



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Γεωπληροφορική
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

Φωτογραμμετρική Αξιοποίηση και Αξιολόγηση Πανοραμάτων της Google Street View



Μεταπτυχιακή Εργασία

Μπούσιας- Αλεξάκης Ευάγγελος

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της μεταπτυχιακής μου διπλωματικής εργασίας, κ. Γιώργο Καρρά, για την άριστη συνεργασία, την στήριξη και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το μέλος του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας κ. Σοφία Σοϊλέ για την βοήθειά της και τον καθηγητή κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη για την παραχώρηση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επ. καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καράντζα-λο για τις πολύ ενδιαφέρουσες ιδέες και συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την Άρτεμη και τους φίλους μου για την στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Πλαίσιο, Στόχος και Δομή της Εργασίας	vii
1 Εισαγωγή στο Google Street View	1
1.1 Google Street View	1
1.1.1 Ιστορική αναδρομή	2
1.1.2 Κάμερες	3
1.1.3 Εντοπισμός θέσης (Positioning)	6
1.1.4 Έξυπνη πλοήγηση σε 3D δεδομένα.....	6
1.1.5 Υπολογισμός τρισδιάστατων μοντέλων στο Google Street View	8
1.1.6 Παροχή της πληροφορίας στους χρήστες.....	9
1.1.7 Ζητήματα προσωπικών δεδομένων.....	10
1.2 Εφαρμογές που αξιοποιούν την πληροφορία του Street View	11
1.3 Google Street View Image API.....	15
1.3.1 Παράμετροι στην διεύθυνση URL.....	15
1.4 Google Maps JavaScript API- Google Street View Service.....	17
2 Πανοραμικές Εικόνες	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Εισαγωγικές έννοιες- Μοντέλα κίνησης	21
2.2.1 Συστήματα συντεταγμένων.....	21
2.2.2 Στροφές της εικόνας.....	22
2.2.3 Κινήσεις στον Δισδιάστατο χώρο	23
2.2.4 Τρισδιάστατοι μετασχηματισμοί	24
2.2.5 Περίπτωση πανοράματος από ομόκεντρες λήψεις περιστρεφόμενης μηχανής.....	27
2.3 Αλγόριθμοι σύνδεσης εικόνων (Image Alignment Algorithms)	28
2.3.1 Άμεσες μέθοδοι.....	28
2.3.2 Μέθοδοι βάσει χαρακτηριστικών	29
2.3.3 Απαλλαγή των ομολογιών από χονδροειδή σφάλματα- Ο αλγόριθμος RANSAC	36
2.3.4 Αυτόματη επιλογή επικαλυπτόμενων εικόνων.....	37
2.4 Προσδιορισμός της σύνδεσης διαδοχικών εικόνων	37

2.4.1	Συνόρθωση ζεύγους εικόνων με χρήση ομογραφίας- Προσωρινές τιμές	38
2.4.2	Περίπτωση ομόκεντρων εικόνων	39
2.5	Συνολική σύνδεση εικόνων (Global Registration)	40
2.5.1	Συνόρθωση ομόκεντρων εικόνων με την μέθοδο της δέσμης	41
2.5.2	Αποκατάσταση της οριζοντιότητας του πανοράματος	42
2.5.3	Αφαίρεση της παράλαξης	43
2.6	Σύνθεση του πανοράματος (Compositing)	43
2.6.1	Επιλογή της προβολής	44
2.7	Επιλογή περιοχών συρραφής και μίξη χρώματος (seam selection - blending)	50
2.7.1	Απλές τεχνικές (Feathering και Center- Weighting)	51
2.7.2	Σύνθετες τεχνικές	51
2.8	Αυτόματη δημιουργία πανοραμικών εικόνων και διαθέσιμα λογισμικά	54
2.9	Λογισμικό <i>Hugin</i>	56
2.9.1	Παράδειγμα παραγωγής πανοραμικής εικόνας από το command line	58
3	Συνόρθωση παρατηρήσεων από πολλαπλές πανοραμικές εικόνες του Google Street View	63
3.1	Σχετική βιβλιογραφική έρευνα	63
3.1.1	Εφαρμογές στην Όραση Υπολογιστών	63
3.1.2	Φωτογραμμετρικές εφαρμογές	66
3.2	Διαδικασία αξιοποίησης της γεωμετρικής πληροφορίας του Google Street View	68
3.2.1	Προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων λήψης των εικόνων ενδιαφέροντος	68
3.2.2	Ανάκτηση των καρτέ κάθε πανοράματος	69
3.2.3	Δημιουργία των πανοραμάτων από τα καρτέ	69
3.2.4	Προσδιορισμός ομολογιών	70
3.2.5	Μετατροπή μεταξύ συστημάτων αναφοράς των κέντρων λήψης	70
3.2.6	Περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της συνόρθωσης	74
3.2.7	Συνόρθωση δύο πανοραμικών εικόνων	75
3.2.8	Συνόρθωση πολλαπλών πανοραμικών εικόνων	77
3.2.9	Εναλλακτικά μοντέλα συνόρθωσης	81
4	Εφαρμογή Αλγορίθμου σε Δεδομένα του Google Street View	83
4.1	Τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας για σύγκριση των αποτελεσμάτων	83
4.2	Υπολογισμός του σφάλματος προσδιορισμού της κλίσης με νόμο μετάδοσης μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας	84

4.3	Μελέτη περίπτωσης: Οδός Καισαριανής.....	85
4.3.1	Ανάκτηση συντεταγμένων των κέντρων λήψης.....	85
4.3.2	Ανάκτηση καρτέ και ανασύνθεση πανοραμικής εικόνας.....	86
4.3.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	90
4.3.4	Σύγκριση με αληθή δεδομένα.....	95
4.3.5	Επίλυση με δέσμευση παραμέτρων των πανοραμάτων	97
4.3.6	Επίλυση με δεσμεύσεις.....	100
4.3.7	Εφαρμογή μετασχηματισμού ομοιότητας για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων.....	101
4.4	Μελέτη περίπτωσης: Οδός Λέρου	102
4.4.1	Αποτελέσματα επίλυσης με ταυτόχρονη συνόρθωση όλων των εικόνων	109
4.4.2	Αποτελέσματα επίλυσης με ταυτόχρονη συνόρθωση όλων των εικόνων και προσδιορισμό μόνο του ΔΖ.....	112
4.4.3	Αποτελέσματα επίλυσης με συνόρθωση των εικόνων ανά δύο	114
4.4.4	Έλεγχος των αποτελεσμάτων με εφαρμογή τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας.....	115
4.4.5	Έλεγχος των κλίσεων	117
	Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	120
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	122

Περίληψη

Το *Google Street View* αποτελεί μια Διαδικτυακή υπηρεσία που παρέχεται από την *Google*, η οποία επιτρέπει την εικονική περιήγηση του χρήστη σε οδικές διαδρομές ανά τον κόσμο. Η υπηρεσία υλοποιείται μέσω της χρήσης σφαιρικών πανοραμικών εικόνων (πανοραμάτων γωνιακού ανοίγματος 360°). Πέρα από την τυπική χρήση των πανοραμικών εικόνων για την πλοήγηση (περιήγηση) στις εκάστοτε τοποθεσίες, οι εικόνες του *Street View* αποτελούν μια εν δυνάμει σημαντική πηγή γεωμετρικής πληροφορίας, η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές όπως οι αποτυπώσεις των προσόψεων κτιρίων ή η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων πόλεων. Κύριο αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη μιας διαδικασίας για την αξιοποίηση της γεωμετρικής πληροφορίας των πανοραμικών εικόνων του *Google Street View* και η αξιολόγησή της ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύσσεται για τον αλγόριθμο συνορθώνει, με την Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων, τις παρατηρήσεις ομόλογων σημείων σε πολλαπλές πανοραμικές εικόνες με χρήση της εξίσωσης συγγραμμικότητας, προσαρμοσμένης στην γεωμετρία των πανοραμικών εικόνων. Από την συνόρθωση προσδιορίζονται επίσης διορθώσεις των αρχικών συντεταγμένων των σημείων λήψης των πανοραμάτων που έχουν ανακτηθεί από την *Google*. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ελέγχεται τόσο με την χρήση των *a posteriori* σφαλμάτων που προκύπτουν από την συνόρθωση, όσο και από την σύγκριση των σημειοσυνόλων που προκύπτουν από τον υπό εξέταση αλγόριθμο με σημειοσύνολα ελέγχου μέσω τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας. Για την ανάκτηση των πανοραμικών εικόνων χρησιμοποιείται το *API* της *Google*, το οποίο παρέχει την δυνατότητα λήψης προοπτικών εικόνων που έχουν προκύψει από την ανασύσταση τμήματος του πανοράματος, και το λογισμικό *Hugin* που επιτρέπει την δημιουργία πανοραμάτων από πολλαπλές εικόνες. Ένα πρόσθετο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας δημιουργίας πανοραμικών εικόνων από πολλαπλές λήψεις (*frames*), η οποία δίνει την δυνατότητα δημιουργίας πανοραμάτων με συμβατικές φωτογραφικές μηχανές.

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

Photogrammetric Exploitation and Evaluation of Google Street View Panoramic Imagery

Bousias- Alexakis Evangelos

*Master of Science Thesis
October, 2015*

Abstract

Google Street View is an Internet service provided by *Google*, which allows the user to virtually navigate along streets in the world. The service is implemented by the use of 360° spherical panoramic images. Besides the ordinary use of panoramic imagery for city touring and virtual site-seeing, *Street View* imagery constitutes a potentially vast source of geometric information, which could be exploited in applications such as geometric documentation of building facades or 3-D city modeling. The main subject of the present thesis refers to the development of a procedure for the exploitation of geometric information encapsulated in *Street View* panoramic imagery and the evaluation of the proposed process with regard to the accuracy and reliability of the results. The algorithm is based on a mathematical model which optimizes, using Least Squares adjustment, the observations of homologous points from multiple panoramas by using the collinearity equation, adapted to panoramic image geometry. Another product of the optimization is the refinement of the initial coordinates of the camera center provided by Google Javascript API. The accuracy of the results of the algorithmic implementation is estimated by the a posteriori error metrics produced by the optimization, as well as the comparison between the produced point sets and reference data. The comparison is performed through a 3D similarity transformation between the two point sets. For generating the panoramic imagery, the Google Street View API is used, which returns specific frames of a panorama, in combination with the open source image stitching software *Hugin*. In addition, a further objective of the thesis is to review the methods for panorama compositing from multiple frames by the implementation of image alignment and stitching algorithms.

Πλαίσιο, Στόχος και Δομή της Εργασίας

Η ανάπτυξη του Διαδικτύου τις τρεις τελευταίες δεκαετίες έχει επιδράσει καταλυτικά στην διαμόρφωση των προβλημάτων που καλούνται να διαχειριστούν οι μηχανικοί του σήμερα. Το εύρος και ο όγκος των πληροφοριών που είναι ελεύθερα διαθέσιμες στο Διαδίκτυο οδηγούν στην συνεχή ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών για την όσο τον δυνατόν πιο αποδοτική ανάκτηση και αξιοποίησή τους. Το ίδιο ισχύει και στην ιδιαίτερη περίπτωση πληροφοριών που αποτελούν τα γεωχωρικά δεδομένα. Η συστηματική κάλυψη μεγάλων τμημάτων της γης μέσω των πανοραμικών εικόνων του *Google Street View* αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα γεωχωρικής πληροφορίας που είναι εύκολα προσβάσιμη μέσω υπηρεσιών του Διαδικτύου. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την αξιοποίηση της εν λόγω εικονιστικής πληροφορίας για εφαρμογές όπως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση πόλεων (*3D city modeling*), η γεωαναφορά εικόνων μέσω σύγκρισής τους με εικόνες του *Street View*, η πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο, η ανίχνευση μεταβολών στο αστικό περιβάλλον μέσα σε κάποιο χρονικό διάστημα (*change detection*) κ.α.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθόδου για την αξιοποίηση της γεωχωρικής πληροφορίας που περιέχεται στις εικόνες του *Street View* για τον προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων που απεικονίζονται σε πολλαπλά πανοράματα, και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της. Η κύρια συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ο οποίος συνορθώνει τις παρατηρήσεις από πολλαπλές πανοραμικές εικόνες με χρήση της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων σε ενιαίο τρισδιάστατο σημειοσύνολο, διορθώνοντας παράλληλα τις συντεταγμένες των σημείων λήψης που παρέχει η *Google*.

Ένα πρώτο βήμα για την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου είναι η ανάκτηση των πανοραμικών εικόνων. Η ανάκτηση επιτυγχάνεται με την λήψη επιμέρους κοινών προοπτικών εικόνων (*frames*) από το πανόραμα μέσω ενός API που παρέχει η *Google*, οι οποίες στην συνέχεια χρησιμοποιούνται για την σύνθεση του πανοράματος με χρήση κατάλληλου λογισμικού (*Hugin*). Για τον λόγο αυτό, καθώς επίσης και υπό το σκεπτικό της γενίκευσης της μεθόδου σε πανοραμικές εικόνες που δημιουργούνται με χρήση κοινής φωτογραφικής μηχανής, μεγάλο τμήμα του θεωρητικού τμήματος της εργασίας αφιερώνεται σε μια εκτενή περιγραφή της διαδικασίας δημιουργίας πανοραμικών εικόνων από πολλαπλές επικαλυπτόμενες προοπτικές εικόνες.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας επιχειρείται μια σύντομη εισαγωγή στο *Google Street View* και τα βασικά χαρακτηριστικά του, στον εξοπλισμό και στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για την συλλογή, την οργάνωση και την διάθεση της πληροφορίας. Επίσης γίνεται αναφορά σε μια σειρά εργασίες μεγάλου εύρους εφαρμογών, οι οποίες έχουν ως κοινό στόχο την αξιοποίηση της πληροφορίας του *Google Street View* και αντίστοιχων συστημάτων, όπως το *StreetSlide* της *Microsoft*. Τέλος, περιγράφονται οι δύο βασικές υπηρεσίες που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των εικόνων και των μεταδεδομένων τους (κέντρα λήψης, χρονολογία λήψης).

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια αναλυτική περιγραφή των βημάτων για την κατασκευή πανοραμικών εικόνων από πολλαπλές προοπτικές εικόνες, και στην συνέχεια γίνεται αναφορά στο λογισμικό *Hugin*, ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα για την δημιουργία πανοραμάτων από επιμέρους κοινές εικόνες (*frames*). Στο τέλος του κεφαλαίου δίνεται ένα παράδειγμα χρήσης του *Hugin* από την γραμμή εντολών των *Windows*, το οποίο λειτουργεί και ως υπόδειγμα για τον τρόπο σύνθεσης των πανοραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία από τα *frames* που ανακτήθηκαν από το API της *Google*.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα στάδια που μεσολαβούν από την λήψη των εικόνων μέχρι και τον προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σκοπευθέντων σημείων, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για την συνόρθωση των παρατηρήσεων. Επίσης, στο πλαίσιο του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη επισκόπηση της πρόσφατης σχετικής βιβλιογραφίας.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου που αναπτύχθηκε για δύο ενδεικτικές μελέτες περίπτωσης στην περιοχή των Αθηνών. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται τόσο ως προς τα τυπικά σφάλματα που προέκυψαν από την συνόρθωση (στοιχεία του a posteriori πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του διανύσματος των καλύτερων τιμών και του αντίστοιχου πίνακα του διανύσματος των μετρήσεων, καθώς και του a posteriori τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους) όσο και σε σχέση με δεδομένα ελέγχου μέσω τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ του σημειοσυνόλου που προέκυψε από τον υπό εξέταση αλγόριθμο και του σημειοσυνόλου ελέγχου. Τέλος, εξετάζεται η δυνατότητα για μια απλοποιημένη μορφή του αλγορίθμου για την εξαγωγή μόνο των υψομετρικών διαφορών μεταξύ γειτονικών σημείων λήψης, διαδικασία η οποία επιτρέπει πχ. τον εύκολο προσδιορισμό κλίσεων οδών με την σκόπευση ελάχιστων ομόλογων σημείων μεταξύ διαδοχικών πανοραμάτων (θεωρητικά αρκεί ακόμη και ένα μόνο ομόλογο σημείο).

1 Εισαγωγή στο Google Street View

1.1 Google Street View

Το Street View αποτελεί μια τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί από την Google και παρέχει πανοραμικές λήψεις από θέσεις κατά μήκος οδών. Η κάλυψη περιοχών από την υπηρεσία του Street View εκτείνεται σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι δρόμοι για τους οποίους διατίθενται εικόνες του Street View σημειώνονται στο Google Maps με μπλε γραμμές.

Στην τυπική περίπτωση, οι εικόνες του Google Street View συλλέγονται από αυτοκίνητα, εξοπλισμένα με ένα σύστημα μηχανών λήψης, σαρωτές laser, συστήματα προσδιορισμού θέσης (GPS και αδρανειακά συστήματα), καθώς και υπολογιστικό εξοπλισμό για την αποθήκευση των παρατηρήσεων (Εικ. 1-1). Τα οχήματα αυτά κινούνται στους δρόμους και καταγράφουν τις σκηνές που παρουσιάζονται στο Street View. Πέρα από τα συμβατικά αυτοκίνητα, το Google Street View χρησιμοποιεί και πιο εξειδικευμένους τύπους οχημάτων για την κατάγγραφή τοποθεσιών που δεν είναι προσβάσιμες με αυτοκίνητο, όπως πχ. μονοπάτια (Εικ. 1-2) ή χιονοδρομικά κέντρα (Εικ. 1-3), ενώ έχει επεκτείνει την κάλυψή του και σε μουσεία και χώρους τέχνης (Εικ. 1-4). Οι εικόνες έχουν ανακτηθεί από την ιστοσελίδα του Street View (Google, 2015).



Εικόνα 1.1: Αυτοκίνητο Συλλογής Εικόνων του Google Street View.



Εικόνα 1.2: Trekker. Το γεγονός ότι το σύστημα αυτό είναι φορητό επιτρέπει την συλλογή εικόνων σε δύσβατους, στενούς χώρους ή σε περιοχές προσβάσιμες μόνο με τα πόδια.



Εικόνα 1.3: Snowmobile για την συλλογή εικόνων στο ανώμαλο χιονισμένο έδαφος χιονοδρομικών κέντρων σε όλο τον κόσμο.



Εικόνα 1.4: Τρόλεϊ: Όχημα που αναπτύχθηκε για να χωράει στις εισόδους των μουσείων και να μπορεί να περιηγείται στους χώρους των γλυπτών. Δεν έχει συλλέξει εικόνες μόνο μέσα σε μουσεία, αλλά και σε άλλους εσωτερικούς χώρους, όπως ο Λευκός Οίκος και αθλητικά στάδια.

Το Google Street View λειτουργεί με πανοραμικές εικόνες που έχουν προκύψει από την συρραφή πολλών μεμονωμένων εικόνων με επαρκείς μεταξύ τους επικαλύψεις.

Το Google maps είναι διαθέσιμο είτε ως τμήμα του Google Maps είτε ως Διαδικτυακή εφαρμογή είτε ως εφαρμογή για κινητά τηλέφωνα με λειτουργικό android και iOS. Αρχικά το google maps χρησιμοποιούσε πλατφόρμα πολυμέσων Adobe Flash για την λειτουργία του Street View, αλλά μετά από την αναθεώρηση του Google Maps το 2013 οι υπηρεσίες του Google Street View, όπως και του Google Maps, χρησιμοποιούν την γλώσσα προγραμματισμού JavaScript, ενώ το Street View διαθέτει και ένα *Application Programming Interface (API)* που επιτρέπει την ανάκτηση στατικών εικόνων (τμήματα έως και 120° ενός πανοράματος) με επίσκεψη ενός URL (Unified Resource Locator).

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

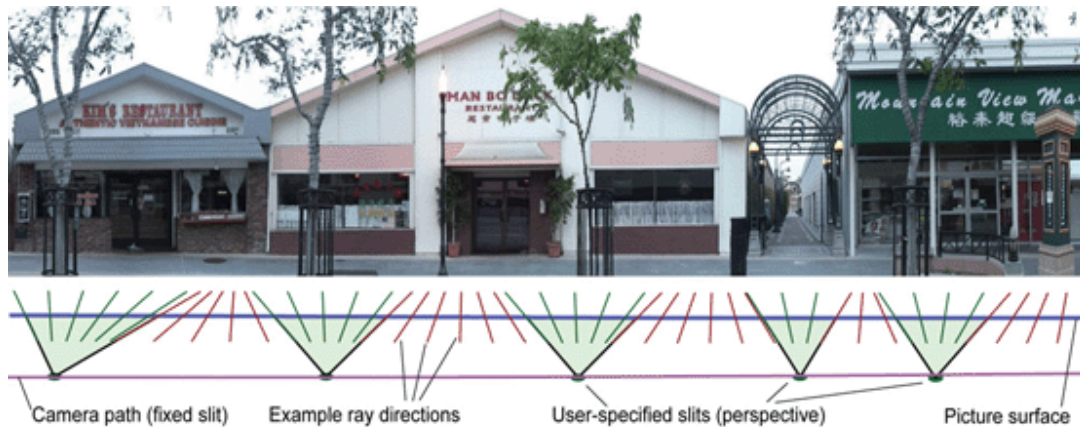
Πρόδρομος του Google Street View ήταν το πρόγραμμα City Block¹, μια ερευνητική συνεργασία μεταξύ του πανεπιστημίου του Stanford και της Google που ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2001. Η αρχική ιδέα για την δημιουργία του Google Street View προέρχεται από τον συνιδρυτή της Google Larry Page ο οποίος, ορμώμενος από τον τεράστιο όγκο πληροφορίας στις εικόνες που μπορούν να καταγράφονται σε επίπεδο δρόμου, οδήγησε σε δρόμους του San Francisco και συνέλεξε αρκετές ώρες υλικού με βιντεοκάμερα. Το υλικό αυτό το παρέδωσε στο *Computer Graphics Laboratory* του Stanford, ζητώντας την ανάπτυξη μιας μεθόδου που να συνοψίζει τα video μέσα σε λίγες εικόνες (Levoy, 2004). Η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του ζητήματος ονομάστηκε “πολυπροοπτικά πανοράματα” (multi-perspective panoramas) και επεξηγείται στην Εικ. 1.5. Ουσιαστικά πρόκειται για την συρραφή εικόνων (ή video frames), τα οποία λαμβάνονται κατά μήκος του δρόμου από διαφορετικά σημεία λήψης, σε ενιαίο πανόραμα. Ωστόσο, η ιδέα των πολυπροοπτικών πανοραμάτων δεν υιοθετήθηκε από το Street View, το οποίο τελικά λειτουργεί με πανοραμικές εικόνες 360° που λαμβάνονται σε διακριτές θέσεις η κάθε μια. Η ιδέα όμως των πολυπροοπτικών πανοραμάτων έχει έρθει και πάλι στο προσκήνιο αφού χρησιμοποιείται στο ερευνητικό πρόγραμμα StreetSlide² της Microsoft.

