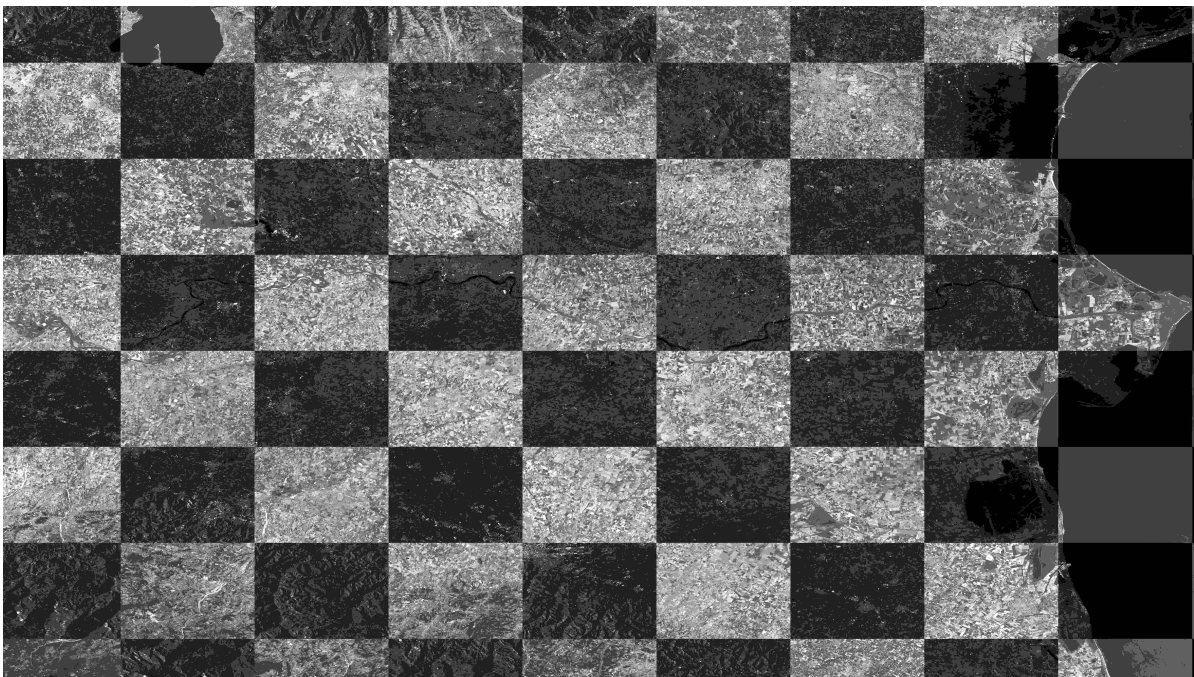


(ii) Εικόνα του δορυφόρου *Modis* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο στην εικόνα του Sentinel-2

Σχήμα 4.18: Αντιστοίχιση εικόνας *Modis* στην εικόνα του Sentinel-2. Η χαμηλή χωρική ανάλυση της εικόνας δεν κατέστησε ικανή την αντιστοίχιση με τη δεύτερη μέθοδο. Καλύπτει την ίδια περιοχή στη Νότια Ιταλία.

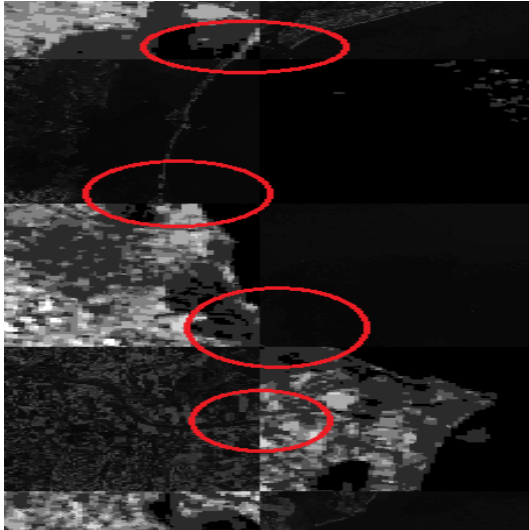


(i) Η εικόνα του *Sentinel-1* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*

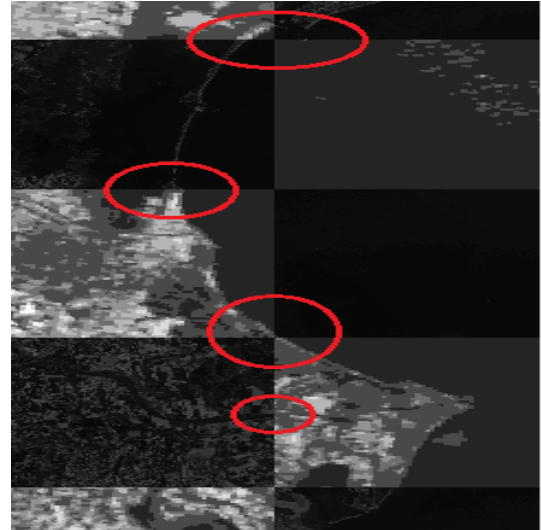


(ii) Το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης της *Sentinel-1* με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.19: Αντιστοίχιση της ραντάρ εικόνας του *Sentinel-1* στην εικόνα του *Sentinel-2*. Η δεύτερη μέθοδος (*DR*) ήταν αδύνατο να μετασχηματίσει ραντάρ απεικόνιση.