Το Street View κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στις ΗΠΑ τον Μάιο του 2007, περιλαμβάνοντας αρχικά μόνο ορισμένες πόλεις των ΗΠΑ, και έκτοτε επεκτείνει συνεχώς την κάλυψή του συμπεριλαμβάνοντας νέες περιοχές σε παγκόσμιο πλέον επίπεδο. Στην Εικ. 1.6 παρουσιάζεται η κάλυψη του Google Street View για το έτος 2015. Το 2008 το Google Street View εισάγεται, για πρώτη φορά, ως τμήμα του Google Earth (στην έκδοση Google Earth 4.3), ενώ δημιουργείται επίσης και εφαρμογή του προσαρμοσμένη σε i-phone. Το 2010 δίνεται πλέον η δυνατότητα να εισάγονται στο Street View εσωτερικοί χώροι επιχειρήσεων, με την Google να καλεί τους χρήστες να συνεισφέρουν δικές τους πανοραμικές εικόνες με την χρήση προγραμμάτων που αυτή ανέπτυξε για λειτουργικό android 4.2.

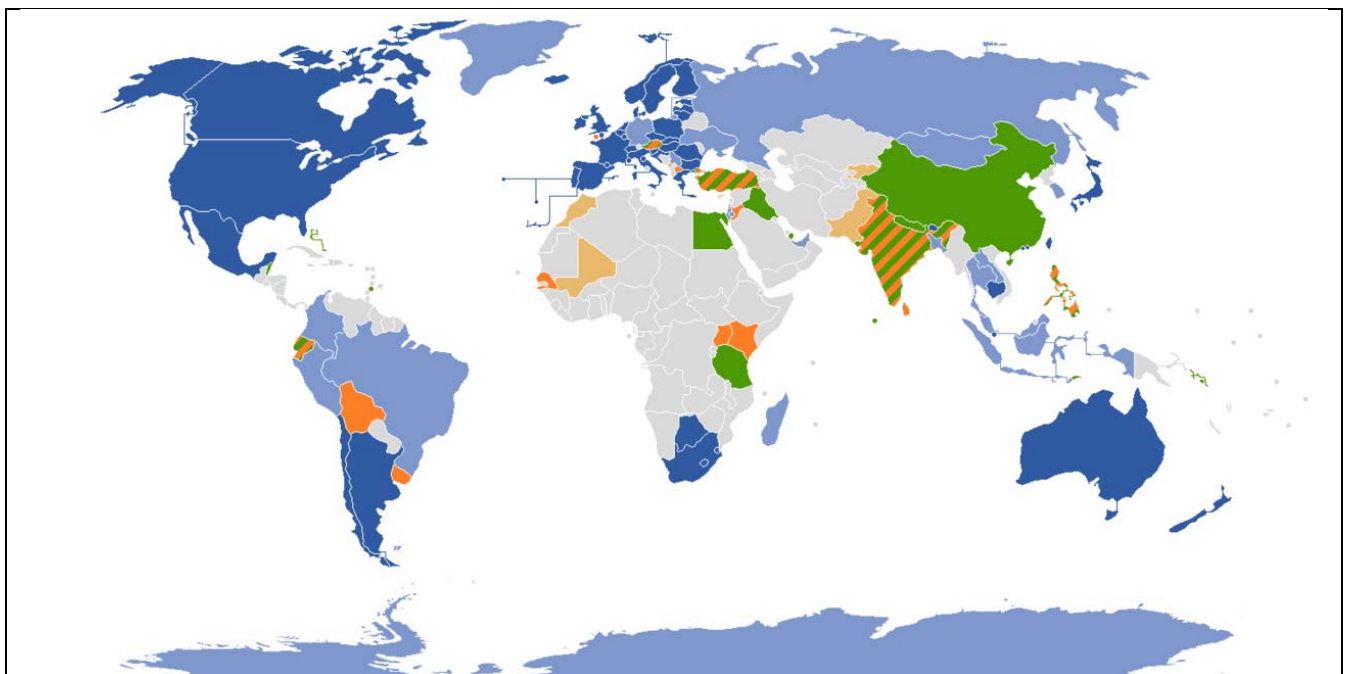
Από το 2014 οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση και σε εικόνες παλαιότερων εκδόσεων του Street View, εφόσον αυτές είναι διαθέσιμες στις περιοχές ενδιαφέροντός τους. Τέλος, το 2015 ανακοινώθηκε η συνεργασία της Google με την περιβαλλοντική εταιρεία *Aclima*. Τα οχήματα του Google Street View θα φέρουν στο εξής αισθητήρες για την ανίχνευση ρύπων όπως το διοξείδιο του αζώτου και το όζον, καθώς και για την μέτρηση της πυκνότητας των αιωρούμενων σωματιδίων (Gershgorn, 2015).

¹ Για περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με το πρόγραμμα City Blocks: <http://graphics.stanford.edu/projects/cityblock/>

² Για περισσότερες πληροφορίες: http://research.microsoft.com/en-us/um/people/kopf/street_slide/



Εικόνα 1.5: Πολυπροοπτικό πανόραμα (Multi-perspective Panorama). Προέκυψε από την γεωμετρική προσαρμογή και συρραφή διακριτών εικόνων (frames) από τα video του Lary Page (Levoy, 2004).



Εικόνα 1.6: Παγκόσμια κάλυψη του Google Street View (https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Street_View#cite_note-computer-17)

Υπόμνημα

- Χώρες με σχεδόν πλήρη κάλυψη
- Χώρες με μερική κάλυψη
- Χώρες στις οποίες έχει προγραμματιστεί επισήμως η πλήρης ή μερική κάλυψη.
- Χώρες στις οποίες έχει προγραμματιστεί ανεπίσημως η πλήρης ή μερική κάλυψη.
- Χώρες με κάλυψη μόνο επιλεγμένων επιχειρήσεων και/ή τουριστικών αξιοθεάτων
- Χώρες χωρίς τρέχουσα ή προγραμματισμένη κάλυψη

1.1.2 Κάμερες

Κατά την διάρκεια λειτουργίας του, το Google Street View έχει αλλάξει αρκετές φορές το σύστημα των μηχανών λήψης με τον οποίο συλλέγει τις εικόνες. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες εκδόσεις του συστήματος λήψης είναι οι εξής:

R2: Οι παλαιότερες εικόνες λαμβάνονταν με χρήση ενός δακτυλίου, τον οποίο αποτελούσαν 8 αισθητήρες CCD ανάλυσης 11 Μegarixel και εμπορικοί ευρυγώνιοι φωτογραφικοί φακοί.

R5: Την έκδοση R5 συγκροτούσαν 8 αισθητήρες CMOS σε σχηματισμό “μαργαρίτας” (rosette constellation) με φακούς χαμηλής ανάκλασης και ελεγχόμενης διαστροφής, καθώς και έναν φακό fish-eye τοποθετημένο πάνω από τον δακτύλιο για την λήψη των υψηλότερων τμημάτων των κτιρίων.

R7: Η έκδοση R7 αποτελείται από 15 αισθητήρες CMOS σε σχηματισμό “μαργαρίτας” και φακούς αντίστοιχους της έκδοσης R5, ενώ έχει απομακρυνθεί ο φακός τύπου fish-eye προκειμένου να συλλέγονται υψηλής ανάλυσης εικόνες σε μεγαλύτερο εύρος πεδίου (Εικ. 1.9). Για παράδειγμα, μπορεί να απεικονιστεί το πεζοδρόμιο ακόμη και σε στενούς δρόμους. Στις Εικ. 1-7 και 1-8 απεικονίζονται καρέ από πανοραμικές εικόνες της ίδιας περιοχής με χρονολογίες λήψης 2011 και 2014, αντίστοιχα. Οι εικόνες είναι και οι δύο οριζόντιες. Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες μπορεί να δει κανείς την διαφορετική ποιότητα των εικόνων στα άνω και κάτω άκρα τους.



Εικόνα 1.7: Καρέ από πανοραμική εικόνα της οδού Λέρου (Κυψέλη, Αθήνα) με χρονολογία λήψης 2011.



Εικόνα 1.8: Καρέ από πανοραμική εικόνα της οδού Λέρου με χρονολογία λήψης το 2015.



Εικόνα 1.9: Το σύστημα καμερών R7 του Street View (Anguelon et al., 2010)

Στις εκδόσεις R5 και R7 χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό κυλιόμενο κλείστρο (electronic rolling shutter), με το οποίο η σκηνή δεν καταγράφεται σε μια μόνη χρονική στιγμή αλλά με ταχεία σάρωση είτε κατακόρυφα είτε οριζόντια. Έτσι, ένα βασικό ζητούμενο στις δύο αυτές τελευταίες εκδόσεις ήταν, σύμφωνα με τους Anguelon et al. (2010), η ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων που προκαλούνται από την λήψη των εικόνων από κινούμενο όχημα, καθώς λόγω και της κίνησης του κλείστρου τμήματα κάθε εικόνας λαμβάνονται σε ελαφρώς διαφορετική χρονική στιγμή, όταν δηλαδή το σημείο λήψης της μηχανής έχει μετατοπιστεί ελαφρώς εξαιτίας της κίνησης του οχήματος. Οι μηχανές πρέπει να βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση (portrait) ώστε η κίνηση του παραθύρου έκθεσης να είναι χονδρικά παράλληλη με την κίνηση του οχήματος. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται τότε είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με τις παραμορφώσεις που θα εμφανίζονταν αν η κάμερα ήταν οριζόντια (land-

scare) με το παράθυρο του κλείστρου να κινείται κατακορύφως ενώ η κάμερα κινείται οριζοντίως.

1.1.3 Εντοπισμός θέσης (Positioning)

Η ακριβής εκτίμηση της θέσης των οχημάτων της Street View είναι προφανώς ζωτικής σημασίας για την ένταξη των πανοραμικών εικόνων στους χάρτες Street Maps της Google και για την διασφάλιση της εύκολης πλοήγησης από τον χρήστη (Anguelon et al., 2010). Η γεωαναφορά των εικόνων πραγματοποιείται με συνδυασμένη χρήση δεκτών GPS, αισθητήρων μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής των τροχών του οχήματος (*wheel speed sensors*) και αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης (Wikipedia, 2015). Οι οδηγοί των οχημάτων λαμβάνουν σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες πλοήγησης από έναν αλγόριθμο φιλτραρίσματος των παρατηρήσεων κίνησης, ο οποίος βασίζεται στην λογική των φίλτρων Kalman. Μετά από την συλλογή των παρατηρήσεων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Google Pose Optimizer (GPO)³ προκειμένου να επιτευχθεί πιο ομαλή και τοπικά ακριβής λύση που αφορά τόσο την θέση και προσανατολισμό (*pose*) των αισθητήρων όσο και τον προσανατολισμό και την πορεία του οχήματος.

Μετά τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του οχήματος, τα αποτελέσματα συνδυάζονται με οδικούς χάρτες, δημιουργώντας ένα στοχαστικό μοντέλο του οδικού δικτύου με τη μορφή γράφου, στο οποίο ενσωματώνονται όλοι οι γνωστοί δρόμοι και διασταυρώσεις. Το μοντέλο περιλαμβάνει πληροφορίες για μονοδρόμους ή περιορισμούς σε στροφές (απαγορευτικά στροφής ή αναστροφής). Με χρήση του εν λόγω μοντέλου μετασχηματίζεται η πληροφορία θέσης και προσανατολισμού του οχήματος σε τελική θέση επί της οδού.

1.1.4 Έξυπνη πλοήγηση σε 3D δεδομένα

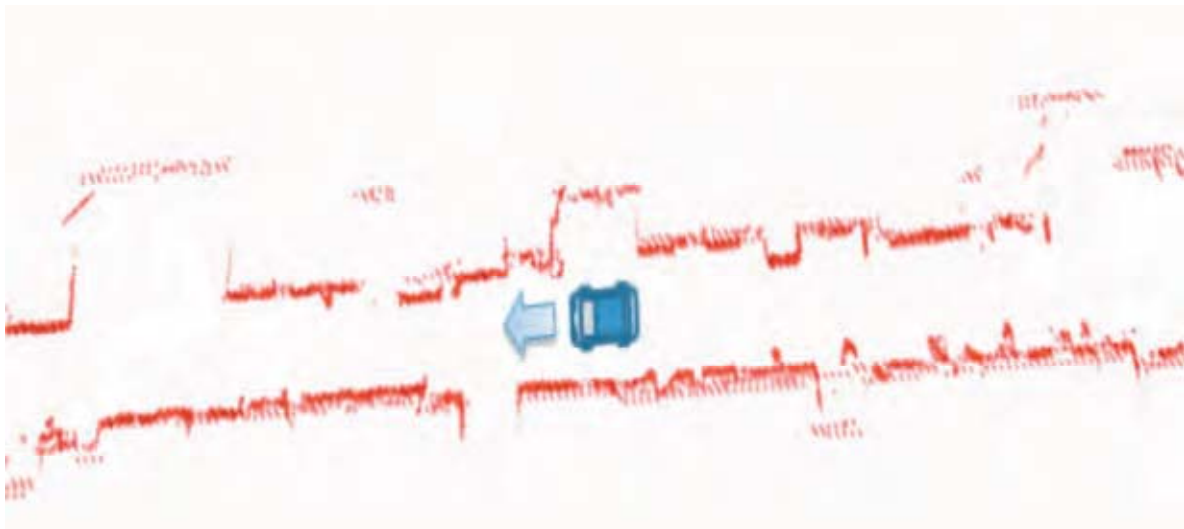
Το Street View υποστηρίζει έναν μοναδικό τρόπο πλοήγησης σε τρισδιάστατα δεδομένα, ο οποίος επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν με τον δρομέα (*cursor*) ένα σημείο στην εικόνα πλοήγησης και να μεταφερθούν στην εικόνα που βρίσκεται εγγύτερα στην τρισδιάστατη θέση του σημείου. Όπως φαίνεται και στην Εικ. 1.10, ανάλογα με το σημείο όπου τοποθετείται ο κέρσορας εμφανίζεται ένα μεταβαλλόμενο σχήμα που υποδεικνύει τον προσανατολισμό του επιπέδου επί του οποίου κείται το σημείο.

Η δυνατότητα παροχής αυτής της επιλογής στους χρήστες προϋποθέτει την ύπαρξη ενός χάρτη όπου είναι αποθηκευμένα η απόσταση και ο προσανατολισμός κάθε σημείου στην εικόνα (Anguelon et al., 2010). Οι εικόνες από τα πρόσφατα εξοπλισμένα οχήματα της Google συνοδεύονται από μετρήσεις σαρωτών laser, οι οποίοι προσδιορίζουν το βάθος των σημείων που βρίσκονται στις δύο πλευρές και μπροστά από το όχημα. Το σύνολο αυτής της επιπλέον πληροφορίας για την απόσταση υφίσταται επεξεργασία και απλοποιείται με την παρεμβολή ενός νέφους σημείων όπου μοντελοποιούνται οι κυριότερες επιφάνειες που εμφανίζονται στην εικόνα. Σε περιοχές όπου υπάρχουν μόνο προηγούμενης τεχνολογίας δεδομένα, το βάθος υπολογίζεται αποκλειστικά από τις εικόνες με την μέθοδο της οπτικής ροής (*optical flow*). Για την ανάκτηση μόνο των κύριων επιφανειών, επιβάλλεται ένα μοντέλο αποτελούμενο μόνο από τα κύρια επίπεδα των προσόψεων των κτιρίων ("*piecewise planar global model*"), το οποίο προσαρμόζεται στα δεδομένα που προέκυψαν από την οπτική ροή. Στην Εικ. 1.11 φαίνεται ένα παράδειγμα με το προϊόν εφαρμογής της μεθόδου οπτικής ροής σε κάτοψη, ενώ στην Εικ. 1.12 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από τα πιο σύγχρονα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με σαρωτές laser.

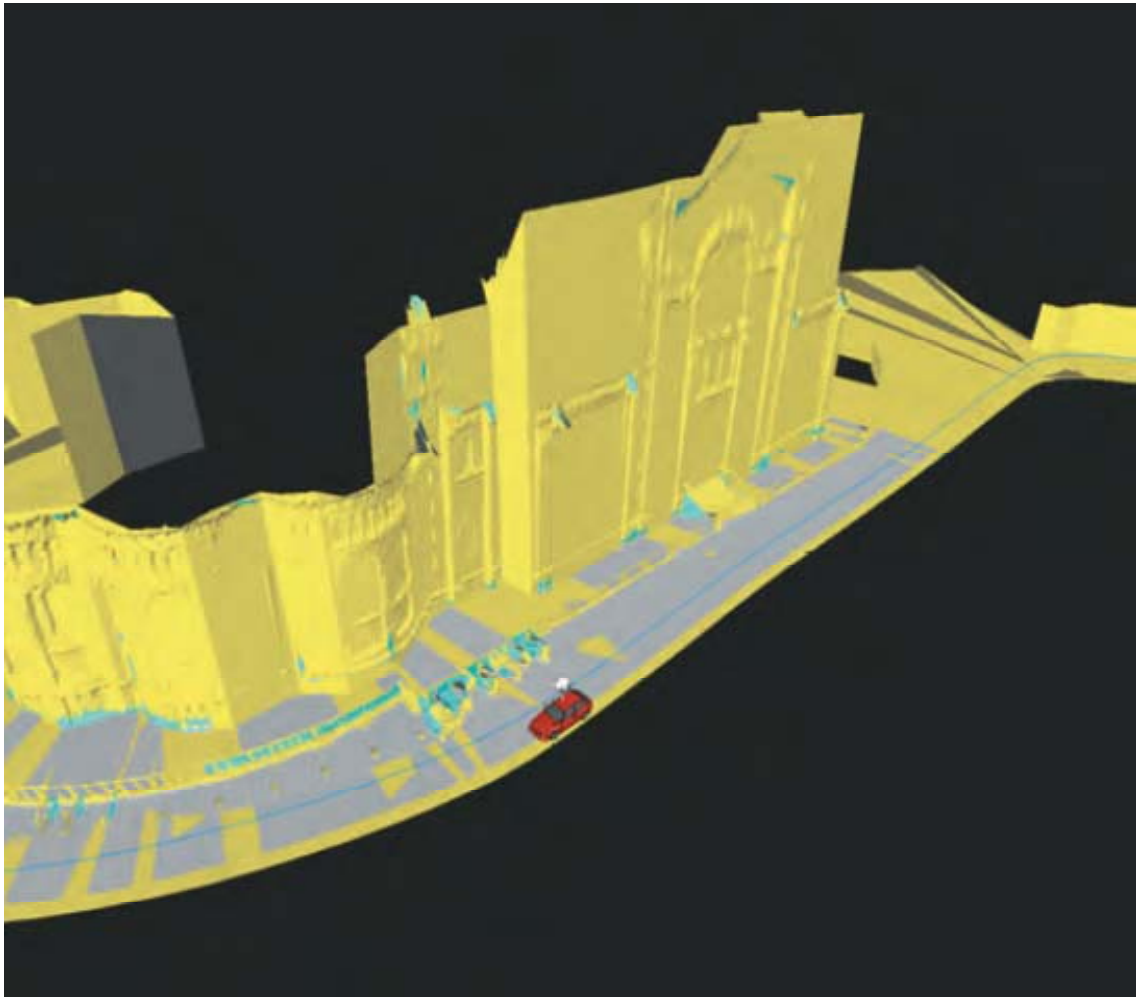
³ Πληροφορίες για τον αλγόριθμο, ο οποίος είναι υλοποιημένος σε C++ και αυτή την στιγμή (Αύγουστος 2015) ελεύθερα προσβάσιμος: <https://code.google.com/p/gpo/wiki/GPO>



Εικόνα 1.10: Δυνατότητα Πλοήγησης “click to go” (Anguelon et al., 2010).



Εικόνα 1.11: Παράδειγμα σημείων πρόσοψης που προέκυψαν με την μέθοδο της οπτικής ροής σε κάτοψη (Anguelon et al., 2010).



Εικόνα 1.12: Τρισδιάστατο νέφος σημείων που προέκυψε από σαρωτές laser, την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και φιλτράρισμά τους μεσω της παρεμβολής των κύριων επιπέδων της σκηνής (Anguelon et al., 2010).

Μετά από την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου των προσόψεων μπορεί να δημιουργηθεί ένας χάρτης βάθους (*depth map*) από την ανασύνθεση της ακτίνας για κάθε θέση του πανοράματος. Στην υλοποίηση της Google κάθε σημείο του χάρτη βάθους μπορεί να απεικονιστεί με την αναζήτηση σε έναν πίνακα που περιλαμβάνει τις εξισώσεις όλων των τρισδιάστατων επιπέδων της εικόνας, γεγονός που επιτρέπει την ανασύνθεση του πανοράματος από τον υπολογιστή του χρήστη με χρήση του κατάλληλου κώδικα. Το μέγεθος του αρχείου του χάρτη βάθους μειώνεται περαιτέρω με την εφαρμογή μη απωλεστικής συμπίεσης (*lossless compression*) στο περιεχόμενό του, με αποτέλεσμα το αρχείο, μεγέθους μερικών kByte, να μπορεί εύκολα να ανακτηθεί μέσω Διαδικτύου από τον χρήστη και να επιτρέψει την λειτουργία της τρισδιάστατης πλοήγησης.

1.1.5 Υπολογισμός τρισδιάστατων μοντέλων στο Google Street View

Η τρισδιάστατη πληροφορία αξιοποιείται και σε ακόμη μια εφαρμογή: στην δημιουργία τρισδιάστατων φωτορραλιστικών μοντέλων στο Google Earth. Παλαιότερα τα μοντέλα αυτά ενσωμάτωναν εικονιστική πληροφορία από κατακόρυφες και πλάγιες δορυφορικές εικόνες που δεν παρείχαν ρεαλιστική εμπειρία περιήγησης στο μοντέλο. Η εικονιστική πληροφορία για τις προσόψεις προκύπτει πλέον με δημιουργία μωσαϊκών από πολλα-

πλές πανοραμικές εικόνες, αφού πρώτα φιλτραριστούν αντικείμενα που βρίσκονται μπροστά από τις προσόψεις των κτιρίων, οι οποίες στην συνέχεια συνδυάζονται με τις δορυφορικές εικόνες ώστε να υπάρχει πληροφορία για το σύνολο του κτιρίου. Τα αποτελέσματα πριν και μετά από την αξιοποίηση αυτών των δεδομένων απεικονίζονται στις Εικ. 1.13 και 1.14, ενώ στην Εικ. 1.15 παρουσιάζεται παράδειγμα τρισδιάστατου φωτορρεαλιστικού μοντέλου του Google Earth στον ελληνικό χώρο.



Εικόνα 1.13: Φωτορρεαλιστικό μοντέλο του Google Earth πριν από την ενσωμάτωση εικονιστικής πληροφορίας από πανοραμικές εικόνες (Anguelov et al., 2010).



Εικόνα 1.14: Φωτορρεαλιστικό μοντέλο του Google Earth μετά από την ενσωμάτωση εικονιστικής πληροφορίας από πανοραμικές εικόνες (Anguelov et al., 2010).



Εικόνα 1.15: Παράδειγμα φωτορρεαλιστικού μοντέλου του Google Earth στον ελληνικό χώρο (Οδός Βασ. Σοφίας).

1.1.6 Παροχή της πληροφορίας στους χρήστες

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει μια σειρά υπολογιστικών διαδικασιών (*pipeline*) μέσω της οποίας γίνεται η επεξεργασία των εικόνων που συλλέχθηκαν προκειμένου να παραχθούν οι τελικές πανοραμικές εικόνες. Στην

συνέχεια αυτές διαιρούνται σε τμήματα (*tiles*) και αποθηκεύονται σε πολλαπλά επίπεδα μεγέθυνσης, τα οποία επιτρέπουν στον χρήστη να δει τις εικόνες σε ανάλυση ανάλογη με το σημείο θέασής του, καθώς και να μεγεθύνει περιοχές της εικόνας χωρίς να χρειάζεται να ανακτήσει ολόκληρο το πανόραμα (Anguelon et al., 2010). Στην συνέχεια εφαρμόζονται αλγόριθμοι αναγνώρισης προσώπων και πινακίδων αυτοκινήτων σε όλες τις προς δημοσίευση εικόνες, τα οποία και αλλοιώνονται σκόπιμα σύμφωνα με την πολιτική προστασίας προσωπικών δεδομένων, ένα βήμα το οποίο είναι πολύ απαιτητικό υπολογιστικά (Frome et al., 2009).

Ο όγκος δεδομένων που καλείται να παράσχει το Street View είναι τεράστιος, καθώς καλύπτει περισσότερες από 30 χώρες σε παγκόσμιο επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, σε εκδήλωση τύπου το 2012 η Google ανακοίνωσε ότι τα οχήματα του Street Maps έχουν συλλέξει 20 petabytes δεδομένων και έχουν διανύσει απόσταση μεγαλύτερη από 5 εκατομμύρια μίλια (περίπου 8 εκατομμύρια χιλιόμετρα), καλύπτοντας 39 χώρες και περίπου 3000 πόλεις παγκοσμίως (Farber, 2012). Προκειμένου να εξασφαλιστεί κατά το δυνατόν μικρότερη καθυστέρηση μεταφοράς (*latency*) των δεδομένων στον χρήστη (*client*), οι εξυπηρετητές (*servers*) του Street View είναι κατανεμημένοι σε κέντρα δεδομένων σε όλο τον κόσμο.

1.1.7 Ζητήματα προσωπικών δεδομένων

Πριν από την εφαρμογή αλγορίθμων ώστε αλλοιωθούν σκόπιμα τα χαρακτηριστικά ατόμων που απεικονίζονται σε εικόνες του Street View, είχε ανακύψει ένα σοβαρό ζήτημα που αφορούσε την προστασία προσωπικών δεδομένων ατόμων που είχαν φωτογραφηθεί ερήμην τους και χωρίς την άδειά τους. Ενδεικτικά μπορεί να παραπέμψει κανείς στον Geissler (2012), ο οποίος συγκρίνει από νομική σκοπιά την προστασία των προσωπικών δεδομένων στις ΗΠΑ και την Γερμανία, και τον Blackman (2009), ο οποίος εξετάζει την περίπτωση της συνεχούς παρακολούθησης (*omniveillance*) ορμώμενος από την εφαρμογή του *Google Street View*. Παρ' ότι η Google έχει προβεί στην αλλοίωση των προσώπων όσων ατόμων απεικονίζονται σε εικόνες της, υπάρχουν ακόμη προστριβές με ανθρώπους («επώνυμους», όπως ο δημιουργός του facebook Mark Zuckerberg, και μη), οι οποίοι δεν επιθυμούν να απεικονίζονται οι προσόψεις των κατοικιών τους στο Google Street View και ζητούν την αλλοίωσή τους ('θόλωση': *blurring* – Εικ. 1.16) [βλ. Miners, 2015]. Άλλη χαρακτηριστική περίπτωση προστριβής της εταιρείας αφορά την Γερμανία, στην οποία η Google αναγκάστηκε λόγω των πολλών αντιδράσεων και της αυστηρής νομοθεσίας να διακόψει την λειτουργία του Street View.



Εικόνα 1.16: Αλλοίωση πρόσοψης κατοικίας στο Google Street View (Miners, 2015).

1.2 Εφαρμογές που αξιοποιούν την πληροφορία του Street View

Ο τεράστιος όγκος οργανωμένης πληροφορίας που περιλαμβάνει το Google Street View και το πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών στο οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών επιστημονικών εργασιών στο συγκεκριμένο πεδίο. Στόχος της παρούσας ενότητας είναι να αναφέρει εν συντομία ενδεικτικές ερευνητικές εργασίες που αξιοποιούν την πληροφορία του Google Street View σε διάφορες εφαρμογές, αναδεικνύοντας με τον τρόπο αυτό τόσο το επιστημονικό ενδιαφέρον όσο και το εύρος εφαρμογών που αξιοποιούν την εν λόγω πληροφορία.

Έτσι, οι Zahir & Shah (2011) χρησιμοποιούν τις πανοραμικές εικόνες του Google Street View ως εικόνες αναφοράς για την γεωαναφορά εικόνων που δεν διαθέτουν γεωχωρική ένταξη. Διαιρούν κάθε πανόραμα σε 4 οριζόντιες εικόνες οριζόντιου γωνιακού ανοίγματος 90° και μια επιπλέον εικόνα που απεικονίζει το άνω τμήμα του πανοράματος, και εξάγουν για κάθε εικόνα σημεία με τον τελεστή SIFT. Οργανώνουν την πληροφορία σε δενδρικές δομές ώστε να ελαχιστοποιήσουν τους υπολογισμούς, προσδιορίζουν τα σημεία SIFT για την εξεταζόμενη εικόνα και μετά από την εφαρμογή διαδικασιών για τον καθαρισμό των δεδομένων (τεχνική “data pruning” και εφαρμογή Γκαουσιανού φίλτρου εξομάλυνσης στα σημεία) προσδιορίζουν εκείνη την εικόνα αναφοράς, τα σημεία SIFT της οποίας παρουσιάζουν την καλύτερη συνταύτιση με τα σημεία SIFT της εικόνας. Για την γρήγορη αναζήτηση των ομοιοτήτων με την λογική του εγγύτερου γείτονα χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors)⁴. Μετά από τον εντοπισμό της εικόνας αναφοράς προσδιορίζεται η σύνδεση μεταξύ των εικόνων (image alignment) και με χρήση των συντεταγμένων του πανοράματος στο οποίο ανήκει η εικόνα προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του σημείου λήψης της εικόνας, ενώ μπορεί να προσεγγισθεί και ο προσανατολισμός της εικόνας που εξετάζεται.

Οι Agarwal et al. (2015) αναπτύσσουν μεθοδολογία για την γεωαναφορά μιας διαδρομής μέσω της λήψης διαδοχικών προοπτικών εικόνων κατά μήκος της, αξιοποιώντας τις γνωστής θέσης και προσανατολισμού πανοραμικές εικόνες του Google Street View ως εικόνες αναφοράς. Το σύστημά τους προϋποθέτει την a priori γνώση των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας, καθώς και την χρήση κάποιου αδρανειακού συστήματος για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού μεταξύ διαδοχικών εικόνων. Μια άλλη εφαρμογή γεωαναφοράς με χρήση του Google Street View αφορά την συνταύτιση εικόνων που έχουν ληφθεί μέσω ενός MAV (Micro Aerial Vehicle) και των γνωστής θέσης και προσανατολισμού πανοραμικών εικόνων του Google Street View (Majdik et al., 2013).

Χρησιμοποιώντας ένα αντίστοιχο σύστημα καταγραφής με εκείνο του Google Street View, το σύστημα της εταιρείας NAVTEQ⁵, οι Pylvänäinen et al. (2010) αναπτύσσουν μια μεθοδολογία για την αυτόματη αναγνώριση κτιρίων και την επισήμανσή τους με μάσκα, συνδυάζοντας δεδομένα από πανοραμικές εικόνες και νέφη σημείων από σαρωτές laser. Χρησιμοποιούν ένα γενικό τρισδιάστατο περίγραμμα των απεικονιζόμενων κτιρίων (που θα μπορούσε να προέρχεται από έναν τρισδιάστατο κτηματολογικό χάρτη) ώστε να διορθώσουν την γεωαναφορά του τρισδιάστατου νέφους σημείων, στην συνέχεια συνδέουν τις πανοραμικές εικόνες με το νέφος σημείων και χρησιμοποιούν μεθοδολογία γράφων (graph cuts) για την κατάτμηση κάθε πανοραμικής εικόνας ώστε να προσδιορίσουν το περίγραμμα του κτιρίου σε αυτή (Εικ. 1.17). Τέλος, για την αντιμετώπιση τυχόν

⁴ Για περισσότερες πληροφορίες για την βιβλιοθήκη FLANN ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στους (Mujas & Lowe, 2014) καθώς και τον ιστότοπο: <http://www.cs.ubc.ca/research/flann/>

⁵ Για περισσότερες πληροφορίες για το σύστημα: <http://www.pocketgpsworld.com/making-navteq-maps-a1038.php>
<https://en.wikipedia.org/wiki/Navteq>

αποκρύψουν τμημάτων του κτιρίου σε ένα πανόραμα αναπτύσσουν μεθοδολογία που επιτρέπει τον προσδιορισμό της μάσκας του κτιρίου από πολλαπλές πανοραμικές εικόνες. Οι μάσκες που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως σε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (*augmented reality*) που αναπτύσσονται σε κινητά τηλέφωνα για την έξυπνη πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 1.17: Μάσκες κτιρίων για εφαρμογές Mobile Augmented Reality (MAR) [Pylvänäinen et al., 2010].

Οι Salmen et al. (2012) αξιοποιούν την εικονιστική πληροφορία του Google Street View για την συλλογή σημάτων οδικής κυκλοφορίας που απεικονίζονται σε μικρό υποσύνολο των εικόνων του Google Street View και την χρήση τους σε συστήματα υποβοήθησης οδήγησης (*vision-based assistance systems*). Στο πλαίσιο της εργασίας τους, αναπτύσσουν αλγόριθμο που συλλέγει τα ID διαδοχικών πανοραμάτων τα οποία απεικονίζονται σε μια οριζόμενη από τον χρήστη περιοχή πάνω σε έναν χάρτη. Με χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου συνέλεξαν έτσι εικόνες κατά μήκος διαδρομών σε διάφορα μέρη του πλανήτη, μήκους μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων η κάθε μια. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας ημι-επιβλεπόμενη διαδικασία εντοπίζουν και κατηγοριοποιούν τα σήματα κυκλοφορίας που εντοπίζονται στο Google Street-View. Για την αρχική εκπαίδευση του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης (*machine learning*), εισάγουν την βάση σημάτων German Traffic Sign Recognition Benchmark (GTSRB), που αναπτύχθηκε από τους Stallkamp et al. (2011), και κατηγοριοποιούν τα σήματα που εξαγάγει από τις εικόνες του Google Street View. Στην συνέχεια ελέγχουν τα αποτελέσματα, τα κατηγοριοποιούν σε σωστά (*positive*) και εσφαλμένα (*negative*), και επαναλαμβάνουν την διαδικασία. Στα συμπεράσματά τους υποστηρίζουν ότι το Street View αποτελεί μια πολύ καλή πηγή πληροφορίας, η οποία προσφέρεται προς εκμετάλλευση σε εφαρμογές *machine learning*.

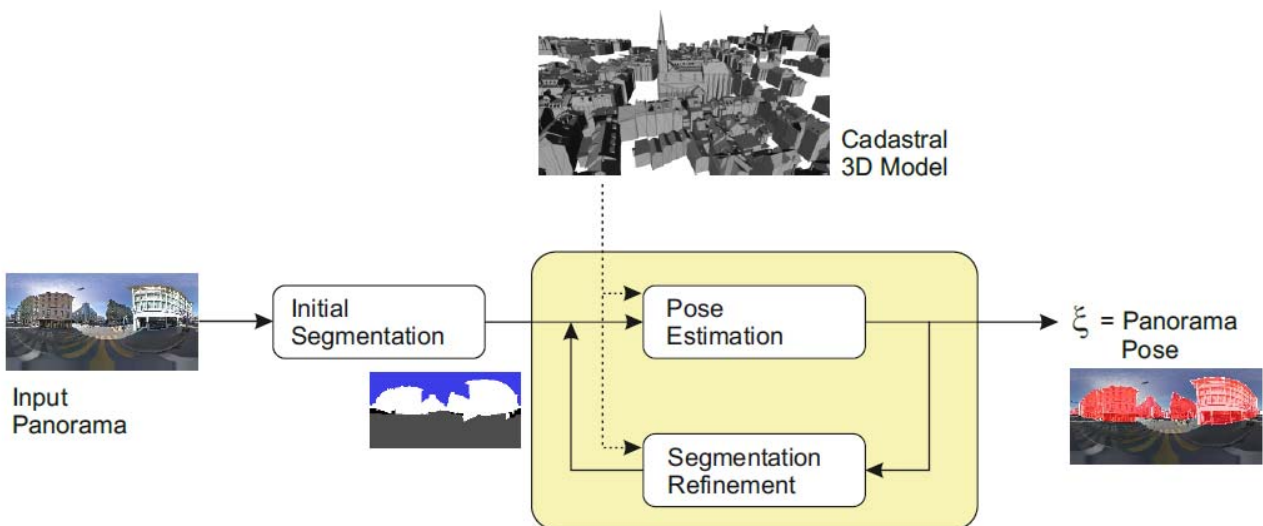
Οι Taneja et al. (2014) παρουσιάζουν μια μεθοδολογία για την πραγματοποίηση συνεχούς εντοπισμού θέσης ενός οχήματος από εικόνες που λαμβάνονται από την κάμερα ενός κινητού τηλεφώνου, αξιοποιώντας τους χάρτες (τον γράφο) του Street View και τα γνωστής θέσης και προσανατολισμού πανοράματα του Google Street View. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως αναδρομική Μπαγεσιανή εκτίμηση (*recursive Bayesian estimation*) της θέσης και του προσανατολισμού του οχήματος σε σχέση με τον γράφο που απεικονίζει την θέση και τις σχέσεις γειτνίασης μεταξύ των εικόνων του *Google Street View*. Παρά την χρήση απλού εξοπλισμού (κάμερα κινητού με διαδοχικές λήψεις περίπου ανά 7 m) και την όχι και τόσο πυκνή κάλυψη (βάσεις λήψης ανά περίπου 12 m) με εικόνες αναφοράς από το Google Street View, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι ο αλγόριθμός τους επιτυγχάνει

υψηλή ακρίβεια εντοπισμού.

Παράλληλα, οι Taneja et al. (2012) βελτίωσαν την γεωαναφορά των πανοραμικών εικόνων του Google Street View αξιοποιώντας τρισδιάστατη πληροφορία των κτηματολογικών διαγραμμάτων, ούτως ώστε οι εικόνες με διορθωμένη γεωαναφορά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως ο αστικός σχεδιασμός, η εκτίμηση της αξίας ακινήτων και η ανίχνευση μεταβολών σε αστικό περιβάλλον (Εικ. 1.18). Η μεθοδολογία τους βασίζεται στα εξής βήματα: Αρχικά, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους γεωαναφοράς και προσανατολισμού των εικόνων του Google Street View, δημιουργούν εικόνες των επιφανειών των κτιρίων από τα τρισδιάστατα κτηματογραφικά μοντέλα (μέσω τεχνικών *rendering*). Παράλληλα, πραγματοποιούν μια αρχική κατάτμηση της εικόνας του Street View, η οποία ταξινομεί κάθε pixel της εικόνας σε μια από τις κατηγορίες: ουρανός, κτίρια, δρόμος, δέντρα, οχήματα ή πεζοί. Στην συνέχεια συγκρίνουν τις περιοχές οι οποίες έχουν κατηγοριοποιηθεί ως κτίρια στην εικόνα που έχει προκύψει από την κατάτμηση και την εικόνα που έχει προκύψει από το 3D μοντέλο, και βελτιστοποιούν τις παραμέτρους προσανατολισμού των εικόνων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την σύγκλιση του αλγορίθμου (Εικ. 1.19).



Εικόνα 1.18: (a) Επίθεση της εικόνας που προέκυψε από το 3D μοντέλο και τις παραμέτρους γεωαναφοράς και προσανατολισμού του Street View στην πανοραμική εικόνα. (b) Επίθεση της εικόνας που προέκυψε από το 3D μοντέλο και τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους στην πανοραμική εικόνα (Taneja et al., 2012).

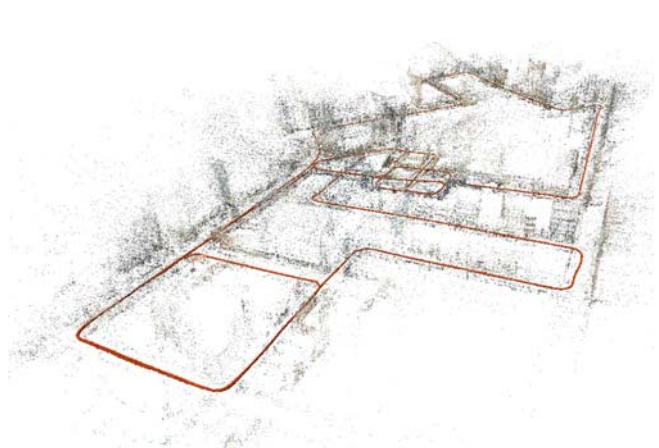


Εικόνα 1.19: Περιγραφή του αλγορίθμου που προτείνεται για την βελτίωση της γεωαναφοράς και του προσανατολισμού πανοραμικών εικόνων του Google από 3D δεδομένα (Taneja et al., 2012)

Σε άλλη εργασία τους, οι Taneja et al. (2013) προτείνουν αλγόριθμο για την ανίχνευση μεταβολών (*change de-*

tection) μεταξύ των στοιχείων ενός τρισδιάστατου κτηματολογικού χάρτη και πρόσφατων εικόνων του Google Street View, με στόχο τον εντοπισμό των περιοχών των οποίων τα γεωμετρικά στοιχεία έχουν υποστεί μεταβολές και χρειάζονται εκ νέου μετρήσεις πεδίου για την ενημέρωση του κτηματολογικού χάρτη. Για την βελτίωση της γεωαναφοράς των εικόνων και την σύγκριση με τα τρισδιάστατα δεδομένα χρησιμοποιούν τμήματα του αλγορίθμου των Taneja et al. (2012). Για τον εντοπισμό των μεταβολών βασίζονται σε αλγόριθμο που είχαν περιγράψει σε άλλη προηγούμενη εργασία τους (Taneja et al., 2011), στην οποία έκαναν επίσης εντοπισμό μεταβολών, που όμως δεν ήταν προσαρμοσμένος να λειτουργεί σε επίπεδο μιας ολόκληρης πόλης. Στο στοχαστικό μοντέλο που αναπτύσσουν λαμβάνουν υπόψη και αντιμετωπίζουν προβλήματα που σχετίζονται με τυχόν μικρές ανακρίβειες στα τρισδιάστατα κτηματογραφικά μοντέλα, την αβεβαιότητα στην γεωαναφορά των εικόνων και τις μεγάλες βάσεις λήψης (που μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ έντονες αφινικές παραμορφώσεις και σε αποκρύψεις τμημάτων των κτιρίων) προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την ανίχνευση ψευδών μεταβολών.

Υπάρχουν επίσης εφαρμογές που επικεντρώνονται στην αξιοποίηση των πανοραμικών εικόνων του Street View για τον προσδιορισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων που απεικονίζονται σε αυτές. Για παράδειγμα, ο Havlena (2012) παρουσιάζει έναν αλγόριθμο SfM (*structure from motion*) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα *Pittsburgh Research Data Set* που έχουν πυκνότερη κάλυψη από τις συνήθεις εικόνες του Google Street View (Εικ. 1.20). Για την σύνδεση μεταξύ διαδοχικών εικόνων χρησιμοποιεί τον τελεστή SURF και φιλτράρει τα προκύπτοντα ομόλογα σημεία με χρήση του αλγορίθμου RANSAC. Τα σημεία σύνδεσης εν συνεχεία συνορθώνονται με συνόρθωση δέσμης και προσδιορίζονται οι 3D συντεταγμένες τους, καθώς και οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων λήψης. Ο συγγραφέας δεν κάνει χρήση των συντεταγμένων GPS των σημείων λήψης ως αρχικών τιμών για την επίλυση της συνόρθωσης, αλλά προσδιορίζει τις προσωρινές συντεταγμένες από τον επιπολικό πίνακα που προκύπτει από τα ομόλογα σημεία για κάθε ζεύγος εικόνων. Η μεθοδολογία του βέβαια απαιτεί βάσεις μεταξύ των εικόνων μικρότερες από τις τυπικές βάσεις του Street View, που είναι της τάξης των 12 m και οδηγούν σε προοπτικές παραμορφώσεις μη διαχειρίσιμες με τους γνωστούς τελεστές συνταύτισης χαρακτηριστικών (SIFT, SURF κ.α.).



Εικόνα 1.20: Αριστερά: Σημεία λήψης πανοραμικών εικόνων του Pittsburgh Research Data Set. Δεξιά: Νέφος τρισδιάστατων σημείων που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου SfM (Havlena, 2012).

Ακόμα, οι Tsai & Chung (2012a) εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να υπολογίσουν με εμπροσθοτομία τις τρισδιάστατες συντεταγμένες σημείων που απεικονίζονται σε δύο ή τρεις πανοραμικές εικόνες του Google Street View χρησιμοποιώντας τις γνωστές συντεταγμένες των σημείων λήψης των εικόνων, ενώ αναπτύσσουν

και Διαδικτυακή εφαρμογή για τον σκοπό αυτό (Tsai & Chung, 2012b). Τα σημεία στην έρευνά τους ορίζονται από τον χρήστη. Στο ίδιο πνεύμα, ερευνητές της Google (Klingner et al., 2013) παρουσιάζουν την εφαρμογή ενός πολύ πιο σύνθετου μαθηματικού μοντέλου, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση του κυλιόμενου κλείστρου στις εικόνες καθώς και διανύσματα μετάθεσης του κέντρου λήψης μεταξύ τμημάτων της ίδιας πανοραμικής εικόνας, για την συνόρθωση πολύ μεγάλου αριθμού εικόνων με την μέθοδο της δέσμης (και την διόρθωση των συντεταγμένων των σημείων λήψης των πανοραμικών). Για την απλοποίηση της μοντελοποίησης οι πανοραμικές εικόνες διαιρούνται σε πολλές μικρότερες στοιχειώδεις εικόνες (*feature images*). Ένα από τα εντυπωσιακότερα στοιχεία αυτής της εργασίας είναι το γεγονός ότι ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε παγκόσμια κλίμακα.