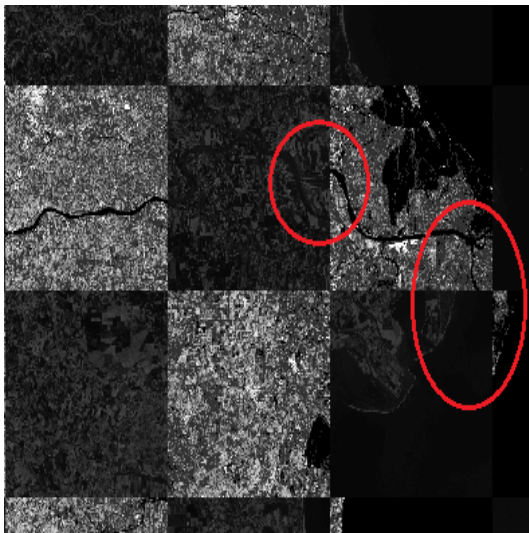


(i) Εστιασμένη περιοχή από την εικόνα του *Modis* πριν την αντιστοίχιση

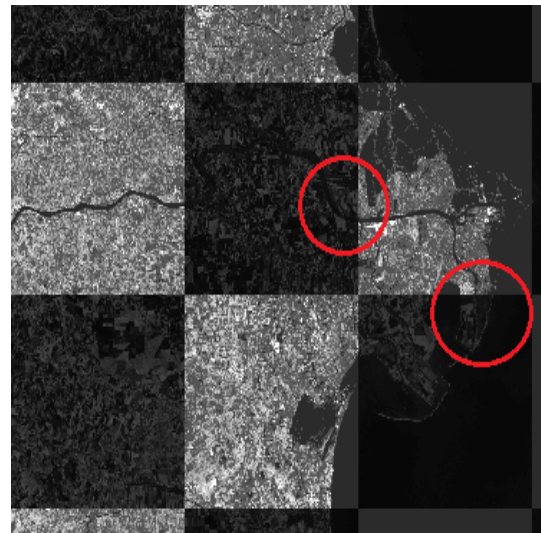


(ii) Εστιασμένη περιοχή από την εικόνα του *Modis* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

Σχήμα 4.20: Εστιασμένη περιοχή από την εικόνα *Modis* πριν και μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*. Η χαμηλή χωρική ανάλυση της εικόνας δημιούργησε δυσκολίες, ωστόσο η πρώτη μέθοδος (MR) κατάφερε να την αντιστοιχίσει επιτυχώς. Το μέσο σφάλμα απόστασης που μετρήθηκε στα 14 εικονοστοιχεία περίπου (πίνακας 4.3), εκ του αποτελέσματος φαίνεται ότι οφείλεται στη χαμηλή ανάλυση και στη δυσκολία συλλογής φωτοσταθερών για την αξιολόγηση.

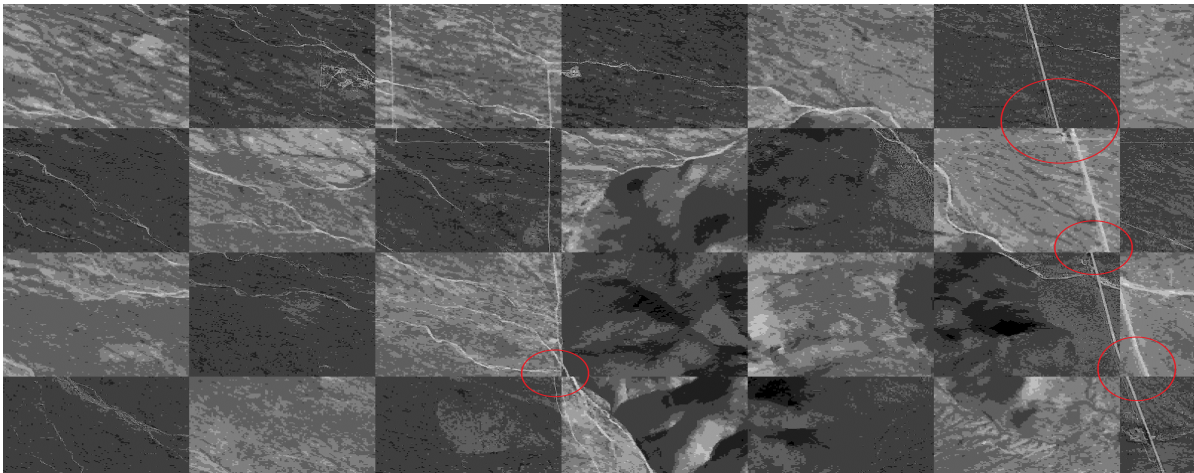


(i) Εστιασμένη περιοχή από *Sentinel-1* πριν την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*

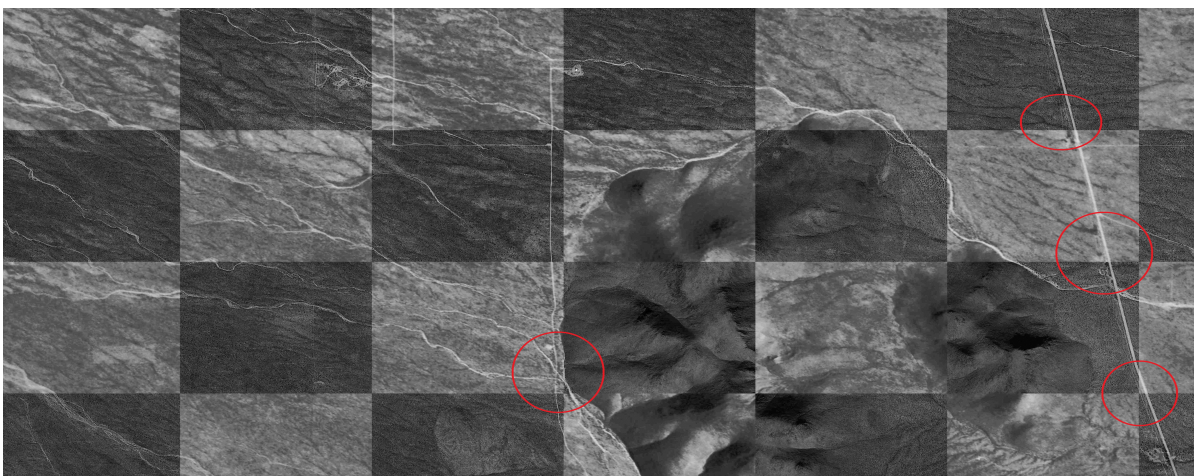


(ii) Εστιασμένη περιοχή από *Sentinel-1* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο

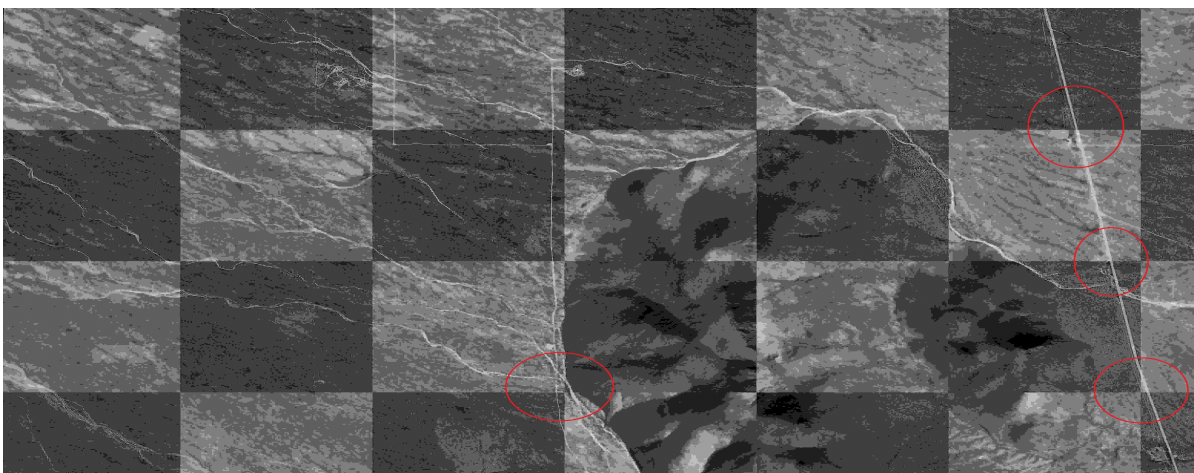
Σχήμα 4.21: Εστιασμένη περιοχή της *Sentinel-1* εικόνας πριν και μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*. Οι διαφορές στην ακτογραμμή και το κύριο οδικό δίκτυο πριν και μετά την διαδικασία είναι εμφανής. Το μέσο σφάλμα απόστασης της αντιστοίχισης είναι 5 εικονοστοιχεία, μια αρκετά καλή τιμή με δεδομένο ότι πρόκειται για ραντάρ απεικόνιση.



(i) Τα δεδομένα της *Planet Labs* πριν την αντιστοίχιση σε εικόνα της *Google*



(ii) Τα δεδομένα της *Planet Labs* μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο



(iii) Τα δεδομένα της *Planet Labs* μετά την αντιστοίχιση με την δεύτερη μέθοδο

Σχήμα 4.22: Πριν και μετά την αντιστοίχιση των δεδομένων της *Planet Labs* σε εικόνα-μωσαϊκό της *Google*. Τα δεδομένα απεικονίζουν μια περιοχή στην Καλιφόρνια και η αντιστοίχιση έγινε και με τις δύο μεθόδους. Στην εικόνα (i) διακρίνονται οι ασυνέχειες στο οδικό δίκτυο, ενώ στις εικόνες (ii) και (iii) τα προβλήματα έχουν αποκατασταθεί. Οι δύο μέθοδοι έχουν εξίσου καλό αποτέλεσμα, που συμφωνεί και με τις τιμές των αντίστοιχων σφαλμάτων του πίνακα 4.3.

5

Συμπεράσματα

Ένα βασικό αρχικό συμπέρασμα έπειτα από πολυάριθμα πειράματα σε πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες διαφορετικής χωρικής ανάλυσης, δορυφορικές απεικονίσεις από ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (sar) και δορυφορικές αλληλουχίες εικόνων βίντεο, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μόνο η πρώτη μέθοδος (MR) με τις τοπικές παραμορφώσεις ήταν ικανή να αντιστοιχίσει όλα τα δεδομένα. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη δυνατότητα να παραμορφώνει και να μετασχηματίζει τοπικά την εικόνα. Έτσι, όταν α) τα σημεία λήψης είναι διαφορετικά και κυρίως όταν οι λήψεις δεν είναι από το ναδίρ, β) όταν δημιουργούνται σκιές λόγω διαφορετικής θέσης του ήλιου και γ) όταν υπάρχουν μεταβολές στα αντικείμενα και τις κατηγορίες χρήσης/κάλυψης γης, είτε εξαιτίας του περάσματος του χρόνου είτε του ανθρώπινου παράγοντα, όπως η ανοικοδόμηση ή το γκρέμισμα κτιρίων, η μέθοδος αυτή (MR) προσαρμόζει το μετασχηματισμό της στα κατά τόπους σημεία αντιμετωπίζοντας τις ιδιαιτερότητες. Σε αντίθεση, η μέθοδος με τους τοπικούς περιγραφείς εφαρμόζει τον ίδιο μετασχηματισμό σε όλη την εικόνα, θεωρώντας ότι έχει μεταβληθεί κατά τον ίδιο τρόπο παντού, αγνοώντας τη διαφορετικότητα της κάθε αλλαγής μεταξύ του ζεύγους εικόνων. Γι αυτό το λόγο, η προσέγγιση αυτή δεν ήταν ικανή να αντιστοιχίσει τα δεδομένα των βίντεο, καθώς τα ιδιαίτερα ψηλά κτίρια και η πολύ υψηλή ανάλυση δημιουργούσαν πρόβλημα. Το ίδιο έγινε και με τα δεδομένα του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, με το πρόβλημα να εστιάζεται στον αλγόριθμο ανίχνευσης σημείων κλειδιών αυτή τη φορά, καθώς δεν ήταν δυνατό να διακρίνει σωστά τα σημεία, με αποτέλεσμα να ανιχνεύει έναν τεράστιο όγκο άχρηστων σημείων που καθιστούσαν αδύνατο το μετασχηματισμό στη συνέχεια. Πρόβλημα με την ανίχνευση σημείων και επακόλουθη αδυναμία αντιστοίχισης, υπήρχε και για τα δεδομένα χαμηλής ανάλυσης εξαιτίας του περιορισμού των 128 εικονοστοιχείων στο μέγεθος των ανιχνευόμενων στοιχείων από τον αλγόριθμο, όταν για τα δεδομένα αυτά ήταν αναγκαία η εύρεση μεγαλύτερων σημείων κλειδιών. Η μέθοδος αυτή (DR) έδειξε να δουλεύει αποτελεσματικά για τα δεδομένα υψηλής ακρίβειας που δεν υπήρχαν μεγάλες μεταβολές όπως στα δεδομένα των Worldview-2, Quickbird, Landsat-8, Sentinel-2 και Google. Συνολικά οι αντιστοιχίσεις της πρώτης μεθόδου για τα δεδομένα που επιτεύχθηκε αντιστοίχιση και με τη δεύτερη μέθοδο ήταν καλύτερες, με το μέσο σφάλμα απόστασης να είναι υποδιπλάσιο ανά περιπτώσεις. Χαρακτηριστικά για τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης το μέσο σφάλμα ξεκινάει λίγο πιο κάτω από το 1 εικονοστοιχείο για την πρώτη μέθοδο ενώ για τη δεύτερη από τα 3. Συνεπώς, από