Τέλος, προκειμένου να αναδειχθεί το εύρος των εφαρμογών συμπεριλαμβάνεται εδώ και μια εφαρμογή του Google Street View που ξεφεύγει από την θεώρηση του μηχανικού που ακολουθείται στο υπόλοιπο κείμενο και η οποία σχετίζεται περισσότερο με τις επιστήμες της κοινωνιολογίας, της εγκληματολογίας και της προληπτικής ιατρικής και επιδημιολογίας. Έτσι, οι Rundle et al. (2011) προτείνουν την χρήση του Google Street View για την “συστηματική κοινωνική παρατήρηση” (*Systematic Social Observation*) περιοχών. Στο πλαίσιο αυτό εκτιμάται η ποιότητα διαβίωσης σε μια περιοχή βάσει του φυσικού περιβάλλοντος (πλήθος οχημάτων, καθαριότητα, ύπαρξη γκράφιτι κ.α.), πράγμα που διαχρονικά προσδιοριζόταν με επιτόπια παρατήρηση και έλεγχο (*auditing*). Πολύ πρόσφατα μάλιστα, οι Bader et al. (2015) ανέπτυξαν το λογισμικό CANVAS (*Computer Assisted Neighborhood Visual Assessment System*) το οποίο, κάνοντας χρήση του Google Street View, επιτρέπει την μέσω του υπολογιστή εκτίμηση των συνθηκών που επικρατούν σε μια γειτονιά και σχετίζονται με την υγεία των κατοίκων, απαλλάσσοντας έτσι τρόπον τινά τους ειδικούς από την ανάγκη επιτόπιας έρευνας.

1.3 Google Street View Image API

Το Google Street View Image API επιτρέπει την ενσωμάτωση στατικών (μη διαδραστικών) εικόνων του Street View σε μια ιστοσελίδα χωρίς την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού *Javascript*. Το παράθυρο προβολής ορίζεται μέσω παραμέτρων ενσωματωμένων σε μια διεύθυνση URL, όπου αποστέλλονται ως τυπική αίτηση http (http ‘GET’ request), η οποία επιστρέφει ένα τμήμα του πανοράματος ως στατική εικόνα. Η εφαρμογή είναι ελεύθερη χωρίς χρέωση, με όριο χρήσης που φτάνει τα 25.000 αιτήματα ανά εικοσιτετράωρο. Για εφαρμογές μεγαλύτερων απαιτήσεων η Google εφαρμόζει κλιμακωτή πολιτική πληρωμής⁶. Οι εικόνες που ανακτώνται αποτελούν προοπτικά καρέ οριζόντιου γωνιακού ανοίγματος έως και 120° που προκύπτουν από ανασύνθεση του αντίστοιχου τμήματος της πανοραμικής.

1.3.1 Παράμετροι στην διεύθυνση URL

Ένα αίτημα (request) για Street View Image έχει την ακόλουθη μορφή:

<https://maps.googleapis.com/maps/api/streetview?parameters>

όπου η εικόνα ορίζεται από τις παραμέτρους που τοποθετούνται μετά το αγγλικό ερωτηματικό “?”. Οι παράμετροι χωρίζονται μεταξύ τους με χρήση του χαρακτήρα “&”⁷. Στα επόμενα περιγράφονται οι επιτρεπόμενες παράμετροι και οι επιτρεπτές τιμές τους.

⁶ <https://developers.google.com/maps/documentation/streetview/usage-limits>

⁷ Στα αγγλικά το συμπλεκτικό σύμβολο “&” ονομάζεται *ampersand*.

1.3.1.1 Απαραίτητες παράμετροι

Θέση (*location*): Γεωδαιτικές συντεταγμένες ενός σημείου *latitude/longitude*. Οι συντεταγμένες εκφράζονται σε μοίρες σε δεκαδική μορφή. Το Google Street View Image API θα ανακτήσει αυτόματα το πανόραμα που βρίσκεται εγγύτερα στις εν λόγω συντεταγμένες. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ορισμού της θέσης μέσω κειμένου (πχ. Chagrin Falls, OH), η οποία όμως δεν αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Εναλλακτικά μπορεί να ορίσει κανείς το πανόραμα από το ID του με χρήση της παραμέτρου *pano*.

Μέγεθος (*size*): Η παράμετρος ορίζει τις διαστάσεις της προκύπτουσας εικόνας: πλάτος x ύψος (*{width}x{height}*). Για παράδειγμα η ρύθμιση: *size=600x400* επιστρέφει εικόνα με 600 στήλες και 400 γραμμές. Μέγιστες διαστάσεις εικόνας για την δωρεάν εφαρμογή του API είναι 640x640, ενώ για την έκδοση υπό πληρωμή φτάνει και τα 2048x2048.

1.3.1.2 Προαιρετικές παράμετροι

Οριζόντια Διεύθυνση (*heading*): Ορίζει την γωνία διεύθυνσης της εικόνας. Οι τιμές μπορούν να κυμαίνονται από 0° έως και 360° (οι δύο αυτές διευθύνσεις επιστρέφουν εικόνα με το κέντρο της να είναι προσανατολισμένο βόρεια). Σε περίπτωση όπου η παράμετρος δεν ρυθμιστεί, υπολογίζεται αυτόματα η τιμή εκείνη η οποία συνδέει το εγγύτερο σημείο λήψης με το σημείο που ορίστηκε από την παράμετρο θέσης.

Οριζόντιο εύρος λήψης (*fov*): ορίζει το οριζόντιο γωνιακό άνοιγμα της εικόνας. Η τιμή του από προεπιλογή είναι ίση με 90°, ενώ η μέγιστη επιτρεπτή τιμή είναι 120°. Αν το μέγεθος της εικόνας διατηρείται σταθερό, τότε το οριζόντιο γωνιακό άνοιγμα αντιπροσωπεύει την μεγέθυνση σε μια εικόνα, με μικρότερες τιμές του γωνιακού ανοίγματος να υποδηλώνουν μεγαλύτερο *zoom*.

Γωνία ύψους (*pitch*): ορίζει την στροφή περί τον οριζόντιο άξονα X της μηχανής. Η τιμή της γωνίας ύψους είναι από προεπιλογή ίση με 0°. Θετικές τιμές στρέφουν την κάμερα προς τα πάνω με την τιμή +90° να αντιστοιχεί στο ζενίθ, ενώ αρνητικές τιμές την στρέφουν προς τα κάτω με την τιμή -90° να αντιστοιχεί στο ναδίρ.

Κλειδί (*key*): επιτρέπει την παρακολούθηση της χρήσης του API από τον χρήστη μέσω του *Google Developers Console*, καθώς και την επιβολή των ορίων χρήσης της εφαρμογής με βάση το κλειδί και όχι την διεύθυνση IP αποστολής των αιτημάτων⁸.

1.3.1.3 Παράδειγμα χρήσης του Google Street View Image API

Για παράδειγμα, για ζητούμενες γεωδαιτικές συντεταγμένες (*latitude, longitude*)= (37.9758823°, 23.778111°), ζητούμενο μέγεθος εικόνας ίσο με 640x320, γωνία διεύθυνσης ίση με 70°, εύρος λήψης ίσο με 90° και γωνία ύψους ίση με 0°, θα διατύπωνε κανείς το αίτημα ως εξής:

[https://maps.googleapis.com/maps/api/streetview?location=\(37.9758823,23.778111\)&size=640x320&heading=70&fov=90&pitch=0](https://maps.googleapis.com/maps/api/streetview?location=(37.9758823,23.778111)&size=640x320&heading=70&fov=90&pitch=0)

Η εικόνα που επιστρέφεται στην συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικ. 1.21.

⁸ Οι οδηγίες για την δημιουργία ενός νέου κλειδιού δίνονται στην σελίδα:
<https://developers.google.com/maps/documentation/streetview/get-api-key>



Εικόνα 1.21: Παράδειγμα λήψης εικόνας με χρήση του Google Street View Image API (πύλη του ΕΜΠ στην οδό Ηρώων Πολυτεχνείου).

Για πιο αναλυτικά παραδείγματα και επιπλέον πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στην ιστοσελίδα του Google Street View API (Google, 2015b).

1.4 Google Maps JavaScript API- Google Street View Service

Το Google Maps JavaScript API επιτρέπει στον χρήστη να ενσωματώνει σε δική του ιστοσελίδα χάρτες του Google Maps και να αξιοποιεί υπηρεσίες όπως, για παράδειγμα, η λήψη οδηγιών μετακίνησης και η μετατροπή διευθύνσεων (οδός και αριθμός) σε γεωδαιτικές συντεταγμένες και τούμπαλιν. Σε αντίθεση με τα API που βασίζονται στην διατύπωση των αιτημάτων σε URL, το JavaScript API προσφέρει πολύ περισσότερες επιλογές ρυθμίσεων στις παραμέτρους των αντικειμένων της Google, καθώς και περισσότερες λειτουργίες όσον αφορά την διαδραστικότητα των χαρτών. Η επικοινωνία του χρήστη με τους server της Google που παρέχουν τα δεδομένα γίνεται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού JavaScript, μιας γλώσσας που χρησιμοποιείται σε περιβάλλον σελίδων html για την ανάπτυξη Διαδικτυακών εφαρμογών. Για τον λόγο αυτό, απαραίτητη προϋπόθεση για την χρήση της υπηρεσίας είναι οι βασικές, τουλάχιστον, γνώσεις σύνταξης κώδικα σε html και JavaScript. Στο Διαδίκτυο υπάρχουν πολλοί ιστότοποι που παρέχουν αναλυτικά εγχειρίδια για την εκμάθηση των παραπάνω γλωσσών. Από αυτούς μπορεί κανείς να ξεχωρίσει τα πολύ αναλυτικά *tutorial* της σελίδας *w3schools.com*⁹. Η Google προσφέρει αναλυτικά tutorial για την εξοικείωση με τα έτοιμα αντικείμενα και τις συναρτήσεις που διαθέτει το Google Maps JavaScript API¹⁰.

Το Google Maps JavaScript API παρέχει την υπηρεσία Street View Service για την ανάκτηση και επεξεργασία των εικόνων που χρησιμοποιούνται στο Google Maps Street View. Η Street View Service υποστηρίζεται εγγενώς στο πλαίσιο του εκάστοτε προγράμματος περιήγησης που χρησιμοποιείται από τον χρήστη (Google Developers, 2015a).

⁹ Html tutorial: <http://www.w3schools.com/html/>

Javascript tutorial: <http://www.w3schools.com/js/>

¹⁰ <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/tutorial>

Μέσω της υπηρεσίας Street View Service ο χρήστης μπορεί να ενσωματώσει στην ιστοσελίδα του εικόνες του Street View οι οποίες είτε συνδέονται με την επιλογή τοποθεσιών από έναν χάρτη είτε είναι αυτοτελή αντικείμενα που επιτρέπουν στον χρήστη την πλοήγηση στο Street View. Στην εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, η συγκεκριμένη υπηρεσία χρησιμοποιήθηκε για την άμεση πρόσβαση που παρέχει στα δεδομένα του Street View, δηλαδή την πρόσβαση στα μεταδεδομένα μιας πανοραμικής εικόνας, χωρίς να χρειάζεται η χρήση ενός χάρτη ή κάποιου ήδη ανοιχτού πανοράματος. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή χρησίμευσε για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του σημείου λήψης της πανοραμικής εικόνας, η οποία να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 50 m από τις προσεγγιστικές συντεταγμένες που αρχικά εισάγονται στον κώδικα. Περισσότερες πληροφορίες αναφορικά με τον συγκεκριμένο κώδικα δίνονται στο Κεφάλαιο 3, όπου και περιγράφεται αναλυτικά ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε.

2 Πανοραμικές Εικόνες

2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο πανοραμική εικόνα, ή πανόραμα, ορίζονται εν γένει εικόνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλο γωνιακό άνοιγμα, έως και 360°. Ανάλογα με την τιμή του γωνιακού ανοίγματος μπορεί κανείς να διακρίνει τρεις κατηγορίες πανοραμικών εικόνων: ευρυγώνιο πανόραμα (wide-angle panorama) με γωνιακό άνοιγμα <180°, πανόραμα ανοίγματος 180° και πλήρες πανόραμα (ανοίγματος 360°).¹¹ Οι ψηφιακές πανοραμικές εικόνες είναι δυνατόν να δημιουργηθούν με διάφορες τεχνικές, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες:

- Χρήση περιστρεφόμενης γραμμικής κάμερας (*rotating line camera*). Πρόκειται για ψηφιακές μηχανές που χρησιμοποιούν μια γραμμική διάταξη (δηλαδή μιας στήλης) CCD για την σύνθεση της ψηφιακής εικόνας καθώς η κάμερα περιστρέφεται. Ένα παράδειγμα είναι η μηχανή Roundshot Livecam D2¹².
- Χρήση καταδιοπτρικών (*catadioptric*) μηχανών λήψης. Αυτές αποτελούνται από φακούς και καμπύλους καθρέφτες που ανακλούν γωνιακό άνοιγμα έως και 360° στο σύστημα του φακού. Το σχήμα των καθρεφτών και ο φακός έχουν επιλεγεί και διαταχθεί κατά τρόπον ώστε η κάμερα να διατηρεί ένα μοναδικό σημείο λήψης.
- Με την λήψη πολλών διαδοχικών ομόκεντρων εικόνων, με επαρκή βαθμό επικάλυψης μεταξύ τους, και την σύνθεσή τους σε ενιαίο πανόραμα με χρήση κατάλληλου λογισμικού επεξεργασίας. Αυτή η συνηθέστερη και οικονομικότερη μεθοδολογία είναι που θα εξεταστεί σε μεγαλύτερο βάθος στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

Το 1843 και το 1844 οι Joseph Puchberger (Αυστρία) και Friedrich von Martens (Γερμανία), αντίστοιχα, κατέθεσαν τα πρώτα καταγεγραμμένα διπλώματα ευρεσιτεχνίας για την κατασκευή πανοραμικών μηχανών λήψης¹³, οι οποίες βασιζόνταν στην απεικόνιση με την τεχνική της “δαγεροτυπίας” (Daguerreotype). Η εισαγωγή του εύκαμπτου φιλμ (flexible film) επέφερε επανάσταση στον τρόπο λήψης πανοραμικών εικόνων, με πολλές πλέον νέες πανοραμικές μηχανές λήψης να εισάγονται στην αγορά. Δύο είναι οι βασικές τεχνικές λήψης πανοραμικών εικόνων με φιλμ. Η μια περίπτωση βασίζεται στην περιστροφή του φακού: οι κάμερες φέρουν φακό ο οποίος περιστρέφεται περί το σημείο λήψης, ενώ η αποτύπωση γίνεται σε καμπύλο επίπεδο του φιλμ. Τέτοιου είδους τεχνικές μπορούν να πετύχουν γωνιακό άνοιγμα έως και 140°-150°. Η άλλη εκδοχή αφορά τις τεχνικές πλήρους περιστροφής: ένας μηχανισμός περιστρέφει την κάμερα συνεχώς και κινεί το φιλμ με τρόπον ώστε η κίνησή του να ακολουθεί την κίνηση της απεικόνισης.



Εικόνα 2.1: Πανόραμα της πόλης Pasadena, Μάρτιος 1908 - Library of Congress Prints and Photographs Division Washington (<http://www.loc.gov/pictures/resource/pan.6a17605/>)

¹¹ <https://photographylife.com/panoramic-photography-howto>

¹² http://www.roundshot.com/xml_1/internet/en/application/d77/d89/f98.cfm

¹³ <http://site.douban.com/195886/widget/notes/11812927/note/252569163/>



Εικόνα 2.2: Πανόραμα του Los Angeles από το ξενοδοχείο Trenton, 1907 - Library of Congress Prints and Photographs Division Washington (<http://www.loc.gov/pictures/resource/pan.6a17994/?co=pan>)

Σε αντιδιαστολή με τα προαναφερθέντα, το παρόν κεφάλαιο έχει ως στόχο την συνοπτική παρουσίαση της διαδικασίας κατασκευής πανοραμάτων από πολλαπλές εικόνες. Για τον σκοπό αυτό αναλύονται εν συντομία οι βασικές θεωρητικές έννοιες που συνδέονται με την παραγωγή πανοραμικών εικόνων, ενώ αναπτύσσονται, σε θεωρητικό επίπεδο όσο και μέσω της εφαρμογής τους με χρήση του ελεύθερου πακέτου λογισμικού *Hugin*, και τα βασικά στάδια παραγωγής ενός πανοράματος.

Οι δύο βασικοί τύποι αλγορίθμων που είναι απαραίτητοι για την κατασκευή πανοραμικής εικόνας είναι εκείνοι για τον προσδιορισμό των παραμέτρων σύνδεσης μεταξύ των εικόνων (*image alignment*) και για την συνένωση, ή συρραφή, πολλαπλών εικόνων σε ενιαίο πανόραμα (*image stitching*).

Οι αλγόριθμοι *σύνδεσης* ή *συρραφής* εικόνων προσδιορίζουν σχέσεις ομολογίας (*correspondence relationships*) ανάμεσα σε εικόνες με κάποιο βαθμό επικάλυψης. Ανάλογα με την προσέγγισή τους αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους άμεσους ή ψηφιδικούς (*direct* ή *pixel-based*) αλγορίθμους, οι οποίοι εξετάζουν την σχέση μεταξύ εικόνων σε επίπεδο εικονοψηφίδας, και τους βασιζόμενους σε χαρακτηριστικά (*feature-based*), οι οποίοι επιδιώκουν να συνδέσουν επικαλυπτόμενες εικόνες εξετάζοντας μόνο χαρακτηριστικές περιοχές στην κάθε εικόνα. Οι εντοπιζόμενες ομολογίες επιτρέπουν εν συνεχεία να βρεθεί η συγκεκριμένη γεωμετρική σχέση που συνδέει τις εικόνες.

Οι αλγόριθμοι *συνένωσης* εικόνων αξιοποιούν τις παραμέτρους που προκύπτουν από αυτό το βήμα σύνδεσης των εικόνων προκειμένου να τις συγχωνεύσουν (*blending*) σε ενιαίο πανόραμα ώστε να μην είναι ορατές οι μεταξύ τους "ραφές". Παράλληλα, διορθώνουν τυχόν προβλήματα λόγω θόλωσης (*blurring*) της εικόνας ή λόγω υπαρξής δευτερογενών σχηματισμών (*ghosting*) που οφείλονται, αντίστοιχα, στην παράλλαξη ή την κίνηση αντικειμένων κατά την λήψη. Τέλος, κατά την συνένωση εικόνων διορθώνονται και ενδεχόμενες διαφορές στην έκθεση μεταξύ γειτονικών εικόνων.

Η δομή του κεφαλαίου έχει ως εξής. Αρχικά παρουσιάζονται συνοπτικά βασικές έννοιες που αφορούν τα συστήματα αναφοράς και τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα σύνδεσης για την αντιστοίχιση των συντεταγμένων ενός pixel από μια εικόνα σε μιαν άλλη. Κατόπιν παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων σύνδεσης μεταξύ εικόνων με μεθόδους βάσει χαρακτηριστικών, ενώ έπονται οι αναφορές στην συνόρθωση πολλών εικόνων σε ενιαίο πανόραμα (*bundle adjustment*), την διασφάλιση της οριζοντιότητάς του, την αφαίρεση της παράλλαξης (*parallax removal*) και την αυτόματη εύρεση των σχέσεων μεταξύ ενός συνόλου εικόνων για την αυτόματη αναγνώριση του πανοράματος. Τέλος, υπάρχει μια σύντομη αναφορά στην λογική των αλγορίθμων συρραφής πολλαπλών εικόνων σε ενιαίο πανόραμα ή μωσαϊκό.

Βασική πηγή αναφοράς για την συγγραφή του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η θεμελιώδης δημοσίευση του

Szeliski (2006), στην οποία παρουσιάζονται εκτενώς αλγόριθμοι σύνδεσης και συνένωσης (συρραφής) εικόνων. Επίσης, αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας για την δημιουργία πανοραμικών εικόνων, με έμφαση όμως σε πιο πρακτικά θέματα, όπως η διαδικασία λήψης των εικόνων στο πεδίο και η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού για την σύνθεση του πανοράματος, υπάρχει στους Wells et al. (2007).

2.2 Εισαγωγικές έννοιες- Μοντέλα κίνησης

Το πρώτο βήμα για την δημιουργία ενός πανοράματος είναι η σύνδεση μεταξύ των επικαλυπτόμενων εικόνων που θα το αποτελέσουν. Η σύνδεση μεταξύ των εικόνων επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός μαθηματικού μοντέλου “κίνησης” μεταξύ των εικόνων. Συνήθως, με τον όρο πανοραμική νοείται εικόνα μεγάλου γωνιακού ανοίγματος η οποία έχει προκύψει από ομόκεντρες λήψεις, δηλαδή το σύνολο της εικόνας χαρακτηρίζεται από ένα σημείο λήψης, σε αντίθεση με τα μωσαϊκά (*mosaic*), τα οποία γενικά προκύπτουν με την σύνδεση εικόνων από διαφορετικά σημεία λήψης. Τόσο οι πανοραμικές εικόνες όσο και τα μωσαϊκά απαντώνται στην διεθνή βιβλιογραφία και υπό τον όρο σύνθετα (*composites*), ενώ και οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση όσο και την συνένωση των εικόνων έχουν εφαρμογή και στα δύο είδη συνθέτων.

Προϋπόθεση για να περιγραφούν οι βασικές έννοιες των αλγορίθμων σύνδεσης είναι η σύντομη εισαγωγή στα βασικά συστήματα συντεταγμένων και τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ εικόνων.

2.2.1 Συστήματα συντεταγμένων

2.2.1.1 Σύστημα εικονοσυντεταγμένων

Πρόκειται για το σύστημα αναφοράς της ψηφιακής εικόνας. Είναι ένα δισδιάστατο σύστημα αναφοράς με αρχή το κέντρο της εικόνας. Το σύστημα εικονοσυντεταγμένων x, y συνδέεται με το σύστημα της εικόνας $\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}$ μέσω των παραμέτρων εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής μέσω της σχέσης:

$$\begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{y} \\ \underline{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ f \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

όπου x_0, y_0 είναι οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της εικόνας και f η εστιακή απόσταση (ή ακριβέστερα η σταθερά c της μηχανής). Σε περίπτωση όπου το μοντέλο του εσωτερικού προσανατολισμού περιλαμβάνει και την ακτινική διαστροφή του φακού, θα πρέπει και αυτή να συνυπολογιστεί στην Εξ. (2.1).

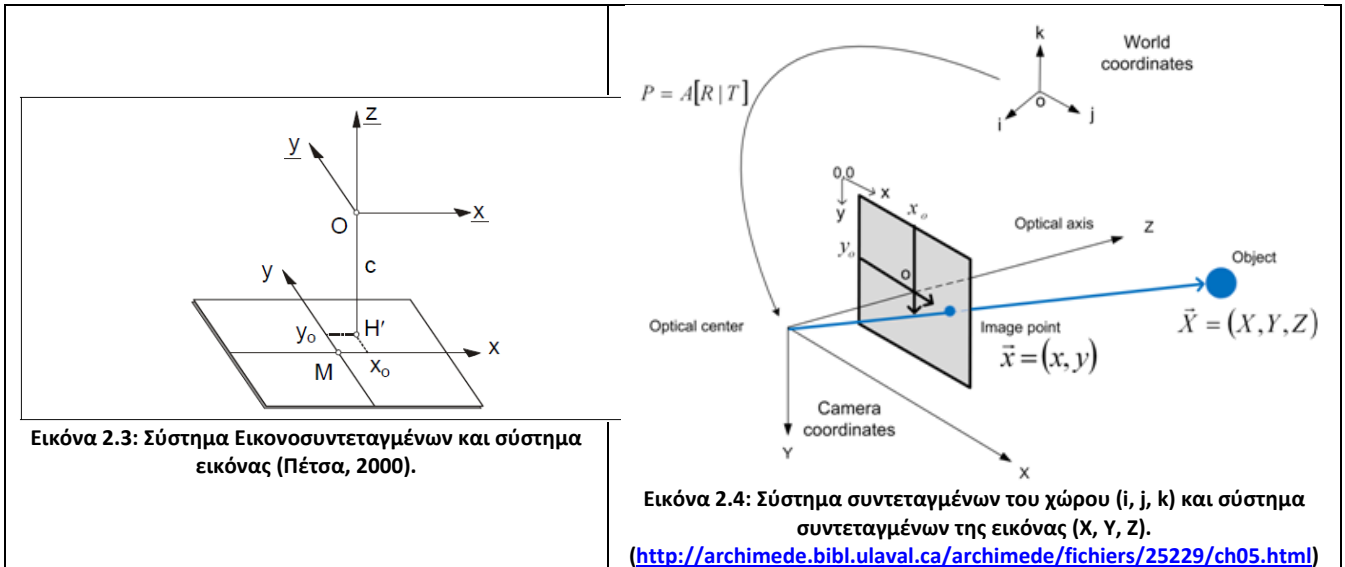
Ο Szeliski (2006) προτείνει την χρήση ενός κανονικοποιημένου συστήματος εικονοσυντεταγμένων, καθώς αυτό διευκολύνει την εργασία με εικόνες σε διαφορετικές αναλύσεις (όταν, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται πουραμίδες εικόνων). Για μια τυπική ορθογωνική εικόνα οι συντεταγμένες των pixel κατά τον μεγαλύτερο άξονα κυμαίνονται από -1 έως 1 , ενώ κατά τον μικρότερο από $-a$ έως a , όπου το a είναι ο λόγος της μικρότερης προς την μεγαλύτερη διάσταση της εικόνας. Οι σχέσεις μεταξύ των συντεταγμένων της εικόνας σε pixel (\bar{x}, \bar{y}) και των συντεταγμένων στο κανονικοποιημένο σύστημα (x, y) είναι (με το W να είναι ο αριθμός των pixel κατά x και H κατά y):

$$x = \frac{2\bar{x}-W}{S}, \text{ και } y = \frac{2\bar{y}-H}{S}, \text{ όπου } S = \max(W, H) \quad (2.2)$$

2.2.1.2 Σύστημα εικόνας

Σύστημα της εικόνας, ή αλλιώς σύστημα της μηχανής, $\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}$ ονομάζεται το δεξιόστροφο τρισσορθογώνιο σύ-

σημα συντεταγμένων που έχει ως κέντρο το σημείο λήψης O (προβολικό κέντρο), τον άξονα z κάθετο στο επίπεδο της εικόνας και τους άξονες x, y παράλληλους στους άξονες των εικονοσυντεταγμένων (Εικ. 2.3).



Εικόνα 2.3: Σύστημα Εικονοσυντεταγμένων και σύστημα εικόνας (Πέτσα, 2000).

Εικόνα 2.4: Σύστημα συντεταγμένων του χώρου (i, j, k) και σύστημα συντεταγμένων της εικόνας (X, Y, Z) .

<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/25229/ch05.html>

2.2.1.3 Σύστημα χώρου

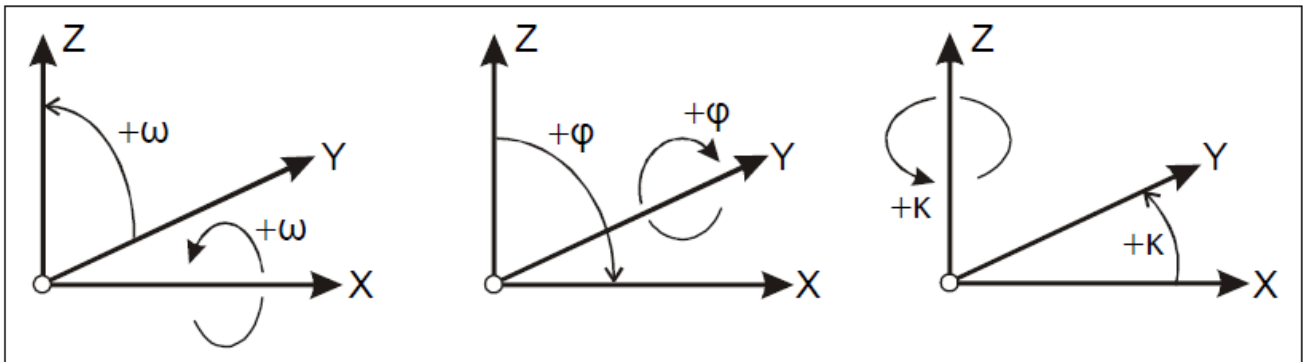
Οι εικονοσυντεταγμένες – και οι συντεταγμένες στο σύστημα της εικόνας – αποτελούν κατ’ αρχήν το “μέσον” προκειμένου να υπολογιστούν τελικά συντεταγμένες σημείων του χώρου (Πέτσα, 2000). Πρέπει, λοιπόν, να μετασχηματιστούν οι συντεταγμένες από το σύστημα της εικόνας σε εκείνο του χώρου μέσω ενός ευκλείδειου μετασχηματισμού είτε ενός μετασχηματισμού ομοιότητας. Το σύστημα του χώρου (βλ. Εικ. 1.4, αλλά με διαφορετικούς συμβολισμούς) μπορεί να είναι είτε κάποιο τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς είτε κάποιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, ανάλογα με το είδος και τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

2.2.1.4 Στροφές της εικόνας

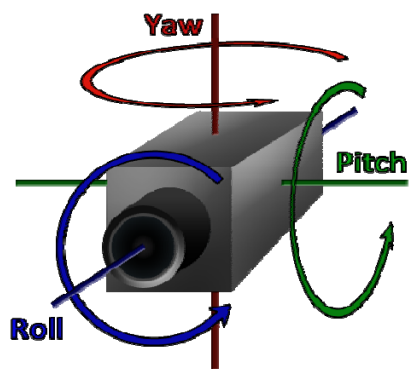
Είναι ακόμα σκόπιμο να γίνει αναφορά στον φορμαλισμό που χρησιμοποιείται για να περιγραφούν οι στροφές της εικόνας στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στην φωτογραμμετρία οι στροφές περί τους τρεις άξονες του συστήματος της εικόνας ονομάζονται και , αντίστοιχα (Εικ. 2.5). Η γωνία στρέφει το επίπεδο περί τον άξονα , η γωνία ιστρέφει το επίπεδο περί τον άξονα και η γωνία το επίπεδο περί τον άξονα . Θεωρείται ότι οι στροφές εφαρμόζονται με την σειρά που αναφέρθηκαν (), οπότε ο πίνακας στροφής μιας εικόνας εκφράζεται ως:

$$(2.3)$$

Εναλλακτικά, για την περιγραφή των στροφών χρησιμοποιούνται και οι αγγλικοί όροι *yaw*, *pitch* και *roll* (Εικ. 2.6). Ο όρος *yaw*, ή αλλιώς *pan* ή και *heading*, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την γωνία περί τον άξονα στο σύστημα της εικόνας και ταυτίζεται με την γωνία . Αντίστοιχα, η γωνία *pitch*, ή *tilt* ή αλλιώς γωνία ύψους, αναφέρεται στην στροφή περί τον άξονα στο σύστημα της εικόνας και ταυτίζεται με την γωνία . Τέλος, η γωνία *roll* εκφράζει την στροφή περί τον άξονα του συστήματος της εικόνας και συμπίπτει με την γωνία .



Εικόνα 2.5: Στροφές του συστήματος της εικόνας περί τους άξονες X,Y,Z: ω, φ, κ (Πέτσα, 2000).



Εικόνα 2.6: Στροφές της κάμερας yaw, pitch, roll (<http://aldream.net/article/2013-04-13-painter-s-algorithm>)

Μετά από τον ορισμό των βασικών συστημάτων αναφοράς και των στροφών μιας εικόνας μπορούν να εξεταστούν τα παραμετρικά μοντέλα κινήσεων, αρχικά για τον δισδιάστατο και εν συνεχεία για τον τρισδιάστατο χώρο. Η περιγραφή των κινήσεων θα γίνει μέσω ομογενών συντεταγμένων, η χρήση των οποίων έχει καθιερωθεί στον τομέα της Όρασης Υπολογιστών καθώς οδηγούν σε απλούστερες (γραμμικές) σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων σύνδεσης των εικόνων.

2.2.2 Κινήσεις στον Δισδιάστατο χώρο

Μετάθεση: Μια δισδιάστατη μετάθεση μπορεί να γραφεί ως $\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{t}$ ή σε ομογενείς συντεταγμένες:

$$\mathbf{x}' = [\mathbf{I} \ \mathbf{t}] \mathbf{x}, \text{ όπου } \mathbf{I} \text{ μοναδιαίος πίνακας } 2 \times 2 \text{ και } \mathbf{x} = (x, y, 1) \quad (2.4)$$

Μετάθεση και Στροφή: Ο μετασχηματισμός είναι γνωστός και ως δισδιάστατος ευκλείδειος μετασχηματισμός. Διατηρεί αναλλοίωτες τις ευκλείδειες αποστάσεις. Μαθηματικά μπορεί να γραφεί ως $\mathbf{x}' = \mathbf{R} \mathbf{x} + \mathbf{t}$ ή με βάση ομογενείς συντεταγμένες:

$$\mathbf{x}' = [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \mathbf{x}, \text{ όπου } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \text{ ο πίνακας στροφής κατά γωνία } \theta. \quad (2.5)$$

Μετασχηματισμός Ομοιότητας: Αποτελεί έναν συνδυασμό μετάθεσης, στροφής και αλλαγής κλίμακας του συστήματος. Διατηρεί αναλλοίωτες τις γωνίες μεταξύ των ευθειών. Μπορεί να εκφραστεί ως $\mathbf{x}' = s\mathbf{R} \mathbf{x} + \mathbf{t}$, όπου s ο συντελεστής κλίμακας. Σε ομογενείς συντεταγμένες γράφεται:

$$\bar{x}' = [s \mathbf{R} \mathbf{t}] \bar{x} \quad \text{ή αλλιώς} \quad \bar{x}' = \begin{bmatrix} s \cos \theta & s(-\sin \theta) & t_x \\ s \sin \theta & s \cos \theta & t_y \end{bmatrix} \bar{x} \quad (2.6)$$

Αφινικός Μετασχηματισμός: Αυτός μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση $\bar{x}' = \mathbf{A} \bar{x}$, όπου \mathbf{A} πίνακας 2×3 . Αυτός ο μετασχηματισμός διατηρεί την παραλληλία μεταξύ ευθειών και σε ομογενείς συντεταγμένες περιγράφεται από την σχέση:

$$\bar{x}' = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{bmatrix} \bar{x} \quad (2.7)$$

Προβολικός Μετασχηματισμός: Επίσης γνωστός και ως ομογραφία (*homography* ή *projective transform*), αυτός ο μετασχηματισμός διατηρεί τις ευθείες γραμμές:

$$\bar{x}' \sim \mathbf{H} \bar{x} \quad (2.8)$$

Ο τελεστής \sim υποδηλώνει ισότητα η οποία περιλαμβάνει πολλαπλασιασμό με σταθερά $\lambda > 0$ (Καλησπεράκης, 2010), ενώ ο πίνακας \mathbf{H} είναι πίνακας 3×3 . Ο πίνακας \mathbf{H} είναι ομογενής, δηλαδή ορίζεται χωρίς κλίμακα (*up to scale*). Οι ομογενείς συντεταγμένες \bar{x}' πρέπει να κανονικοποιηθούν ώστε να προκύψουν οι μη ομογενείς συντεταγμένες x', y' :

$$x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad \text{και} \quad y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (2.9)$$

2.2.3 Τρισδιάστατοι μετασχηματισμοί

Αντίστοιχη ιεραρχία υπάρχει και για τους τρισδιάστατους μετασχηματισμούς που μπορούν να εκφραστούν με πίνακες 4×4 για τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς μετάθεσης, στερεού σώματος, ομοιότητας, αφινικό και προβολικό μετασχηματισμό ή ομογραφία. Εδώ θα περιγραφεί μόνο η περίπτωση του προβολικού μετασχηματισμού 3D–2D, όσο και η ειδική περίπτωση σύνδεσης εικόνων οι οποίες έχουν ληφθεί από το ίδιο σημείο και διαφέρουν μόνο κατά προσανατολισμό.

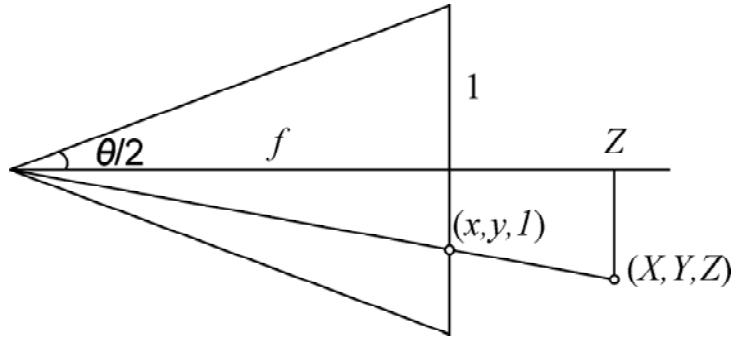
2.2.3.1 Κεντρική προβολή

Ο μετασχηματισμός κεντρικής προβολής προβάλλει τρισδιάστατες συντεταγμένες (X, Y, Z) μέσω οπής (*pinhole*), που αντιπροσωπεύει το σημείο λήψης της εικόνας, σε δισδιάστατες συντεταγμένες $x = (x, y, 1)$ σε ένα επίπεδο προβολής ευρισκόμενο σε απόσταση f (χρησιμοποιείται καταχρηστικά η εστιακή απόσταση, αντί της σταθεράς της μηχανής, κατά την σύμβαση που έχει επικρατήσει στην Όραση Υπολογιστών) στην διεύθυνση Z . Ισχύει ότι:

$$x = f \frac{X}{Z} \quad \text{και} \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad (2.10)$$

Η σχέση μεταξύ της (αδιάστατης, εάν τεθεί το ήμισυ της διάστασης της εικόνας ίσο με 1) εστιακής απόστασης και του γωνιακού ανοίγματος (Εικ. 2.7) δίνεται από την σχέση:

$$f^{-1} = \tan \frac{\theta}{2} \quad \text{ή} \quad \theta = \arctan \frac{1}{f} \quad (2.11)$$



Εικόνα 2.7 Εστιακή απόσταση και εύρος λήψης (Szeliski, 2006).

Διευκρινίζεται ότι στο συγκεκριμένο σχήμα θεωρείται τετραγωνική εικόνα, άρα το γωνιακό άνοιγμα είναι κοινό στην οριζόντια και την κατακόρυφη διάσταση. Εάν αντί για 1 τεθεί το ήμισυ της διάστασης της εικόνας σε pixel μπορεί να προσδιοριστεί η εστιακή απόσταση σε pixel.

Στην βιβλιογραφία των Γραφικών Υπολογιστών (*Computer Graphics*), ο προβολικός μετασχηματισμός γράφεται συνήθως ως ένας πίνακας αντιμετάθεσης (*permutation matrix*), ο οποίος μεταθέτει τα δύο τελευταία στοιχεία του ομογενούς διανύσματος $\mathbf{p} = (X, Y, Z, 1)$:

$$\bar{\mathbf{x}} \sim \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{p} \quad (2.12)$$

Στον τομέα της Όρασης Υπολογιστών συνηθίζεται να αγνοούνται οι τιμές της διάστασης Z (δηλαδή του βάθους) και η σχέση να γράφεται:

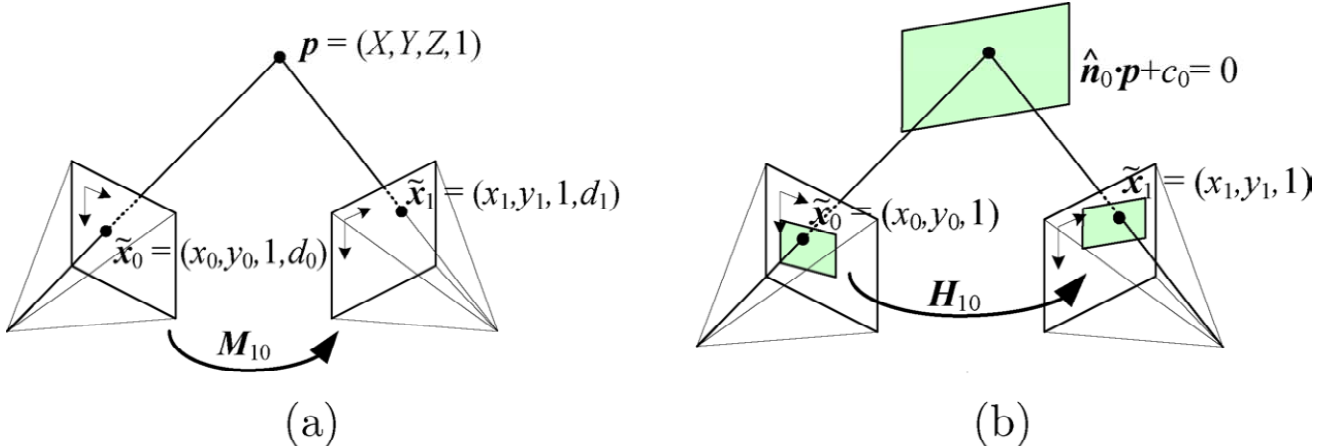
$$\bar{\mathbf{x}} \sim \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{p} = [\mathbf{K}|\mathbf{0}]\mathbf{p} \quad (2.13)$$

Ο Szeliski (2006) ονομάζει τον $\mathbf{K} = \text{diag}(f, f, 1)$ “πίνακα εσωτερικής βαθμονόμησης” (*intrinsic calibration matrix*), ωστόσο έχει επικρατήσει ο παλαιότερος όρος *camera matrix* (πχ. Hartley, 1994), που στα ελληνικά έχει αποδοθεί ως *πίνακας μηχανής* (Καλησπεράκης, 2010, Αδάμ, 2011). Σε περίπτωση που θεωρηθεί ένα πιο σύνθετο μοντέλο για την περιγραφή της κάμερας, προκύπτει η μορφή του άνω τριγωνικού πίνακα:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -f a_x & s & x_o \\ 0 & -f a_y & y_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

όπου x_o, y_o οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, a_x, a_y συντελεστές κλίμακας κατά x και y (ο λόγος a_x/a_y ορίζεται ως λόγος κλιμάκων – *aspect ratio*) και s (*skewness*) η απόκλιση των αξόνων από την ορθογωνικότητα. Για συνήθεις εφαρμογές αρκεί για τον πίνακα \mathbf{K} η απλή θεώρηση της Εξ. (2.13).

Ακολούθως θα εξεταστεί τι συμβαίνει για δύο εικόνες μιας τρισδιάστατης σκηνής από διαφορετικά σημεία λήψης και με διαφορετικούς προσανατολισμούς για την κάθε μια (Εικ. 2.8).



Εικόνα 2.8: Προβολή σημείου σε ζεύγος εικόνων. (α) Σχέση μεταξύ των τρισδιάστατων συντεταγμένων του σημείου $(X, Y, Z, 1)$ και των συντεταγμένων των προβολών του στις εικόνες. (β) Ομογραφία που προέκυψε από σημεία τα οποία κείνται στο ίδιο επίπεδο $[\hat{n}_0 p + c_0]$ [Szeliski, 2006].

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί ένας προβολικός πίνακας $P(4 \times 4)$, ο οποίος αντιστοιχίζει το ομογενές διάνυσμα $p = (X, Y, Z, 1)$ σε ένα ιδιάζον είδος ομογενούς διανύσματος της εικόνας $\bar{x} = (x, y, 1, d)$. Το άνω αριστερό 3×3 τμήμα του προοπτικού πίνακα είναι ο πίνακας K (γεγονός που τον κάνει συμβατό με την βιβλιογραφία της Όρασης Υπολογιστών), ενώ παράλληλα διατηρείται η πληροφορία βάθους της σκηνής, η οποία συμβολίζεται με d (ψηφιακή παράλλαξη – *disparity*) [Szeliski, 2006]:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} K & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} p = Pp \quad (2.15)$$

Το τρισδιάστατο σημείο p προβάλλεται στις εικονοσυντεταγμένες \bar{x}_0 δια του συνδυασμού ενός τρισδιάστατου μετασχηματισμού στερεού σώματος E_0 (2.16) και μιας προοπτικής προβολής P_0 (2.17):

$$x_0 = \begin{bmatrix} R_0 & t_0 \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} p = E_0 p \quad (2.16)$$

$$\bar{x}_0 \sim P_0 E_0 p \quad (2.17)$$

Υποθέτοντας πως γνωρίζει την τιμή της παράλλαξης d_0 για ένα pixel στην μια εικόνα, μπορεί να υπολογίσει κανείς τις τρισδιάστατες συντεταγμένες του στον χώρο χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$p \sim E_0^{-1} P_0^{-1} \bar{x}_0 \quad (2.18)$$

και στην συνέχεια να το προβάλλει στην άλλη εικόνα μέσω της σχέσης:

$$\bar{x}_1 \sim P_1 E_1 p = P_1 E_1 E_0^{-1} P_0^{-1} \bar{x}_0 = M_{10} \bar{x}_0 \quad (2.19)$$

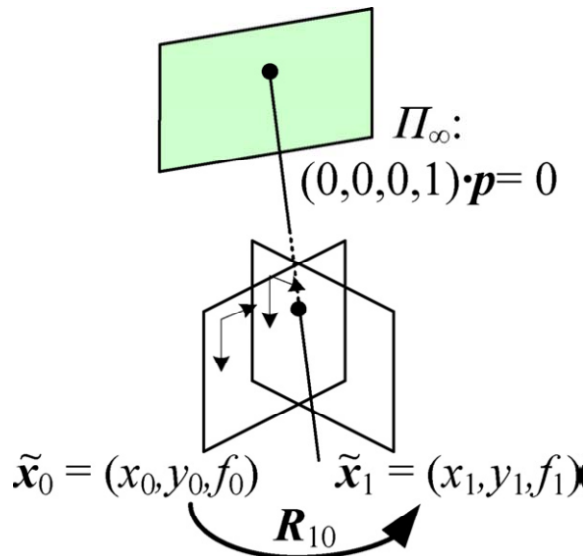
Ωστόσο, συνήθως δεν μπορούμε να αποκτήσουμε πρόσβαση στην πληροφορία του βάθους από ζεύγη εικόνων που έχουν ληφθεί με μη βαθμονομημένες κάμερες. Μπορεί όμως κανείς, όταν βέβαια αυτό είναι δυνατόν, να αντικαταστήσει την τελευταία γραμμή του μετασχηματισμού P_0 με μια εξίσωση επιπέδου $\hat{n}_0 p + c_0$, η οποία αντιστοιχεί σημεία στο επίπεδο σε τιμές $d_0 = 0$. Εάν έτσι τεθεί $d_0 = 0$, είναι δυνατόν να αγνοηθεί η τελευταία γραμμή και η τελευταία στήλη του πίνακα M_{10} . Τότε η Εξ. (2.19) απλοποιείται στην:

$$\overline{x_1} \sim \overline{H_{10}x_0} \quad (2.20)$$

όπου ο $\overline{H_{10}}$ είναι ένας πίνακας 3×3 (ομογραφία) και $\overline{x_0}, \overline{x_1}$ είναι δισδιάστατα ομογενή διανύσματα. Με αυτόν τον τρόπο δικαιολογείται η χρήση της ομογραφίας 8 παραμέτρων ως ένα γενικό μοντέλο σύνδεσης (*alignment model*) επικαλυπτόμενων εικόνων για την δημιουργία μωσαϊκών από επίπεδες σκηνές.