Μέθοδος A (MR)	
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Μη συμπαγής τοπικός μετασχηματισμός, καθώς δεν εφαρμόζεται ο ίδιος σε όλη την εικόνα, αλλά προσαρμόζεται τοπικά ανάλογα με τις ανάγκες της υποπεριοχής Αντιστοίχιση όλων των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν Μικρά σφάλματα αντιστοίχισης, που σε ορισμένες περιπτώσεις ξεκινούν κάτω από το 1 εικονοστοιχείο Αντιστοίχιση κτιρίων έως και μεσαίου ύψους και πολύπλοκων κατασκευών Αποτελεσματική αντιμετώπιση κλίσεων λόγω γωνίας λήψης, μετατοπίσεων και μεταβολών
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Χρονοβόρος μετασχηματισμός για μεγάλες εικόνες Απαιτεί εμπειρία και πειραματισμούς για την εύρεση του κατάλληλου σετ παραμέτρων Αδυναμία αντιστοίχισης ψηλών κτιρίων Απαιτητική σε υπολογιστικούς πόρους

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της πρώτης μεθόδου που βασίζεται σε πεδία MRFs. Αποτελεί συνολικά την καλύτερη και πιο ισορροπημένη πρόταση, καθώς κατάφερε να αντιστοιχίσει όλα τα δεδομένα, έχοντας παράλληλα τα μικρότερα σφάλματα.

Μέθοδος B (DR)	
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Ταχύτητα εκτέλεσης, καθώς απαιτούνται μόλις μερικά δευτερόλεπτα Γρήγορη αντιστοίχιση δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης με ικανοποιητικά σφάλματα Εύρεση κατάλληλων παραμέτρων μετασχηματισμού αυτόματα, ορίζοντας μόνο ένα εύρος τιμών
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Ενιαίος καθολικός μετασχηματισμός που εφαρμόζεται σε όλη την εικόνα, θεωρώντας ότι υπάρχουν παντού ίδιες παραμορφώσεις Δεν μπορεί να αντιστοιχίσει βίντεο Δυσκολεύεται να αντιστοιχίσει δορυφορικές εικόνες μέσης ανάλυσης Δεν μπορεί να αντιστοιχίσει εικόνες ραντάρ Αδυναμία αντιστοίχισης κτιρίων όταν η λήψη είναι μακριά από το ναδίρ

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της δεύτερης μεθόδου που χρησιμοποιεί τοπικούς περιγραφείς. Αποτελεί μια λύση για γρήγορη αντιστοίχιση ανάμεσα σε εικόνες με μετατόπιση ή και στροφή, εφόσον οι γωνίες λήψης των εικόνων είναι πολύ κοντινές.

άποψη αποτελεσματικότητας και επιδόσεων η πρώτη μέθοδος (MR) είναι η καλύτερη. Όσον αφορά το χρόνο εκτέλεσης κάθε υλοποίησης, η δεύτερη μέθοδος (DR) έχει σαφές προβάδισμα. Ο χρόνος που απαιτείται για μια εκτέλεση είναι μόλις 2 δευτερόλεπτα περίπου σε κάθε περίπτωση, καθιστώντας την ιδανική για περιπτώσεις που απαιτείται μια γρήγορη εκτίμηση χωρίς μεγάλη ακρίβεια. Αντίθετα, η πρώτη μέθοδος (MR) όπως είναι φυσικό εξαιτίας των τοπικών μετασχηματισμών, χρειάζεται μερικά λεπτά, με το χρόνο να ανεβαίνει σε αρκετές ώρες ανάλογα με την πολυπλοκότητα των δεδομένων και τις ρυθμίσεις παραμέτρων. Επίσης, οι υπολογιστικές ανάγκες των δυο μεθόδων είναι παρόμοιες, με την πρώτη να κάνει μεγαλύτερη χρήση φυσικής μνήμης (ραμ) για σετ παραμέτρων με αυξημένες απαιτήσεις.

Με βάση τα παραπάνω μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που παρουσιάστηκαν για κάθε μέθοδο, είναι δυνατό να γίνουν κάποιες βελτιώσεις μελλοντικά. Όσον αφορά την πρώτη μέθοδο, υπάρχει η ανάγκη περιορισμού των πιθανών παραμέτρων ανάλογα με τον τύπο δεδομένων μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας, ώστε να μειώνεται ο χρόνος αναζήτησης του κατάλληλου σετ. Αυτό

θα μπορούσε ίσως να επιτευχθεί με την σύνδεση των παραμέτρων των δυο μεθόδων, δηλαδή εφόσον η εύρεση των καλύτερων παραμέτρων της δεύτερης μεθόδου είναι πολύ πιο γρήγορη να δημιουργηθεί μια αντιστοιχία ανάμεσα τους που να οδηγεί και στις πιθανότερες παραμέτρους της πρώτης μεθόδου. Επίσης, η εκτέλεση της πρώτης υλοποίησης θα μπορούσε να επιταχυνθεί αν ο κώδικας γραφόταν ξανά ώστε να κάνει χρήση πολλαπλών πυρήνων. Σχετικά με τη δεύτερη μέθοδο, η δημιουργία και χρήση ενός βελτιωμένου μοντέλου μετασχηματισμού, που είναι το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, ή ο κατακερματισμός της εικόνας και η εφαρμογή του υπάρχοντος σε κάθε τμήμα της, ίσως να επέφερε πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος, η χρήση διαφορετικού αλγορίθμου ανίχνευσης ίσως επέτρεπε την αντιστοίχιση των δεδομένων με χαμηλή χωρική ανάλυση ή και των δεδομένων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος

Βιβλιογραφία

- K. Murthy, M. Shearn, B. D. Smiley, A. H. Chau, J. Levine, and D. Robinson, *Skysat-1: very high-resolution imagery from a small satellite*, (2014) pp. 92411E–92411E–12.
- P. d Angelo, G. Kusch, and P. Reinartz, *Evaluation of skybox video and still image products*, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XL-1**, 95 (2014).
- G. Kopsiaftis and K. Karantzalos, *Vehicle detection and traffic density monitoring from very high resolution satellite video data*, *Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, IEEE International , pp.1881 (2015).
- B. Zitova and J. Flusser, *Image registration methods: a survey*, *Image and Vision Computing* **21**, 977 (2003).
- A. Sotiras, C. Davatzikos, and N. Paragios, *Deformable medical image registration: A survey*, *Medical Imaging, IEEE Transactions on* **32**, 1153 (2013).
- D. G. Lowe, *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*, *International Journal of Computer Vision* **60**, 91 (2004).
- J.-M. Morel and G. Yu, *Asift: A new framework for fully affine invariant image comparison*, *SIAM J. Img. Sci.* **2**, 438 (2009).
- H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, *Speeded-up robust features (surf)*, *Computer Vision and Image Understanding* **110**, 346 (2008), similarity Matching in Computer Vision and Multimedia.
- E. Tola, V. Lepetit, and P. Fua, *DAISY: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide Baseline Stereo*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **32**, 815 (2010).
- A. Alahi, R. Ortiz, and P. Vandergheynst, *Freak: Fast retina keypoint*, in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on* (2012) pp. 510–517.
- S. Price, *Rectifying the planet*, FOSS4G Free and Open Source Software for Geospatial (2015).
- M. Vakalopoulou and K. Karantzalos, *Automatic descriptor-based co-registration of frame hyperspectral data*, *Remote sensing journal* **6**, 3409 (2014).
- P. V. Lukashevich, B. A. Zalesky, and S. V. Ablameyko, *Medical image registration based on surf detector*, *Pattern Recognition and Image Analysis* **21**, pp.519 (2011).
- Αληφραγκής.Μ., *Εικονική Ανακατασκευή και Ταυτοποίηση Αντικειμένων στο Χώρο με Τεχνικές Υπολογιστικής Όρασης και Τριδιάστατα Γραφικά*, Ph.D. thesis, Σ.Η.Μ.Μ.Υ, Ε.Μ.Π (2010).
- W. R. Crum, T. Hartkens, and D. L. G. Hill, *Non-rigid image registration: theory and practice*, *The British Journal of Radiology* **77**, pp.140 (2004).

- Δούμα.Χ., *Ευθυγράμμιση τρισδιάστατων ιατρικών εικόνων με χρήση ελαστικού μετασχηματισμού*, Ph.D. thesis, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Πατρών (2015).
- Μαρκάκη.Β., *Ανάπτυξη Τεχνικών Επεξεργασίας και Ευθυγράμμισης Ιατρικών Δεδομένων με Χρήση Χαρτών Αυτο-οργάνωσης στην Ακτινοθεραπεία*, Ph.D. thesis, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Πατρών (2012).
- K. Karantzas, A. Sotiras, and N. Paragios, *Efficient and automated multi-modal satellite data registration through mrfs and linear programming*, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (2014).
- M. Agrawal, K. Konolige, and M. Blas, *Censure: Center surround extremas for realtime feature detection and matching*, in *Computer Vision – ECCV 2008*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5305, edited by D. Forsyth, P. Torr, and A. Zisserman (Springer Berlin Heidelberg, 2008) pp. 102–115.
- H. Goldstein, *Classical mechanics*, (Addison-Wesley, 1950).
- G. H. Rosenfield, *The problem of exterior orientation in photogrammetry*, Photogrammetric Engineering **25**, pp.536 (1959).
- B. K. P. Horn, in *Robot Vision* (MIT Press, 1986).
- K. C. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, in *Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence* (McGraw-Hill, 1987).
- Πατιάς.Π., in *Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία* (Ζήτη, 1999).
- K. Kraus, in *Photogrammetry, Vol. 1: Fundamentals and Standard Processes* (Dümmlers, 1993).
- A. Goshtasby, *Piecewise linear mapping functions for image registration*, Pattern Recognition, pp.459 (1986).
- G. Q. Maguire, J. M. E. Noz, H. Rusinek, J. Jaeger, E. L. Kramer, J. J. Sanger, and G. Smith, *Graphics applied to medical image registration*, IEEE Comput. Graph. Appl. **11**, pp.20 (1991).
- E. V. Shikin and A. I. Plis, in *Handbook on Splines for the User* (CRC Press, 1995).
- L. L. Schumaker, in *Spline functions: Basic Theory* (John Wiley and Sons, 1981).
- T. Pavlidis, in *Algorithms for Graphic and Image Processing* (Computer Science Press, 1982).
- D. H. Ballard and C. M. Brown, in *Computer Vision* (Prentice-Hall, 1982).
- R. L. Harder and R. N. Desmarais, *Interpolation using surface splines*, J. Aircraft **9**, pp.189 (1972).
- J. Duchon, *Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces*, R.A.I.R.O. Analyse Numerique **10**, pp.5 (1977).
- J. Meinguet, *An intrinsic approach to multivariate spline interpolation at arbitrary points*, in *Polynomial and Spline Approximation* (D. Reidel Publishing Company, 1978) pp. pp.163–190.
- A. Goshtasby, *Registration of images with geometric distortions*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing **26**, pp.60 (1988).

- B. Glocker, A. Sotiras, N. Komodakis, and N. Paragios, *Deformable Medical Image Registration: Setting the State of the Art with Discrete Methods*, [Annual Review of Biomedical Engineering](#) **13**, 219 (2011).
- A. Blake, P. Kohli, and C. Rother, *Introduction to markov random fields*, in *Markov Random Fields for Vision and Image Processing*, edited by A. Blake and P. Kohli (The MIT Press, 2011) Chap. 1, pp. 1–15.
- M. A. Fischler and R. C. Bolles, *Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*, [Commun. ACM](#) **24**, 381 (1981).
- I. Culjak, D. Abram, T. Pribanic, H. Dzapo, and M. Cifrek, *A brief introduction to opencv*, in *MIPRO, 2012 Proceedings of the 35th International Convention* (2012) pp. 1725–1730.
- let