2.2.4 Περίπτωση πανοράματος από ομόκεντρες λήψεις περιστρεφόμενης μηχανής

Το βασικό μοντέλο για την παραγωγή πανοραμάτων αφορά την περίπτωση λήψεων όπου η κάμερα υπόκειται μόνο σε στροφές περί τους άξονές της, δηλαδή το σημείο λήψης παραμένει ίδιο για όλες τις εικόνες (Εικ. 2.9).



Εικόνα 2.9: Μοντέλο ομόκεντρων εικόνων. Οι παράμετροι της ομογραφίας εξαρτώνται μόνο από τις στροφές και την σταθερά της μηχανής κάθε εικόνας (Szeliski, 2006).

Θέτοντας τις μεταθέσεις $t_0 = t_1 = \mathbf{0}$ καταλήγει κανείς στην απλοποιημένη μορφή της Εξ. (2.19):

$$\overline{H_{10}} = K_1 R_1 R_0^{-1} K_0^{-1} = K_1 R_{10} K_0^{-1} \quad (2.21)$$

όπου $K_i = \text{diag}(f_i, f_i, 1)$ ο απλοποιημένος πίνακας μηχανής από την Εξ. (2.13). Επομένως, οι συντεταγμένες των δύο εικόνων συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{10} \begin{bmatrix} f_0^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & f_0^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

η οποία μπορεί να γραφεί και ως:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ f_1 \end{bmatrix} \sim R_{10} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Η Εξ. (2.23) αποκαλύπτει την απλότητα των εξισώσεων αντιστοίχισης-προβολής, και ταυτόχρονα επιτρέπει τον άμεσο προσδιορισμό όλων των παραμέτρων κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο, αντί για την γενική περίπτωση συσχέτισης εικόνων μέσω ομογραφίας 8 ανεξάρτητων παραμέτρων προκύπτουν μοντέλα στροφής στις τρεις δια-

στάσεις με 3-4 ή 5 παραμέτρους, αντίστοιχα, για την περίπτωση γνωστής, άγνωστης και σταθερής ή, τέλος, άγνωστης αλλά μεταβαλλόμενης εστιακής απόστασης (σταθεράς μηχανής). Η εκτίμηση του τρισδιάστατου πίνακα στροφής, και προαιρετικά της εστιακής απόστασης, είναι μια εγγενώς πιο σταθερή λύση σε σχέση με την χρήση γενικής ομογραφίας για την αλληλοσυσχέτιση των εικόνων, και για το λόγο αυτό προτιμάται βέβαια σε αλγορίθμους δημιουργίας πανοραμικών από την σύνδεση ομόκεντρων επικαλυπτόμενων εικόνων.

Σε περίπτωση όπου οι πανοραμικές εικόνες εκφραστούν ως συνδυασμός στροφών και εστιακών αποστάσεων, για την κάμερα κάθε εικόνας υπάρχουν περισσότεροι του ενός τρόποι προκειμένου να αναπαρασταθεί ο πίνακας στροφής:

- Χρήση του πλήρους πίνακα στροφής $R_{3 \times 3}$. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να γίνεται ορθογωνιοποίηση του πίνακα μετά από κάθε επανάληψη.
- Χρήση γωνιών Euler (α, β, γ), οι οποίες δεν προτιμώνται γιατί δεν επιτρέπουν πάντα την ομαλή μετάβαση από μια στροφή σε μια άλλη.
- Αναπαράσταση “άξονα/γωνίας στροφής” (axis/angle), όπου η στροφή εκφράζεται μέσω ενός μοναδιαίου διανύσματος \hat{n} και μιας στροφής θ περί αυτό, ή μέσω του γινομένου τους $\vec{\omega}$:

$$\vec{\omega} = \theta \hat{n} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) \quad (2.24)$$

Αυτή η αναπαράσταση όμως δεν έχει μοναδική λύση.

- Χρήση “μοναδιαίων τετραδονίων” (unit quaternions), τα οποία αναπαριστούν τις στροφές μέσω διανύσματος τεσσάρων στοιχείων:

$$\mathbf{q} = (x, y, z, w) = (\mathbf{v}, w) = \left(\sin \frac{\theta}{2} \hat{n}, \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.25)$$

όπου \hat{n} και θ είναι, αντίστοιχα, ο άξονας και η γωνία στροφής όπως και προηγουμένως.

2.3 Αλγόριθμοι σύνδεσης εικόνων (Image Alignment Algorithms)

2.3.1 Άμεσες μέθοδοι

Οι άμεσες, ή ψηφιδικές, μέθοδοι σύνδεσης μεταξύ δύο τέτοιων επικαλυπτόμενων εικόνων βασίζονται στην λογική της προσαρμογής (*warping*) της μιας εικόνας στην άλλη (Stegmann, 2001), με μαθηματικό μοντέλο σύνδεσης κάποιον από τους προαναφερθέντες μετασχηματισμούς, ώστε οι αντίστοιχες ψηφίδες της εικόνας αναφοράς και της μετασχηματισμένης να “συμφωνούν” όσο το δυνατόν περισσότερο. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου σύνδεσης βασίζεται δηλαδή στην συνταύτιση ψηφίδας προς ψηφίδα (pixel to pixel) μεταξύ των δύο εικόνων. Για τον σκοπό αυτό πρέπει να προσδιοριστεί η κατάλληλη μετρική συνάρτηση, βάσει της οποίας θα υπολογιστούν οι βέλτιστες παράμετροι. Μια συνήθης απλή επιλογή είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών των τιμών χρώματος μεταξύ των αντίστοιχων εικονοψηφίδων των δύο εικόνων, ενώ εναλλακτικά μπορεί να επιλεγούν και άλλες μετρικές που οδηγούν σε πιο εύρωστες λύσεις σε περίπτωση δεδομένων με πολύ θόρυβο, όπως πχ. η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών μεταξύ των αντίστοιχων εικονοψηφίδων των δύο εικόνων κ.λπ.

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε αυτή την προσέγγιση, όπως πχ. ο αλγόριθμος οπτικής ροής (*optical flow*) των Lucas & Kanade (1981) – βλ. ακόμη Szeliski (2004) και Baker & Matthews (2004) – χρησιμοποιούνται ευρέως σε

εφαρμογές όπως η σταθεροποίηση λήψεων video (video stabilization) και μπορούν να δώσουν αποτελέσματα σε περιπτώσεις σύνδεσης διαδοχικών στιγμιότυπων από δεδομένα video, αλλά δεν ενδείκνυται σε εφαρμογές όπως η σύνδεση επικαλυπτόμενων εικόνων σε ενιαίο πανόραμα. Ο βασικός λόγος είναι ότι δεν επιτρέπουν την πλήρως αυτοματοποιημένη σύνδεση μεταξύ τέτοιων εικόνων, καθώς απαιτούν την a priori γνώση προσωρινών τιμών ώστε να συγκλίνουν σε μια λύση. Η αναφορά αλγορίθμων σύνδεσης με την άμεση/ψηφιδική προσέγγιση έγινε απλώς για λόγους πληρότητας, και επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυσή τους. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην εύρεση και συνταύτιση χαρακτηριστικών επιτρέπουν αυτόματη σύνδεση μεταξύ εικόνων, και για τον λόγο αυτό αναλύονται εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

2.3.2 Μέθοδοι βάσει χαρακτηριστικών

Η συνταύτιση χαρακτηριστικών (*feature-based matching*) άρχισε να ερευνάται στις αρχές τις δεκαετίας του '80, όταν και έγινε αντιληπτό πως ο ανθρώπινος εγκέφαλος συνταυτίζει οντότητες με βάση τα χαρακτηριστικά τους και όχι τους τόνους της απόχρωσής τους (Αδάμ, 2011). Οι μέθοδοι συνταύτισης χαρακτηριστικών μπορούν να διακριθούν ανάλογα του είδους των οντοτήτων που μετέρχονται για την συνταύτιση (σημεία, γραμμές, ευθείες ή και επιφάνειες). Εδώ θα γίνει αναφορά μόνο σε μεθόδους συνταύτισης σημειακών χαρακτηριστικών, που είναι και οι πιο διαδεδομένες σε λογισμικά σύνθεσης πανοραμάτων.

Οι μέθοδοι συνταύτισης σημειακών χαρακτηριστικών βασίζονται στην εύρεση σημείων ενδιαφέροντος (αλλιώς χαρακτηριστικών σημείων) σε κάθε εικόνα και, εν συνεχεία, στην συνταύτιση των σημείων αυτών μεταξύ των εικόνων για την εύρεση ομόλογων σημείων, δια των οποίων θα υπολογιστούν οι παράμετροι του γεωμετρικού μοντέλου σύνδεσης των εικόνων.

2.3.2.1 Τελεστές ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος - Τελεστής Harris

Οι πρώτες εφαρμογές τέτοιου είδους μεθόδων χρονολογούνται στα τέλη της δεκαετίας του '70 και στις αρχές του '80, με πιο γνωστούς τους τελεστές εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος των Monavrec (1979), Förstner (1986) και Harris & Stevens (1988). Οι τελεστές βασίζουν την εύρεση των σημείων ενδιαφέροντος στην μεταβολή των τιμών φωτεινότητας στην εικόνα. Η Αδαμ (2011) περιγράφει το βασικό μαθηματικό μοντέλο για κάθε έναν από αυτούς τους τελεστές. Εδώ θα περιγραφεί μόνο ο τελεστής Harris, ως παράδειγμα για τον εντοπισμό σημείων ενδιαφέροντος σε εικόνες.

Ο τελεστής Harris ανιχνεύει σημεία, γωνίες (*corners*) ή ακμές. Αναπτύχθηκε από τους Harris & Stevens (1988) και βασίζεται στην εύρεση τοπικών ακροτάτων στην συνάρτηση μεταβολής των τιμών φωτεινότητας των εικονοψηφίδων. Καθώς, συνήθως, υπάρχουν μεταβολές στην φωτεινότητα μεταξύ σημείων θορύβου και των όμορων εικονοστοιχείων, οι εικόνες εξομαλύνονται με φίλτρο Gauss. Ειδικότερα, υπολογίζονται οι παράγωγοι $G_x(x)$, $G_y(x)$ της εικόνας I ως προς τις διευθύνσεις x και y :

$$\begin{aligned} G_x(x) &= \frac{\partial}{\partial x} G_{\sigma d}(x) * I(x) \\ G_y(x) &= \frac{\partial}{\partial y} G_{\sigma d}(x) * I(x) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Κατά τον υπολογισμό των παραγώγων εφαρμόζεται φίλτρο συνέλιξης $G_{\sigma d}(x)$, ο πυρήνας (kernel) του οποίου

υπολογίζει τις κλίσεις και ομαλοποιεί ταυτόχρονα την εικόνα με την εφαρμογή ενός φίλτρου Gauss μεγέθους σ_d (το φίλτρο ισοδυναμεί με εφαρμογή φίλτρου Gauss για την ομαλοποίηση της εικόνας και μετά συνέλιξη της εικόνας με φίλτρο κλίσης). Μέσω των παραγώγων προσδιορίζεται ο πίνακας αυτοσυσχέτισης (*autocorrelation*)¹⁴ για κάθε εικονοψηφίδα της εικόνας:

$$\mathbf{B}(x) = \begin{bmatrix} G_x^2(x) & G_x(x)G_y(x) \\ G_x(x)G_y(x) & G_y^2(x) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Αυτός υπολογίζεται για ένα παράθυρο περί κάθε pixel της εικόνας:

$$\mathbf{A}(x) = \mathbf{G}\sigma_t(x)\mathbf{B}(x) \quad (2.28)$$

όπου η συνάρτηση $\mathbf{G}\sigma_t(x)$ εκφράζει το μέγεθος του παραθύρου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα αυτοσυσχέτισης περί κάθε pixel της εικόνας. Οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} προσδιορίζονται από την σχέση:

$$\lambda_{0,1}(x) = \frac{a_{00} + a_{11} \pm \sqrt{(a_{00} - a_{11})^2 + a_{01}a_{11}}}{2} \quad (2.29)$$

όπου a_{ij} είναι τα στοιχεία της γραμμής i και της στήλης j του \mathbf{A} . Ο τελεστής Monares βασίζεται στον προσδιορισμό της μικρότερης ιδιοτιμής για κάθε εικονοψηφίδα της εικόνας και στην επιλογή των τοπικών μεγίστων που ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο κατώφλι.

Ο τελεστής Harris (Harris & Stevens, 1988) διακρίνει τις εικονοψηφίδες βάσει της τιμής R :

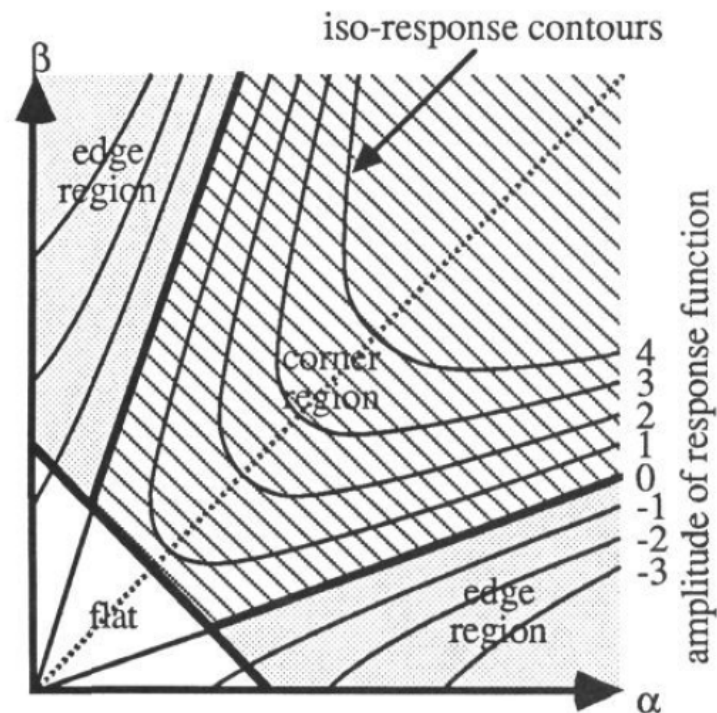
$$R = \det(\mathbf{A}) - a \operatorname{tr}(\mathbf{A})^2 = \lambda_0\lambda_1 - a(\lambda_0 + \lambda_1)^2 \quad (2.30)$$

όπου για $R > 0$ τα σημεία βρίσκονται σε γωνιακές περιοχές (*corner regions*), για $R < 0$ τα σημεία ανήκουν σε ακμές και για μικρές τιμές του R περί το μηδέν τα σημεία βρίσκονται σε ραδιομετρικά επίπεδες περιοχές (*flat regions*). Η ταξινόμηση των σημείων βάσει του συντελεστή R απεικονίζεται στην Εικ. 2.10. Η παράμετρος a καθορίζει την ευαισθησία του τελεστή.

Η συνταύτιση σημείων ενδιαφέροντος μεταξύ επικαλυπτόμενων εικόνων σε αυτού του είδους τους τελεστές υλοποιείται κατά κύριο λόγο είτε με χρήση του συντελεστή συσχέτισης είτε με εφαρμογή ελαχιστοτετραγωνικής συνταύτισης (για την επίτευξη υποψηφιδικής ακρίβειας). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιείται και συνδυασμός των δύο μεθόδων, με χρήση των αποτελεσμάτων του συντελεστή συσχέτισης ως αρχικών τιμών στην ελαχιστοτετραγωνική συνταύτιση (Αδάμ, 2011).

Οι Schmid et al. (2000) έχουν παρουσιάσει εκτενή περιγραφή όλων των έως τότε γνωστών τελεστών για την ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος, τους οποίους στην συνέχεια συγκρίνουν στην βάση διαφόρων κριτηρίων (πχ. επαναληψιμότητα σε περιπτώσεις μεταβολών κλίμακας, στροφών, φωτεινότητας κ.α.).

¹⁴ Ουσιαστικά πρόκειται για έναν πίνακα που προσεγγίζει την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (για περισσότερες πληροφορίες βλ. Schmid et al. (2000) - Παράρτημα Α.



Εικόνα 2.10: Κατάταξη σημείων σύμφωνα με τον τελεστή Harris. Οι καμπύλες απεικονίζουν σημεία με ίδια τιμή της παραμέτρου R. Με α και β συμβολίζονται οι ιδιοτιμές του πίνακα αυτοσυσχέτισης (Harris & Stevens, 1988).

2.3.2.2 Οι πιο σύγχρονες προσεγγίσεις - Ο αλγόριθμος SIFT

Τα τρία βασικά στάδια στις σύγχρονες μεθόδους συνταύτισης εικόνων μέσω χαρακτηριστικών είναι: 1) εύρεση σημείων ενδιαφέροντος σε κάθε εικόνα με την εφαρμογή τελεστών ανίχνευσης των σημείων, που ονομάζονται “ανιχνευτές” (*detectors*), 2) περιγραφή κάθε σημείου μέσω των διανυσμάτων περιγραφικών χαρακτηριστικών (περιγραφείς – *descriptors*) και 3) συνταύτιση σημείων ενδιαφέροντος μεταξύ των εικόνων.

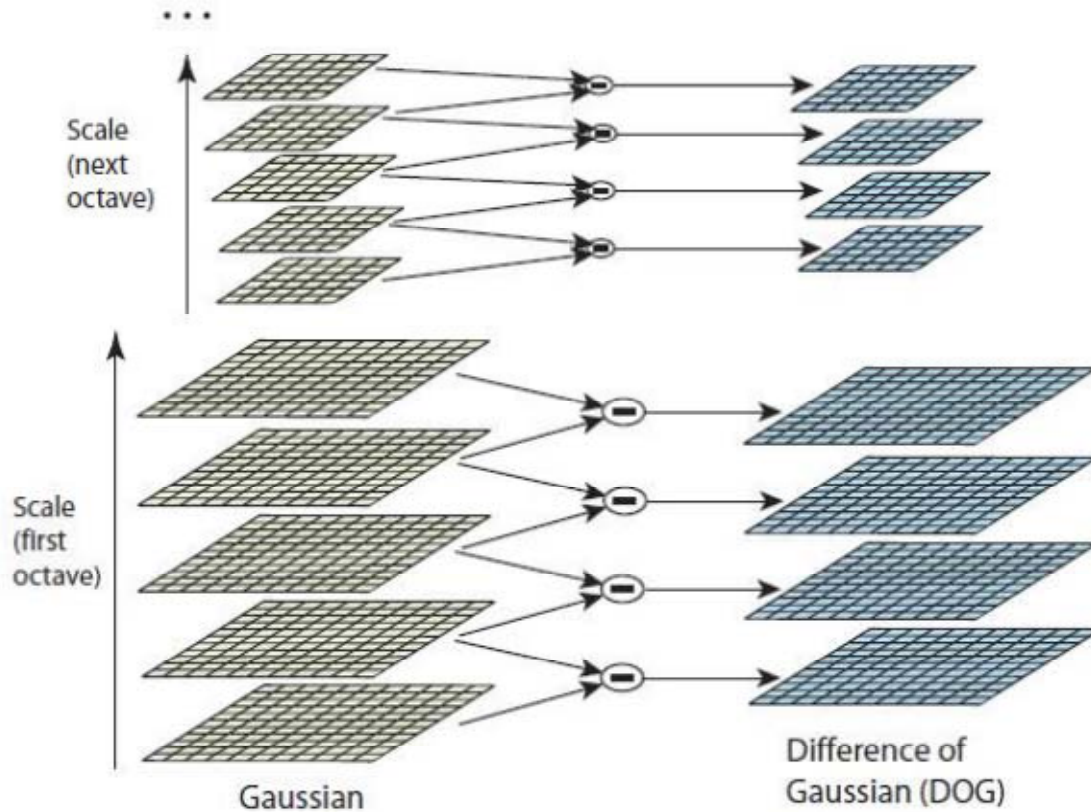
Κάθε ένας από τους σύγχρονους τελεστές (όπως οι τελεστές SIFT, SURF, GLOH, Harris Affine ή Hessian Affine, Affine SIFT και αρκετοί άλλοι), μπορεί να προσεγγίζει το κάθε στάδιο με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο, αλλά όλοι ακολουθούν την ίδια βασική λογική. Ακολουθεί εκτενέστερη αναφορά στον αλγόριθμο SIFT (Lowe, 2004), καθώς είναι ίσως ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος εύρεσης ομοιοτήτων και έχει αποτελέσει την βάση για την ανάπτυξη των περισσότερων νέων αλγορίθμων (πχ. SURF, GLOH, PCA SIFT, ASIFT, spherical SIFT κ.α.).

Ο αλγόριθμος SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) οδηγεί στον προσδιορισμό χαρακτηριστικών σημείων τα οποία είναι αμετάβλητα σε μετασχηματισμούς κλίμακας, στροφής και αλλαγές στην φωτεινότητα. Επίσης είναι ανθεκτικός σε αφνικούς μετασχηματισμούς και αλλαγές στο σημείο λήψης, καθώς και στην ύπαρξη θορύβου.