Παράρτημα εικόνων και πινάκων

Κατάλογος εικόνων

2.1	Αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου (Lukashevich <i>et al.</i> 2011). Η αρχική εικόνα (a), η μετασχηματισμένη (b), η εικόνα αναφοράς (c) και οι μεταξύ τους διαφορές (d). Πηγή Lukashevich <i>et al.</i> , 2011	4
2.2	(i) Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης των αντιστοιχίσεων. Source είναι η προς αντιστοίχιση εικόνα, target η εικόνα αναφοράς στην οποία θα γίνει η αντιστοίχιση, rotate μια απλή στροφή της αρχικής εικόνας, global scale το αποτέλεσμα μιας μεθόδου με καθολικό μετασχηματισμό και non-rigid η ευέλικτη μέθοδος με δυνατότητες παραμόρφωσης. (ii) Αντιστοίχιση ιατρικών δεδομένων με τη χρήση παραμορφώσιμων μεθόδων. Το δεύτερο σετ αντιστοιχίζεται στο πρώτο. Πηγή Crum <i>et al.</i> , 2004	5
2.3	Μερικές μετρικές ομοιότητας (similarity metrics) που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα αντιστοίχισης. $T(x)$ είναι η ένταση σε μια θέση x σε μια εικόνα και $S(t(x))$ είναι η ένταση στο αντίστοιχο σημείο που δίνεται από την προσωρινή εκτίμηση του μετασχηματισμού $t(x)$. N είναι οι στοιχειακοί όγκοι στην επικαλυπτόμενη περιοχή. Πηγή Crum <i>et al.</i> , 2004	5
2.4	(i) Αποτελέσματα από την εφαρμογή μεθόδων αντιστοίχισης με βάση τοπικούς περιγραφείς σε υπερφασματικά δεδομένα. (ii) Δείγμα των αποτελεσμάτων της έρευνας. (a) Περιοχή πριν την αντιστοίχιση. (b) Περιοχή μετά την αντιστοίχιση με την προτεινομένη μέθοδο. (c) Περιοχή της εικόνας (a) με ζουμ.(d) Περιοχή της εικόνας (b) με ζουμ. Πηγή Vakaloroulou <i>et al.</i> , 2014	6
2.5	Αποτελέσματα της εύκαμπτης αντιστοίχισης. Αριστερά εικόνα από Pleiades και δεξιά από Worldview-2. Πάνω τα δεδομένα πριν την αντιστοίχιση και κάτω μετά. Πηγή Karantzalos <i>et al.</i> , 2014	7
3.1	Καρέ από το βίντεο του Burj Khalifa της Skybox.	17
3.2	Αριστερά εικόνα Quickbird προς αντιστοίχιση και δεξιά εικόνα αναφοράς του O.K.X.E.. Στην εικόνα (i) οι αντιστοιχίες είναι πολύ περισσότερες, ωστόσο περιλαμβάνονται αρκετές λάθος και αυτό φαίνεται από τη διεύθυνση των γραμμών αντιστοιχίσεων. Στην εικόνα (ii) μετά την εφαρμογή του φίλτρου μειώθηκαν αρκετά οι αντιστοιχίες, ωστόσο είναι περισσότερες από τον απαιτούμενο ελάχιστο αριθμό των τεσσάρων αντιστοιχιών, ποιοτικότερες και συμβάλουν στο σωστότερο υπολογισμό του πίνακα μετασχηματισμού.	24
4.1	Το πρώτο και το τελευταίο καρέ από το βίντεο της Skybox Imaging, που απεικονίζει την περιοχή του <i>Burj Khalifa</i> . Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, που ήταν και η μόνη ικανή να αντιστοιχίσει αυτό το σετ δεδομένων. Το μέσο σφάλμα αντιστοίχισης στη περίπτωση αυτή είναι κάτω από 1 εικονοστοιχείο.	30

- 4.2 Εστιασμένες περιοχές από τα δεδομένα του σχήματος 4.1. Οι εικόνες αριστερά είναι πριν την αντιστοίχιση και δεξιά μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο. Η αποκατάσταση της γεωμετρίας των κτιρίων είναι εμφανής. Παρατηρούνται ωστόσο μερικές παραμορφώσεις, που οφείλονται στο μετασχηματισμό. 31
- 4.3 Απεικόνιση σκακιέρας για τα καρέ του βίντεο της Skybox Imaging από την περιοχή του *Λας Βέγκας*. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου μεταξύ πρώτου και τελευταίου καρέ. Η περιοχή αυτή διαθέτει αρκετά ψηλά κτίρια που επηρεάζουν το μετασχηματισμό, ωστόσο οι δρόμοι και τα χαμηλά κτίρια έχουν αντιστοιχηθεί σωστά. . 32
- 4.4 Εστιασμένες περιοχές από τα δεδομένα του σχήματος 4.3. Οι εικόνες αριστερά είναι πριν την αντιστοίχιση και δεξιά μετά. Τα αποτελέσματα είναι με τη χρήση της πρώτης μεθόδου, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι δρόμοι και τα χαμηλά κτίρια αντιστοιχίζονται σωστά, ωστόσο προβλήματα παραμένουν στα ψηλά κτίρια. Οι παραμορφώσεις στις άκρες του σταυροειδούς κτιρίου της δεύτερης περιοχής δημιουργούνται εξαιτίας του απαιτητικού μετασχηματισμού, η χρήση του οποίου είναι αναγκαία λόγω των πολλών κτιρίων και της μεγάλης διαφοράς ανάμεσα στη γωνία λήψης των εικόνων. 33
- 4.5 Το πρώτο και το τελευταίο καρέ από το βίντεο της Skybox Imaging που απεικονίζει το *Λας Βέγκας* σε νυχτερινή λήψη. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, καθώς η δεύτερη δεν ήταν ικανή να τα αντιστοιχίσει. Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτού του σετ είναι ότι οι σχηματισμοί που παρατηρούνται προέρχονται από το φωτισμό. Η γεωμετρία των κτιρίων αποκαθίσταται σε μεγάλο βαθμό μετά την αντιστοίχιση, με μερικές ατέλειες να παραμένουν ανά περιοχές. 34
- 4.6 Εστιασμένες περιοχές από τα δεδομένα του σχήματος 4.5. Αριστερά πριν και δεξιά μετά την αντιστοίχιση με την πρώτη μέθοδο. Τα κτίρια επανέρχονται στις σωστές θέσεις τους. Το μέσο σφάλμα της αντιστοίχισης είναι 13.7 εικονοστοιχεία, ωστόσο οφείλεται αρκετά στη δυσκολία συλλογής σημείων ελέγχου. Λαμβάνοντας υπόψιν και την ιδιαιτερότητα αυτών των δεδομένων, η αντιστοίχιση είναι επιτυχής. 35
- 4.7 Αντιστοίχιση του πρώτου καρέ του βίντεο της Skybox Imaging από το *Burj Khalifa* σε εικόνα-μωσαϊκό της Google. Πριν και μετά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου (MR). Η DR δεν ήταν ικανή να μετασχηματίσει σωστά την εικόνα. Το οδικό δίκτυο, οι σχηματισμοί του εδάφους, τα χαμηλά και μεσαίου ύψους κτίρια έχουν αντιστοιχηθεί σωστά. Πρόβλημα αποτελούν τα ψηλά κτίρια που εξαιτίας της αλλαγής κλίσης και της φαινομενικής μετατόπισης που αυτή προκαλεί, δεν καταφέρνουν να αντιστοιχηθούν. . 36
- 4.8 Αντιστοίχιση της *Quickbird 2006* από περιοχή της Ραφήνας σε δεδομένα του Ο.Κ.Χ.Ε.. Πριν και μετά την εφαρμογή των δυο μεθόδων. Η αντιστοίχιση είναι επιτυχής και στις δυο περιπτώσεις. Το μέσο σφάλμα της απόστασης για την πρώτη μέθοδο ανέρχεται περίπου στα 2 εικονοστοιχεία, ενώ για τη δεύτερη στα 4.5. 38
- 4.9 Αντιστοίχιση της *Worldview-2* εικόνας του 2011 με δεδομένα του Ο.Κ.Χ.Ε.. Καλύπτει την ίδια περιοχή με τα *Quickbird* δεδομένα του σχήματος 4.8. Το σφάλμα μέσης απόστασης της πρώτης μεθόδου ανέρχεται στα 2 εικονοστοιχεία περίπου ενώ, της δεύτερης στα 7. Λαμβάνοντας υπόψιν την υψηλή ανάλυση της εικόνας, τα 7 εικονοστοιχεία είναι αρκετά μεγάλη τιμή και αυτό αντικατοπτρίζεται και στο αποτέλεσμα καθώς έχουν παραμείνει προβλήματα σε ορισμένα σημεία. 39

- 4.10 Πριν και μετά την αντιστοίχιση της *Landsat-8* εικόνας με την εικόνα του Sentinel-2. Η αντιστοίχιση έγινε και με τις δύο μεθόδους και καλύπτει μια ευρεία περιοχή στη Νότια Ιταλία. 40
- 4.11 Εστιασμένη περιοχή πριν και μετά την αντιστοίχιση της *Landsat-8* εικόνας με την εικόνα του Sentinel-2. Στην εικόνα (i) είναι ορατή η παραμόρφωση της λίμνης και της ακτογραμμής λόγω της μη αντιστοίχισης των εικόνων. Στις εικόνες (ii) και (iii) η ακτογραμμή έχει επανέρθει στη θέση της και το περίγραμμα της λίμνης έχει διορθωθεί. 41
- 4.12 Πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας από *Chris Proba-V* με την εικόνα του Sentinel-1. Η αντιστοίχιση έγινε με την πρώτη μέθοδο, καθώς η δεύτερη δεν ήταν αποτελεσματική. Απεικονίζει την ίδια περιοχή στην Ιταλία με την εικόνα 4.10. 42
- 4.13 Πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας από *Chris Proba-V* με την εικόνα του Sentinel-2. Όμοια με το σχήμα 4.12, η αντιστοίχιση έγινε με την πρώτη μέθοδο και απεικονίζει την ίδια σχεδόν περιοχή. 43
- 4.14 Εστιασμένες περιοχές πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας από *Chris Proba-V* με τις εικόνες των Sentinel-1 και Sentinel-2. Στην εικόνα (i) διακρίνονται οι διαταραχές στο οδικό δίκτυο και την ακτογραμμή ενώ στην εικόνα (iii) το λάθος περίγραμμα της λίμνης. Στις εικόνες (ii) και (iv) τα στοιχεία αυτά αποκαθίστανται με την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου. Τα σφάλματα αντιστοίχισης είναι φυσιολογικά με δεδομένη την χωρική ανάλυση των 100 μέτρων. 44
- 4.15 Πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας της *Google* με την εικόνα του Sentinel-1. Όμοια με τα προηγούμενα σχήματα, απεικονίζει την ίδια περιοχή στην Ιταλία. 45
- 4.16 Πριν και μετά την αντιστοίχιση της ίδιας με το σχήμα 4.15 εικόνας της *Google* με την εικόνα του Sentinel-2. Η αντιστοίχιση έγινε και με τις δύο μεθόδους. 46
- 4.17 Εστιασμένη περιοχή πριν και μετά την αντιστοίχιση της εικόνας της *Google* στις εικόνες των Sentinel-1 και Sentinel-2. Στις εικόνες (i) και (iii) διακρίνονται οι ασυνέχειες στους δρόμους, οι οποίες αποκαθίστανται στις εικόνες (ii), (iv) και (v). Η αντιστοίχιση στον Sentinel-1 επιτεύχθηκε με την πρώτη μέθοδο, ενώ στο Sentinel-2 και με τις δύο, έχοντας εξίσου καλό αποτέλεσμα. Το σφάλμα αντιστοίχισης ανέρχεται στα 7 εικονοστοιχεία περίπου για την εικόνα του Sentinel-1, 2,5 για την εικόνα του Sentinel-2 με την πρώτη μέθοδο και 6,5 με τη δεύτερη. Η διαφορά αυτή είναι φυσιολογική εξαιτίας της ραντάρ απεικόνισης και των δυσκολιών της, τόσο στην αντιστοίχιση όσο και στην συλλογή φωτοσταθερών. 47
- 4.18 Αντιστοίχιση εικόνας *Modis* στην εικόνα του Sentinel-2. Η χαμηλή χωρική ανάλυση της εικόνας δεν κατέστησε ικανή την αντιστοίχιση με τη δεύτερη μέθοδο. Καλύπτει την ίδια περιοχή στη Νότια Ιταλία. 48
- 4.19 Αντιστοίχιση της ραντάρ εικόνας του *Sentinel-1* στην εικόνα του Sentinel-2. Η δεύτερη μέθοδος (DR) ήταν αδύνατο να μετασχηματίσει ραντάρ απεικόνιση. 49
- 4.20 Εστιασμένη περιοχή από την εικόνα *Modis* πριν και μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του Sentinel-2. Η χαμηλή χωρική ανάλυση της εικόνας δημιούργησε δυσκολίες, ωστόσο η πρώτη μέθοδος (MR) κατάφερε να την αντιστοιχίσει επιτυχώς. Το μέσο σφάλμα απόστασης που μετρήθηκε στα 14 εικονοστοιχεία περίπου (πίνακας 4.3), εκ του αποτελέσματος φαίνεται ότι οφείλεται στη χαμηλή ανάλυση και στη δυσκολία συλλογής φωτοσταθερών για την αξιολόγηση. 50

- 4.21 Εστιασμένη περιοχή της *Sentinel-1* εικόνας πριν και μετά την αντιστοίχιση στην εικόνα του *Sentinel-2*. Οι διαφορές στην ακτογραμμή και το κύριο οδικό δίκτυο πριν και μετά την διαδικασία είναι εμφανής. Το μέσο σφάλμα απόστασης της αντιστοίχισης είναι 5 εικονοστοιχεία, μια αρκετά καλή τιμή με δεδομένο ότι πρόκειται για ραντάρ απεικόνιση. 50
- 4.22 Πριν και μετά την αντιστοίχιση των δεδομένων της *Planet Labs* σε εικόνα-μωσαϊκό της *Google*. Τα δεδομένα απεικονίζουν μια περιοχή στην Καλιφόρνια και η αντιστοίχιση έγινε και με τις δύο μεθόδους. Στην εικόνα (i) διακρίνονται οι ασυνέχειες στο οδικό δίκτυο, ενώ στις εικόνες (ii) και (iii) τα προβλήματα έχουν αποκατασταθεί. Οι δύο μέθοδοι έχουν εξίσου καλό αποτέλεσμα, που συμφωνεί και με τις τιμές των αντίστοιχων σφαλμάτων του πίνακα 4.3. 51