2.3.2.2.1 Ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος

Η επιλογή σημείων ενδιαφέροντος γίνεται χρησιμοποιώντας την αναπαράσταση χώρου κλίμακας (*scale space*) προκειμένου να προσδιοριστούν σημεία αμετάβλητα σε μεταβολές κλίμακας. Η αναπαράσταση χώρου κλίμακας υλοποιείται μέσω των πυραμίδων της εικόνας (Εικ. 2.11). Οι πυραμίδες εικόνων αποτελούνται από οκτάβες (*octave*). Κάθε οκτάβα δημιουργείται με συνέλιξη της αρχικής εικόνας με φίλτρα εξομάλυνσης Gauss διαφορετικών τυπικών αποκλίσεων. Η επόμενη οκτάβα προκύπτει από επανασύσταση της αρχικής εικόνας με επιλογή

κάθε δεύτερης εικονοψηφίδας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διάσταση, και την εξομάλυνση της νέας εικόνας όπως προηγουμένως (συνέλιξη με φίλτρα Gauss διαφορετικής τυπικής απόκλισης το καθένα).



Εικόνα 2.11: Πυραμίδες εικόνας και πυραμίδα εικόνας DOG (Lowe, 2004).

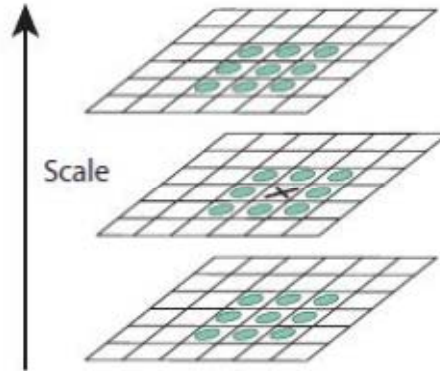
Για την εύρεση των σημείων ενδιαφέροντος απαιτείται πρώτα η δημιουργία της πυραμίδας DOG (Difference of Gaussian) από την αρχική πυραμίδα. Η πυραμίδα DOG παράγεται με αφαίρεση διαδοχικών εικόνων της πυραμίδας που ανήκουν στην ίδια οκτάβα, δηλαδή ουσιαστικά προκύπτει από αφαίρεση εικόνων με διαφορετικούς βαθμούς εξομάλυνσης (που ορίζονται από την τυπική απόκλιση του χρησιμοποιούμενου φίλτρου Gauss). Εάν κάθε επόμενος Γκαουσιανός μετασχηματισμός προκύπτει με τον πολλαπλασιασμό της τυπικής απόκλισης του προηγούμενου με συντελεστή k , τότε μια εικόνα DOG υπολογίζεται από την σχέση:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, \sigma) - G(x, y, k\sigma)) * I(x, y) = L(x, y, \sigma) - L(x, y, k\sigma) \quad (2.31)$$

όπου D είναι μια εικόνα της πυραμίδας DOG, G το Γκαουσιανό φίλτρο και L οι εικόνες με την εξομάλυνση. Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού της τυπικής απόκλισης μεταξύ διαδοχικών γκαουσιανών έχει επιλεγεί να είναι ίσος με $\sqrt{2}$. Η τελική πυραμίδα DOG αποτελείται από 3 οκτάβες, κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από 4 εικόνες. Ο αριθμός για τις οκτάβες και τις εικόνες ανά οκτάβα εκτιμήθηκε πειραματικά από τον Lowe (2004).

Ο προσδιορισμός των σημείων ενδιαφέροντος γίνεται με τον υπολογισμό μεγίστων στην αναπαράσταση χώρου κλίμακας της πυραμίδας DOG. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται οι ψηφίδες όπου οι τιμές φωτεινότητας είναι μεγαλύτερες τόσο από τις 8 γειτονικές τους όσο και από τις 18 αντίστοιχες ψηφίδες στις εικόνες της αμέσως

μεγαλύτερης και μικρότερης κλίμακας (Εικ. 2.12), ενώ ταυτόχρονα ξεπερνούν και την τιμή ενός κατωφλίου.



Εικόνα 2.12: Επιλογή σημείων ενδιαφέροντος αμετάβλητων στις αλλαγές κλίμακας (Lowe, 2004).

Έπειτα ο Lowe προσδιορίζει με υποψηφιακή ακρίβεια την θέση του σημείου ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας ένα πολυώνυμο Taylor 2^{ου} βαθμού για να αναπαραστήσει την συνάρτηση μεταβολής των τιμών της DOG στην περιοχή της αρχικά προσδιορισμένης εικονοψηφίδας. Τελικά, βρίσκει τις συντεταγμένες του σημείου μεγίστου μηδενίζοντας την παράγωγο της συνάρτησης DOG, ενώ απορρίπτει τα σημεία όπου η τιμή της συνάρτησης DOG είναι πολύ μικρή (γεγονός που υποδηλώνει χαμηλή αντίθεση και επομένως ασταθή ακρότατα).

Ακολούθως γίνεται ακόμη ένα φιλτράρισμα για την απαλοιφή των σημείων που βρίσκονται σε ακμές. Για αυτό τον σκοπό προσδιορίζεται ο πίνακας της 2^{ης} παραγώγου των σημείων (πίνακας Hess). Οι ιδιοτιμές του είναι αναλογες των τιμών της μέγιστης και ελάχιστης κύριας καμπυλότητας της DOG. Με μια προσέγγιση αντίστοιχη εκείνης του τελεστή Harris, δεν υπολογίζονται οι δύο ιδιοτιμές αλλά απευθείας ο λόγος τους μέσω της σχέσης:

$$\frac{Tr(\mathbf{H})}{Det(\mathbf{H})} < \frac{(r+1)^2}{r} \quad (2.32)$$

όπου $r = \lambda_0/\lambda_1$ ο λόγος μεταξύ των δύο ιδιοτιμών, ενώ $Tr(\mathbf{H})$, $Det(\mathbf{H})$ είναι αντίστοιχα το ίχνος και η ορίζουσα του \mathbf{H} . Ο Lowe για τον ορισμό του κατωφλίου προτείνει λόγο μεταξύ των δύο ιδιοτιμών ίσο με 10.

2.3.2.2.2 Περιγραφή σημείων ενδιαφέροντος

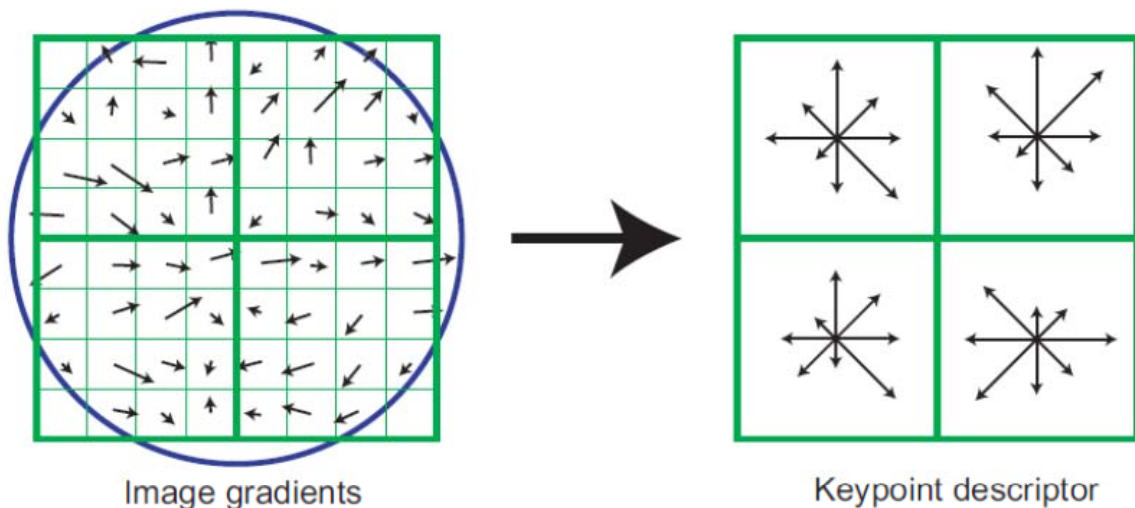
Αρχικά σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος εκχωρείται ένας κύριος προσανατολισμός με βάση τις τοπικές τιμές της φωτεινότητας. Το σημείο ενδιαφέροντος μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με αυτόν τον προσανατολισμό και έτσι να είναι αμετάβλητο σε μετασχηματισμούς στροφής. Η κλίμακα του σημείου χρησιμοποιείται για να επιλεγεί η εξομαλυμένη εικόνα L που θα χρησιμοποιηθεί. Στην περιοχή περί κάθε σημείο ενδιαφέροντος επιλέγεται δείγμα εικονοψηφίδων, για το οποίο υπολογίζονται η ένταση $m(x, y)$ και η γωνία προσανατολισμού $\theta(x, y)$ της κλίσης σύμφωνα με τις εξής σχέσεις:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (2.33)$$

$$\theta(x, y) = \text{atan}\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \quad (2.34)$$

Μετά από τον υπολογισμό έντασης και στροφής για κάθε δείγμα στην περιοχή περί το σημείο ενδιαφέροντος υπολογίζεται ένα ιστόγραμμα που απεικονίζει την ένταση της κλίσης της περιοχής ανά 10° (προσδιορίζονται άρα 36 συνολικά τιμές για όλους τους προσανατολισμούς), ενώ συνυπολογίζεται μέσω βαρών η κλίμακα στην οποία ανιχνεύθηκε το σημείο. Για κάθε σημείο εκτιμάται από το ιστόγραμμα ο προσανατολισμός στον οποίο παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή έντασης (*peak*). Στις περιπτώσεις όπου η ένταση σε μια άλλη διεύθυνση είναι μεγαλύτερη από το 80% της μέγιστης δημιουργείται και δεύτερο σημείο ενδιαφέροντος, χαρακτηριζόμενο από την νέα αυτή διεύθυνση και την έντασή της.

Ακολούθως, προσδιορίζεται το διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών (*descriptor*) που χρησιμοποιείται για την συνταύτιση σημείων ενδιαφέροντος μεταξύ των εικόνων (Εικ. 2.13). Πρώτα προσδιορίζονται η ένταση και ο προσανατολισμός της κλίσης για όλες τις εικονοψηφίδες στην γειτονιά του σημείου ενδιαφέροντος με χρήση της εξομαλυμένης εικόνας της πυραμίδας που αντιστοιχεί στο σημείο ενδιαφέροντος. Για να εξασφαλιστεί πως τα σημεία θα είναι αμετάβλητα σε περίπτωση στροφής της εικόνας, οι συντεταγμένες του περιγραφέως και οι στροφές κάθε εικονοψηφίδας εκφράζονται σε σχέση με τον κυρίαρχο προσανατολισμό του σημείου που υπολογίστηκε προηγουμένως. Οι τιμές της έντασης της κλίσης για κάθε εικονοψηφίδα ομαλοποιούνται με χρήση φίλτρου Gauss (μπλε κύκλος) ώστε να αποφεύγονται μεγάλες διαφορές μεταξύ διαδοχικών στοιχείων του περιγραφέως και να ελαττώνεται η συνεισφορά των pixel στο τελικό αποτέλεσμα ανάλογα με την απόστασή τους από το σημείο ενδιαφέροντος. Η περιοχή περί το σημείο ενδιαφέροντος χωρίζεται σε 16 (4×4) υποπεριοχές ενδιαφέροντος (*sample areas*), κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από 16 pixel (4×4). Από την ένταση και την στροφή της κλίσης κάθε εικονοψηφίδας προσδιορίζεται για κάθε υποπεριοχή ενδιαφέροντος το ιστόγραμμα κλίσεων ανά 45° (συνολικά σε 8 διευθύνσεις). Επομένως, για κάθε σημείο ενδιαφέροντος προσδιορίζεται ένα διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών που αποτελείται από 128 στοιχεία (16 υποπεριοχές \times 8 bins).



Εικόνα 2.13: Απεικόνιση ενός διανύσματος περιγραφικών χαρακτηριστικών (*descriptor*). Αντί της απεικόνισης του πλήρους περιγραφέως που αποτελείται από 4×4 υποπεριοχές απεικονίζεται ένας μικρότερος, αποτελούμενος από 2×2 περιοχές (Lowe, 2004).

Τέλος, τα στοιχεία του περιγραφέως κανονικοποιούνται στο διάστημα $[0,1]$, ούτως ώστε η περιγραφή του σημείου να είναι αμετάβλητη σε αλλαγές φωτισμού. Ειδικότερα, οι αλλαγές στην φωτεινότητα μετατοπίζουν όλους τους τόνους σε υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές, γεγονός που δεν επηρεάζει τον τελεστή εφόσον χρησι-

μπορούνται οι κλίσεις των τιμών φωτεινότητας για την περιγραφή του, ενώ οι αλλαγές στην αντίθεση αντιμετωπίζονται μέσω της κανονικοποίησης. Τέλος, για την αντιμετώπιση μη γραμμικών μεταβολών φωτισμού οι κανονικοποιημένες τιμές έντασης που ξεπερνούν το κατώφλι 0.2 αντικαθίστανται από την μέγιστη τιμή 0.2 και ακολουθεί εκ νέου κανονικοποίηση στο διάστημα [0 1]. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται τόσο υπόψη οι μέγιστες τιμές της έντασης κατά την συνταύτιση δύο διανυσμάτων περιγραφικών χαρακτηριστικών αλλά η γενικότερη κατανομή της έντασης στις διάφορες διευθύνσεις.

2.3.2.2.3 Αντιστοίχιση σημείων μεταξύ εικόνων

Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία αντιστοίχισης των διανυσμάτων περιγραφικών χαρακτηριστικών μεταξύ των εικόνων. Η επιλογή γίνεται με την μέθοδο του εγγύτερου γείτονα, ενώ η μετρική που χρησιμοποιεί ο Lowe ως μετρο ομοιότητας είναι η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των συγκρινόμενων διανυσμάτων. Για να ορισθούν δύο σημεία ως ομόλογα θα πρέπει η απόσταση αυτή να είναι μικρότερη από ένα κατώφλι, ενώ αξιόπιστο μέσο ελέγχου αποτελεί και ο λόγος της μικρότερης απόστασης με την αμέσως επόμενη.

Η εξαντλητική αναζήτηση ομολογιών μεταξύ σημείων ενδιαφέροντος είναι διαδικασία ιδιαίτερα απαιτητική υπολογιστικά (για την αντιστοίχιση N σημείων μιας εικόνας με N σημεία της άλλης απαιτούνται N^2 συγκρίσεις). Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο δεντρικές δομές (*kd-trees*) για την μείωση των απαιτούμενων υπολογισμών. Στην αρχική δημοσίευση του SIFT (Lowe, 2004) προτείνεται η χρήση του αλγορίθμου *Best Bin First*, ο οποίος επιστρέφει τον κοντινότερο γείτονα με μεγάλη πιθανότητα και σταματά την αναζήτηση για αυτόν ύστερα από έρευνα στους πρώτους 200 υποψηφίους κάθε σημείου, ενώ αργότερα ανέπτυξε μαζί με τον Muja την βιβλιοθήκη FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors) για την εφαρμογή τεχνικών γρήγορης αναζήτησης του εγγύτερου γείτονα σε πολυδιάστατους χώρους¹⁵. Έτσι, ο γρήγορος προσδιορισμός ομολογιών συνεχίζει να απασχολεί τους ερευνητές έως σήμερα (Muja & Lowe, 2014).

2.3.2.2.4 Τελεστές που βασίζονται στον SIFT

Ο τελεστής GLOH (*gradient location-orientation histogram*) έχει, επίσης, βασιστεί στο διάνυσμα περιγραφικών χαρακτηριστικών του SIFT. Αναπτύχθηκε από τους Mikolajczyk & Schmid (2005) με σκοπό ακριβώς να βελτιώσει την απόδοση του SIFT. Το διάνυσμα χαρακτηριστικών του GLOH προκύπτει από διαίρεση της περιοχής περί το εκάστοτε σημείο ενδιαφέροντος σε περισσότερες υποπεριοχές, εκφρασμένες σε λογαριθμικό-πολικό σύστημα συντεταγμένων (*log-polar*): 3 υποπεριοχές με βάση την απόσταση από το σημείο και 8 υποπεριοχές με βάση τον προσανατολισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διάνυσμα που προκύπτει να αποτελείται από 272 στοιχεία, τα οποία μειώνονται στα 128 με χρήση ανάλυσης κυρίων συνιστωσών (PCA). Στην εργασία αυτή οι συγγραφείς συγκρίνουν την απόδοση διάφορων τελεστών και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ο GLOH υπερέρχει ελαφρώς σε σχέση με τον SIFT. Σε αντίστοιχη λογική κινείται και ο τελεστής PCA-SIFT (Ke & Sukthankar, 2004), ο οποίος επίσης βασίζεται στον αλγόριθμο SIFT και διαφέρει μόνο στο μέγεθος και το πλήθος των υποπεριοχών που χρησιμοποιούνται για να εξαχθούν οι περιγραφείς, οι οποίοι έχουν αρχικό μέγεθος 3042 στοιχεία. Το μέγεθος του διανύσματος ελαχιστοποιείται με εφαρμογή PCA, και τελικά προκύπτει διάνυσμα 20 στοιχείων.

Ένας ακόμη ευρέως διαδεδομένος σημειακός αλγόριθμος είναι ο τελεστής SURF (Speeded Up Robust Features) των Bay et al. (2006). Βασικό πλεονέκτημά του συνιστά η ταχύτητα εύρεσης των ομολογιών, η οποία βασίζεται σε απλοποιήσεις στην διαδικασία εύρεσης των σημείων ενδιαφέροντος καθώς και στο τελικό μικρό μέγεθος

¹⁵ <http://www.cs.ubc.ca/research/flann/>

των περιγραφέντων που χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση των σημείων ενδιαφέροντος.

Το πεδίο των αλγορίθμων εντοπισμού χαρακτηριστικών παραμένει ανοιχτό μέχρι και σήμερα, με αρκετές νέες ερευνητικές εργασίες να παρουσιάζονται κάθε χρόνο, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος ASIFT (Morel & Yu, 2009, Yu & Morel, 2011) και ο αλγόριθμος προσαρμογής του SIFT σε σφαιρικές εικόνες (Cruz-Mota et al., 2012). Παρ' όλα αυτά, στις περισσότερες εφαρμογές συνταύτισης εικόνων για την παραγωγή πανοραμικών επαρκεί η χρήση των τελεστών SIFT ή και SURF που δίνουν ιδιαιτέρως ικανοποιητικά αποτελέσματα.

2.3.3 Απαλλαγή των ομολογιών από χονδροειδή σφάλματα- Ο αλγόριθμος RANSAC

Μετά από τον εντοπισμό των ομολογων σημείων με χρήση κάποιου από τους παραπάνω αλγορίθμους (SIFT, SURF κ.λπ.) έπεται το φιλτράρισμα των σημείων που προέκυψαν για την απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων και την εκτίμηση αρχικών τιμών των παραμέτρων του μοντέλου σύνδεσης των εικόνων. Για την διαδικασία αυτή έχει επικρατήσει η χρήση του αλγορίθμου RANSAC (*Random Sample Consensus*) των Fischler & Bolles (1981).

Στον RANSAC επιλέγεται τυχαία ένα δείγμα από k ομολογίες, οι οποίες στην συνέχεια χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου σύνδεσης (k είναι ο ελάχιστος αριθμός που απαιτείται για την επίλυση). Στην συνέχεια υπολογίζονται για κάθε ομολογία τα υπόλοιπα σύμφωνα την σχέση:

$$r_i = \tilde{x}_i'(x_i; p) - \hat{x}_i' \quad (2.35)$$

όπου \tilde{x}_i' είναι η εκτιμώμενη τιμή από τα το μοντέλο και \hat{x}_i' είναι η τιμή που έχει προσδιοριστεί για την δεύτερη εικόνα από τον τελεστή συνταύτισης. Στην συνέχεια προσδιορίζεται ο αριθμός των ομολογιών των οποίων τα υπόλοιπα r_i δεν ξεπερνούν κατ' απόλυτη τιμή ένα κατώφλι t : $\|r_i\| \leq t$ (*inliers*). Η τιμή του κατωφλίου t ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή, αλλά συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3 pixel (Szelinski, 2006).

Η επιλογή τυχαίων δειγμάτων επαναλαμβάνεται S φορές και επιλέγεται ως τελική λύση το δείγμα εκείνο με τον μεγαλύτερο αριθμό σωστών ομολογιών (*inliers*). Για να διασφαλιστεί ότι κάποιο από τα δείγματα είναι πιθανό να αποτελείται μόνο από *inliers*, απαιτείται επαρκής αριθμός δοκιμών S . Ο αριθμός των δοκιμών που είναι αναγκαίες ώστε η πιθανότητα επιτυχίας (εύρεσης ενός δείγματος αποτελούμενου μόνο από *inliers*) να είναι ίση με P δίνεται από την σχέση:

$$S = \frac{\log(1 - P)}{\log(1 - p^k)} \quad (2.36)$$

όπου p η πιθανότητα η εκάστοτε ομολογία να είναι έγκυρη και k ο αριθμός των ομολογιών που απαρτίζουν το κάθε δείγμα. Προκύπτει ότι η αύξηση του αριθμού των ομολογιών ανά δείγμα αυξάνει κατά πολύ τον αριθμό των δοκιμών που απαιτούνται ώστε να προκύψει δείγμα που να αποτελείται μόνο από έγκυρες ομολογίες (*inliers*) με την ίδια πιθανότητα P (βλ. παράδειγμα στον Πιν. 2.1). Επομένως ο υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου (στην συγκεκριμένη περίπτωση του επιτολικού πίνακα) γίνεται με τον ελάχιστο αναγκαίο αριθμό ομολογιών.

P	k	p	p^k	S	CEILING(S)
0.99	3	0.5	0.125	34.48755	35
0.99	4	0.5	0.0625	71.35537	72

Πίνακας 2.1: Παράδειγμα μεταβολής του αριθμού των αναγκαίων δοκιμών S όταν μεταβάλεται ο αριθμός k των στοιχείων του δείγματος.

2.3.4 Αυτόματη επιλογή επικαλυπτόμενων εικόνων

Με χρήση των αλγορίθμων σύνδεσης μέσω χαρακτηριστικών μπορεί κανείς να επιτύχει αυτόματη σύνδεση μεταξύ ενός συνόλου εικόνων (*image stack*), χωρίς να διαθέτει καμία πληροφορία σχετικά με την σειρά λήψης τους και τις γενικές σχέσεις επικάλυψης μεταξύ τους, όπως ποια εικόνα επικαλύπτεται με ποια κ.λπ. (μπορεί να σημειωθεί πάντως πως υπάρχουν αλγόριθμοι που εξετάζουν τις σχέσεις σύνδεσης των εικόνων ανάλογα με την σειρά εισαγωγής τους: πχ. εισαγωγή εικόνων με την σειρά 1,2,3,4 σημαίνει πως ο αλγόριθμος θα επιχειρήσει να συνδέσει τις εικόνες 1-2, 2-3, και 3-4 και όχι πχ. τις 1-3). Έτσι, για παράδειγμα, οι Brown & Lowe (2007) προτείνουν μεθοδολογία για την αυτόματη εύρεση των συνδέσεων μεταξύ των εικόνων, η οποία χρησιμοποιεί ένα στοχαστικό μοντέλο για να ελέγξει εάν το σύνολο των σωστών και εσφαλμένων σημείων ενδιαφέροντος που προέκυψαν με την εφαρμογή του SIFT, και κατόπιν με το φιλτράρισμα με δέσμευση της επιπολικής γεωμετρίας μέσω του αλγορίθμου RANSAC, αντιστοιχεί σε αληθή ή εσφαλμένη σύνδεση μεταξύ των εικόνων. Η εν λόγω μεθοδολογία επιτρέπει να εντοπίζονται επικαλυπτόμενες εικόνες και να παράγονται πανοραμικές εικόνες από μεγάλα σύνολα εικόνων, τα οποία πέρα από εικόνες που ανήκουν σε διαφορετικά πανοράματα μπορούν να περιλαμβάνουν και “θόρυβο” (μεμονωμένες εικόνες που δεν ανήκουν σε κανένα πανόραμα), τον οποίο είναι σε θέση να διαχειριστεί ο αλγόριθμος (Εικ. 2.14).