Κατάλογος πινάκων

3.1	Οι συνδυασμοί παραμέτρων της μεθόδου που βασίζεται σε MRFs (MR) για κάθε πείραμα.	19
4.1	Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα.	26
4.2	Τα ζευγάρια των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων αντιστοίχισης. Ως εικόνα αναφοράς θεωρείται η εικόνα πάνω στην οποία γίνεται η αντιστοίχιση και ως εικόνα πηγή, η εικόνα που θα αντιστοιχηθεί.	28
4.3	Τα αποτελέσματα της ποσοτικής αξιολόγησης σε επίπεδο εικονοστοιχείου, μετά την εφαρμογή των μεθόδων αντιστοίχισης. Η μέθοδος βασισμένη στους τοπικούς περιγραφείς (DR) δεν κατάφερε να αντιστοιχήσει όλα τα δεδομένα.	29
5.1	Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της πρώτης μεθόδου που βασίζεται σε πεδία MRFs. Αποτελεί συνολικά την καλύτερη και πιο ισορροπημένη πρόταση, καθώς κατάφερε να αντιστοιχήσει όλα τα δεδομένα, έχοντας παράλληλα τα μικρότερα σφάλματα.	54
5.2	Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της δεύτερης μεθόδου που χρησιμοποιεί τοπικούς περιγραφείς. Αποτελεί μια λύση για γρήγορη αντιστοίχιση ανάμεσα σε εικόνες με μετατόπιση ή και στροφή, εφόσον οι γωνίες λήψης των εικόνων είναι πολύ κοντινές.	54

B

Παράρτημα κώδικα

Κώδικας B.1: Η υλοποίηση της δεύτερης μεθόδου σε c++

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <opencv2/calib3d/calib3d.hpp>
#include <opencv2/imgproc.hpp>
#include <opencv2/highgui/highgui.hpp>
#include <opencv2/features2d/features2d.hpp>
#include <opencv2/xfeatures2d.hpp>

using namespace std;
using namespace cv;

int main( int argc, char** argv ) {

    std::ofstream listfile;
    listfile.open ( "/home/user/Desktop/REPORT.txt" );
    double L=1000;
    double K=1000;

    for (int o=25;o<=33;o++) {
        for(int p=14;p<=26;p+=4) {
            for(int q=5; q<=26;q+=5) {
                for (int r=15;r<=26;r+=2) {
                    for (int s=8;s<=36;s+=2) {
                        for (int u=2;u<=9;u++) {
                            for (int v=65;v<=65;v+=5) {
                                // PARAMETER VALUES
```

```

// Load images
Mat imgA = imread("/home/user/Desktop/SOURCE.png", CV_LOAD_IMAGE_GRAYSCALE );
// SOURCE IMAGE
if( !imgA.data ) {
    std::cout<< " --(!) Error reading image1 " << argv[1] << std::endl;
    return -1;
}

Mat imgB = imread("/home/user/Desktop/TARGET.png", CV_LOAD_IMAGE_GRAYSCALE );
// TARGET IMAGE
if( !imgB.data ) {
    std::cout << " --(!) Error reading image2 " << argv[2] << std::endl;
    return -1;
}

//STAR DETECTOR
// values :4, 6, 8, 11, 12, 16, 22, 23, 32, 45, 46, 64, 90, 128
Ptr<Feature2D>f2d=xfeatures2d::StarDetector::create(45,o,p,q,r);
std::vector<KeyPoint> keypointsA, keypointsB;
f2d->detect( imgA, keypointsA );
f2d->detect( imgB, keypointsB );
std::cout<<"keypointsA detected: "<<keypointsA.size()<<std::endl;
std::cout<<"keypointsB detected: "<<keypointsB.size()<<std::endl;

// FREAK DESCRIPTOR
Ptr<Feature2D> det2d=xfeatures2d::FREAK::create(false,false,s/1.0f,u);
Mat descriptorsA, descriptorsB;
det2d->compute( imgA, keypointsA, descriptorsA );
det2d->compute( imgB, keypointsB, descriptorsB );
std::cout<<"descriptorsA size: "<<descriptorsA.size()<<std::endl;
std::cout<<"descriptorsB size: "<<descriptorsB.size()<<std::endl;

Mat objectData;
Mat sceneData;

if(descriptorsA.type() !=CV_32F) {
    descriptorsA.convertTo(objectData, CV_32F);
}
else {
    objectData = descriptorsA;
}
if(descriptorsB.type() !=CV_32F) {
    descriptorsB.convertTo(sceneData, CV_32F);
}

```

```

else {
    sceneData = descriptorsB;
}

//MATCHER--BFMATCHER
BFMatcher matcher(NORM_HAMMING, false);
std::vector<std::vector<cv::DMatch> > matches;
matcher.knnMatch(descriptorsA, descriptorsB, matches, 2);
cout<<"matches:"<<matches.size()<<std::endl;

// REDUCE BAD MATCHES
vector<DMatch> good_matches;

for (int i = 0; i < matches.size(); ++i){
    const float ratio = (v/100.0f);
    if (matches[i][0].distance <= ratio * matches[i][1].distance){
        good_matches.push_back(matches[i][0]);
    }
}

cout<<"matching points = "<<good_matches.size()<<std::endl;
std::vector<Point2f>goodA;
std::vector<Point2f>goodB;

for( int i = 0; i < good_matches.size(); i++ )
{
    goodA.push_back( keypointsA[ good_matches[i].queryIdx ].pt );
    goodB.push_back( keypointsB[ good_matches[i].trainIdx ].pt );
}

//TRANSFORMATION, ARRAY, TRANSFORM--HOMOGRAPHY

unsigned int minInliers =10;
if(goodA.size() >= minInliers){
    Mat H = findHomography( goodA, goodB, CV_RANSAC, 1, noArray(), 2000, 0.995);

    double C=0;
    double D=0;
    double X=0;
    double Y=0;
    double x=0;
    double y=0;

    for ( size_t i=1; i<=goodB.size();i++){

```

```
imgB.release();
det2d.release();
f2d.release();
goodA.clear();
goodB.clear();
matches.clear();
good_matches.clear();}}}}}}
listfile.close();

}
```