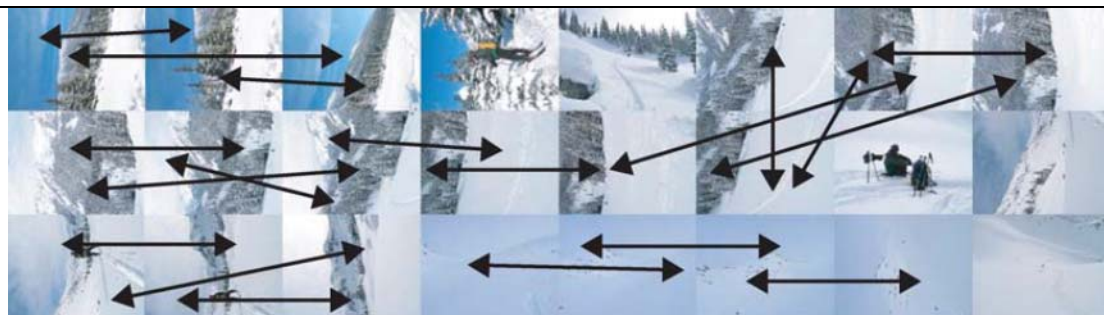
2.4 Προσδιορισμός της σύνδεσης διαδοχικών εικόνων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων σύνδεσης δύο επικαλυπτόμενων εικόνων βάσει ενός συνόλου ομόλογων σημείων που έχουν προσδιοριστεί με κάποια από τις προαναφερθείσες τεχνικές. Στην περίπτωση απλών μοντέλων κίνησης όπως η απλή μετάθεση, ο ευκλείδειος μετασχηματισμός και ο μετασχηματισμός ομοιότητας, οι σχέσεις είναι γραμμικές και είναι δυνατόν να επιλυθούν απευθείας με την μεθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Εντούτοις, η σύνδεση μεταξύ των εικόνων που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία πανοραμάτων δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από τέτοια απλά μοντέλα. Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι το πιο γενικό μοντέλο της ομογραφίας (8 παράμετροι) και το μοντέλο σύνδεσης ομόκεντρων εικόνων που χρησιμοποιείται ειδικά για την δημιουργία πανοραμικών. Και τα δύο αυτά μοντέλα είναι μη γραμμικά, οπότε η επίλυσή τους απαιτεί την εφαρμογή επαναληπτικών μεθόδων.

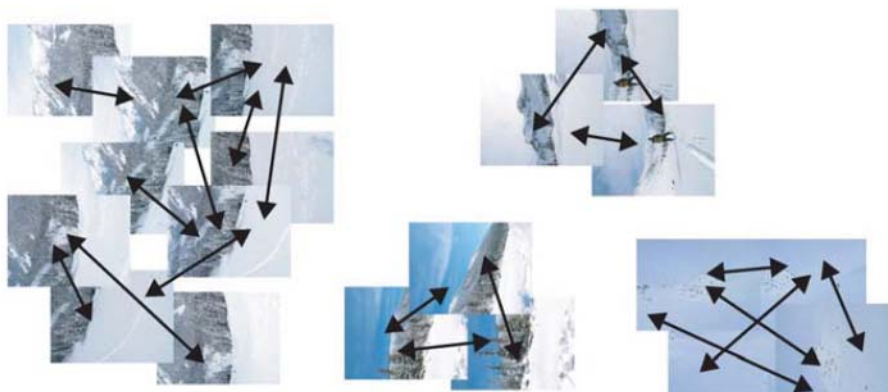
Έστω ότι x_i είναι το διάνυσμα των εικονοσυντεταγμένων των χαρακτηριστικών σημείων της εικόνας N και x'_i είναι οι παρατηρούμενες συντεταγμένες των ομόλογων χαρακτηριστικών σημείων της εικόνας $N+1$. Η βέλτιστη λύση προκύπτει με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων που προκύπτουν ως η διαφορά της μετρημένης στην εικόνα $N+1$ τιμής \hat{x}'_i από την εκτιμώμενη τιμή \tilde{x}'_i , η οποία υπολογίζεται από τις παραμέτρους του μοντέλου \mathbf{p} και τις παρατηρήσεις x_i στην εικόνα N :

$$E_{pairwise-LS} = \sum_i \|r_i\|^2 = \sum_i \|\tilde{x}'_i(x_i; \mathbf{p}) - \hat{x}'_i\|^2 \quad (2.37)$$

Το μοντέλο δεν είναι γραμμικό, οπότε το ελάχιστο της συνάρτησης μπορεί να προσδιορίζεται με κάποια από τις μεθόδους: Newton (γνωστή και ως Newton-Raphson), μέγιστης καθόδου (*steepest descend*) ή τον αλγόριθμο των Levenberg- Marquand, ο οποίος θα μπορούσε να πει κανείς ότι είναι ένας συνδυασμός των δύο άλλων μεθόδων. Για περισσότερα σχετικά με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε επαναληπτικής μεθόδου μπορεί κανείς να ανατρέξει στην πολύ αναλυτική δημοσίευση των Triggs et al. (2000).



(a) Image matches



(b) Connected components of image matches



(c) Output panoramas

Εικόνα 2.14: Αυτόματη αναγνώριση πανοραμάτων σε σύνολο μη διαδοχικών εικόνων (Brown & Lowe, 2007).

2.4.1 Συνόρθωση ζεύγους εικόνων με χρήση ομογραφίας- Προσωρινές τιμές

Ο Szeliski (2006) ορίζει τις εξισώσεις της ομογραφίας με την μη γραμμική μορφή ως προς τις παραμέτρους της εξίσωσης:

$$x' = \frac{(1 + h_{11})x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + 1} \text{ και } y' = \frac{h_{21}x + (1 + h_{22})y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + 1} \quad (2.38)$$

Για την επίλυση του συστήματος με MET απαιτείται η εύρεση προσωρινών τιμών των παραμέτρων h_{11}, \dots, h_{32} . Αυτές υπολογίζονται αν πολλαπλασιαστούν και τα δύο μέλη των εξισώσεων με τον παρονομαστή $D = h_{31}x + h_{32}y + 1$, το οποίο οδηγεί στις γραμμικές εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}' - x \\ \hat{y}' - y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -\hat{x}'x & -\hat{x}'y \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -\hat{y}'x & -\hat{y}'y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ \vdots \\ h_{32} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Όμως αυτές οι προσεγγιστικές τιμές δεν είναι βέλτιστες από στατιστικής πλευράς καθώς ο παρονομαστής D μπορεί να διαφέρει πολύ από σημείο σε σημείο. Για αυτόν το λόγο προτείνεται η στάθμιση της κάθε εξίσωσης με διαίρεσή της με τον παρονομαστή D που προκύπτει από τις αρχικά υπολογισμένες προσωρινές τιμές:

$$\frac{1}{D} \begin{bmatrix} \hat{x}' - x \\ \hat{y}' - y \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -\hat{x}'x & -\hat{x}'y \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -\hat{y}'x & -\hat{y}'y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ \vdots \\ h_{32} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Μετά από τον προσδιορισμό των προσωρινών τιμών των παραμέτρων ακολουθεί η επίλυση του συστήματος εξισώσεων (2.40) με μια επαναληπτική μέθοδο όπως η μέθοδος Gauss-Newton:

$$\hat{x}'_i - \check{x}'_i(x_i; \mathbf{p}) = \mathbf{J}_x \Delta \mathbf{p} \quad (2.41)$$

όπου για κάθε ζεύγος ομόλογων σημείων προστίθενται στο σύστημα οι εξισώσεις της μορφής:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}' - \check{x}' \\ \hat{y}' - \check{y}' \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -\hat{x}'x & -\hat{x}'y \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -\hat{y}'x & -\hat{y}'y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_{11} \\ \vdots \\ \Delta h_{32} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι προσεγγιστικές συντεταγμένες της ομογραφίας που συνδέει δύο εικόνες προσδιορίζεται με χρήση του αλγορίθμου RANSAC για την απαλοιφή των χονδροειδών σφαλμάτων από τα ομόλογα σημεία. Η αναφορά στην γενική περίπτωση ομογραφίας έγινε περισσότερο για λόγους θεωρητικής πληρότητας του κεφαλαίου, αφού ο κανόνας είναι η δημιουργία πανοράματος από ομόκεντρες εικόνες.

2.4.2 Περίπτωση ομόκεντρων εικόνων

Έχει λοιπόν ήδη αναφερθεί (βλ. ενότητα 2.2.5) ότι η σχέση που συνδέει δύο εικόνες με κοινό σημείο λήψης και διαφορετικό προσανατολισμό είναι:

$$\bar{x}_1 = \overline{\mathbf{H}_{10}} \bar{x}_0 = \mathbf{K}_1 \mathbf{R}_{10} \mathbf{K}_0^{-1} \bar{x}_0 \quad (2.43)$$

όπου $\mathbf{K}_k = \text{diag}(f_k, f_k, 1)$ ο πίνακας της μηχανής και $\mathbf{R}_{10} = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_0$, με τον πίνακα στροφής \mathbf{R}_1 να εκφράζει την στροφή της εικόνας 1 ως προς το σύστημα αναφοράς του χώρου.

2.4.2.1 Εύρεση αρχικών τιμών

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου στροφών απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές της εστιακής απόστασης f_k της κάμερας κάθε εικόνας k καθώς και οι πίνακες στροφής $\mathbf{R}_{k,k+1}$ για όλα τα ζεύγη των εικόνων. Χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη μορφή του πίνακα μηχανής $\mathbf{K}_k = \text{diag}(f_k, f_k, 1)$ μπορεί κανείς να γράψει

τον πίνακα στροφής και ως:

$$\mathbf{R}_{10} \sim \mathbf{K}_1^{-1} \overline{\mathbf{H}_{10}} \mathbf{K}_0 \sim \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & f_0^{-1} h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & f_0^{-1} h_{23} \\ f_1 h_{31} & f_1 h_{32} & f_0^{-1} f_1 h_{33} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

όπου h_{ij} τα στοιχεία της ομογραφίας $\overline{\mathbf{H}_{10}}$. Με χρήση των δεσμεύσεων ορθογωνικότητας του πίνακα στροφής \mathbf{R}_{10} και του γεγονότος ότι το δεξιό μέλος της Εξ. (2.23) είναι γνωστό (ανεξαρτήτως κλίμακας, αφού μπορεί να πολλαπλασιαστεί με θετική σταθερά λ) προκύπτουν οι σχέσεις:

$$h_{11}^2 + h_{12}^2 + f_0^{-2} h_{13}^2 = h_{21}^2 + h_{22}^2 + f_0^{-2} h_{23}^2 \quad (2.45)$$

και

$$h_{11} h_{21} + h_{12} h_{22} + f_0^{-2} h_{13} h_{23} = 0 \quad (2.46)$$

Λύνοντας ως προς f_0 έχει κανείς μια πρώτη προσέγγιση για την εστιακή απόσταση από την σχέση:

$$f_0^2 = \frac{h_{23}^2 - h_{13}^2}{h_{11}^2 + h_{12}^2 - h_{21}^2 - h_{22}^2}, \text{ εάν } h_{11}^2 + h_{12}^2 \neq h_{21}^2 + h_{22}^2 \quad (2.47)$$

ή εναλλακτικά την σχέση:

$$f_0^2 = \frac{h_{13} h_{23}}{h_{11} h_{21} + h_{12} h_{22}}, \text{ εάν } h_{11} h_{21} \neq -h_{12} h_{22} \quad (2.48)$$

Με αντίστοιχο τρόπο, με χρήση των στηλών του πίνακα της Εξ. (2.23) προκύπτει η προσωρινή τιμή της f_1 . Σε περίπτωση όπου οι δύο εικόνες έχουν ληφθεί με την ίδια μηχανή, ως προσωρινή εστιακή απόσταση λαμβάνεται ο γεωμετρικός μέσος όρος των f_1, f_2 : $f = \sqrt{f_1 f_2}$. Με αντικατάσταση των τιμών των f_0 και f_1 μπορούν να προσδιοριστούν οι προσεγγιστικές τιμές του πίνακα \mathbf{R}_{10} και κατά συνέπεια οι αρχικές τιμές των γωνιών ω, ϕ, κ .

Σημειώνεται ότι η περίπτωση βαθμονόμησης μηχανής από ομόκεντρες εικόνες στην οποία δεν χρησιμοποιείται η απλοποιημένη μορφή του πίνακα \mathbf{K}_j αλλά η πλήρης (Εξ. 2.14) υλοποιήθηκε για πρώτη φορά και εξηγήθηκε αναλυτικά από τον Hartley (1994).

Αφού έχουν πλέον προσδιοριστεί οι αρχικές τιμές του πίνακα στροφής \mathbf{R}_{10} και η τιμή της εστιακής απόστασης μπορούν πλέον να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων σύνδεσης με επίλυση του συστήματος των Εξ. (2.43) με μια από τις μεθόδους μη γραμμικής επίλυσης ελαχίστων τετραγώνων.

2.5 Συνολική σύνδεση εικόνων (Global Registration)

Ένας τρόπος για την δημιουργία ενιαίου πανοράματος από τις επικαλυπτόμενες εικόνες είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων σύνδεσης των εικόνων ανά δύο και η διαδοχική σύνδεσή τους σε ένα ενιαίο πανόραμα. Στην περίπτωση πανοραμάτων με γωνιακό εύρος 360° το συσσωρευμένο σφάλμα από τις διαδοχικές συνδέσεις μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση κενού ή λανθασμένης αλληλεπικάλυψης στην σύνδεση της πρώτης με την τελευταία εικόνα του πανοράματος. Το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί με τεχνικές συμπλήρωσης κενών (*gap closing*), όπως πχ. με την τεχνική που ανέπτυξαν οι Szeliski & Shum (1997). Στην μέθοδο αυτή γίνεται σύνδεση

και της τελευταίας εικόνας με την αρχική, προσδιορίζεται ο πίνακας στροφής μεταξύ τους, υπολογίζεται έπειτα η διαφορά μεταξύ του αρχικού πίνακα στροφής της τελευταίας εικόνας και του νέου, και το σφάλμα αυτό ισομοιράζεται σε όλες τις εικόνες, ενώ με χρήση του σφάλματος προσδιορίζεται και μια διορθωμένη τιμή της εστιακής απόστασης (σε περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί η ίδια κάμερα).

Όμως η πιο αυστηρή προσέγγιση προβλέπει την ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση των παραμέτρων σύνδεσης όλων των εικόνων που συγκροτούν την πανοραμική. Σημειώνεται ότι προφανώς η διαδικασία συνόρθωσης των παραμέτρων προσανατολισμού όλων των εικόνων σε μια ενιαία λύση με την μέθοδο της δέσμης (bundle adjustment) ήταν ήδη γνωστή στην φωτογραμμετρία, η οποία την αξιοποιούσε πολύ πριν από την εισαγωγή της στο πεδίο της Όρασης Υπολογιστών. Στον χώρο αυτό αρχικά εφαρμόστηκε σε προβλήματα “ανακατασκευής από κίνηση” (*structure from motion*), ενώ κατόπιν η χρήση της εξειδικεύθηκε και στην σύνθεση πανοραμάτων.

2.5.1 Συνόρθωση ομόκεντρων εικόνων με την μέθοδο της δέσμης

Στην περίπτωση συνόρθωσης πολλαπλών εικόνων, αντί ένα σύνολο ζευγών ομόλογων σημείων $\{(x_i, \hat{x}_i)\}$ έχει κανείς μια συλλογή από N χαρακτηριστικά σημεία, με την θέση του σημείου i στην εικόνα j να συμβολίζεται με x_{ij} και το μέτρο εμπιστοσύνης του, που ισούται με το αντίστροφο της μεταβλητότητας που έχει προκύψει από την συνόρθωση των εικόνων ανά δύο, να συμβολίζεται με c_{ij} . Επίσης, για κάθε εικόνα προσδιορίζονται και οι παράμετροι προσανατολισμού της (*pose*).

Θα εξεταστεί μόνο η περίπτωση των ομόκεντρων εικόνων που περιγράφηκε προηγουμένως. Με αντίστοιχο τρόπο αντιμετωπίζεται άλλωστε και το γενικευμένο μοντέλο της ομογραφίας. Η εξίσωση που αντιστοιχίζει ένα σημείο του τρισδιάστατου χώρου x_i σε ένα σημείο x_{ij} στην εικόνα j μπορεί να γραφεί ως:

$$x_{ij} \sim K_j R_j x_i \text{ και } x_i \sim R_j^{-1} K_j^{-1} x_{ij} \quad (2.49)$$

όπου $K_j = \text{diag}(f_j, f_j, 1)$ ο απλοποιημένος πίνακας της μηχανής.

Η τυπική διατύπωση της συνόρθωσης δέσμης για αυτό το σύστημα θα είχε την μορφή της Εξ. (2.50), όπου από την επίλυση προκύπτουν οι παράμετροι προσανατολισμού $\{(R_j, f_j)\}$ όσο και οι θέσεις των τρισδιάστατων σημείων x_i .

$$E_{BA-3D} = \sum_i \sum_j c_{ij} \|\tilde{x}_{ij}(x_i; R_j, f_j) - \hat{x}_{ij}\|^2 \quad (2.50)$$

Κατά τον Szeliski (2006), το μειονέκτημα της επίλυσης με την πλήρη μορφή της συνόρθωσης δέσμης έγκειται στον μεγάλο αριθμό των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων, που οδηγούν σε μεγαλύτερη πολυπλοκότητα των πινάκων και απαιτούν περισσότερο χρόνο για την σύγκλιση της τελικής λύσης. Πάντως η πολυπλοκότητα κάθε επανάληψης του αλγορίθμου Newton-Raphson μπορεί να μειωθεί με τεχνικές που εκμεταλλεύονται την αραιή μορφή του πίνακα *Hess* (τεχνικές αραιών πινάκων). Τέτοιες τεχνικές περιγράφονται από τους Triggs et al. (2000) και Hartley & Zisserman (2004), ενώ εφαρμόζονται, για παράδειγμα, και από τους Brown & Lowe (2007) στον αλγόριθμο που προτείνουν για αυτόματη δημιουργία πανοραμικών εικόνων από μεμονωμένες εικόνες.

Υπάρχουν και άλλοι εναλλακτικοί τρόποι διαμόρφωσης των εξισώσεων για την συνόρθωση όλων των εικόνων σε ενιαία πανοραμική (Szeliski, 2006), αλλά η ανάπτυξή τους ξεπερνά τους στόχους του παρόντος κεφαλαίου.

2.5.2 Αποκατάσταση της οριζοντιότητας του πανοράματος

Μέχρι στιγμής έχει αποκατασταθεί ο σχετικός προσανατολισμός μεταξύ των εικόνων (προσανατολισμός τους σε αυθαίρετα επιλεγμένο σύστημα) που απαρτίζουν την πανοραμική. Συνήθως, επιπλέον ζητούμενο αποτελεί η εύρεση της στροφής του μοντέλου ώστε ο άξονας X της μηχανής να είναι κάθετος σε σχέση με την διεύθυνση του κατακόρυφου διανύσματος της βαρύτητας (εναλλακτικά ο άξονας Y της μηχανής να είναι παράλληλος με τον άξονα του διανύσματος της βαρύτητας), δηλαδή η αποκατάσταση της οριζοντιότητας του πανοράματος. Η οριζοντιότητα μπορεί να αποκατασταθεί με την επιβολή μιας δέσμησης στον πίνακα στροφής κάθε εικόνας.

Όπως έχει προαναφερθεί, η σχέση που συνδέει τις τρισδιάστατες συντεταγμένες σημείου με τις συντεταγμένες της προβολής του στην εικόνα είναι η:

$$\bar{x}_{ik} \sim K_k R_k x_i \quad (2.51)$$

Θεωρώντας ότι όλες οι εικόνες έχουν ληφθεί σχεδόν οριζόντια (μικρές στροφές *pitch* και *roll*, δηλαδή ω και κ), ο Szeliski (2006) προτείνει για την οριζοντίωση του πανοράματος τον πολλαπλασιασμό κάθε πίνακα στροφής R_k με έναν πίνακα στροφής R_g του χώρου, τέτοιον ώστε η προβολή του άξονα y του χώρου, ο οποίος αναπαριστάται με το μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{j} = (0,1,0)$ να είναι κάθετη στον άξονα x της εικόνας: $\hat{i} = (1,0,0)$. Η σχέση αυτή εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\hat{i}^T R_k R_g \hat{j} = 0 \quad (2.52)$$

Αυτή η έκφραση ισοδυναμεί με την απαίτηση η πρώτη γραμμή του διανύσματος $R_k, r_{1k} = R_k \hat{i}$ να είναι κάθετη με την πρώτη στήλη του διανύσματος $R_g, r_{g2} = R_g \hat{j}$. Για κάθε εικόνα εισάγεται και μια επιπλέον δέσμηση. Το διάνυσμα r_{g2} μπορεί να προσδιοριστεί από την συνάρτηση:

$$r_{g2} = \operatorname{argmin} \sum_k (r^T r_{k1})^2 = \operatorname{argmin} \left(r^T \left[\sum_k r_{k1} r_{k1}^T \right] r \right) \quad (2.53)$$

όπου $\operatorname{argmin}(f(r))$ συμβολίζει την συνάρτηση που επιστρέφει την τιμή του διανύσματος r που ελαχιστοποιεί την παράσταση f .

Για τον πλήρη ορισμό του πίνακα στροφής R_g αρκεί να προσδιορίσει κανείς ακόμη έναν περιορισμό. Μια απλή εμπειρική μέθοδος είναι κατά τον Szeliski (2006) να επιλέξει κανείς τον μέσο άξονα περιστροφής z των εικόνων $\bar{k} = \sum_k \hat{k}^T R_k$ να είναι κοντά στον άξονα z του χώρου $r_{g3} = R_g \bar{k}$. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί κανείς να προσδιορίσει τον πλήρη πίνακα περιστροφής R_g με την εφαρμογή των ακόλουθων τριών βημάτων:

$$\begin{aligned} (1) r_{g2} &= \min \left(\operatorname{argmin} \left(r^T \left[\sum_k r_{k1} r_{k1}^T \right] r \right) \right) \\ (2) r_{g1} &= N \left(\left(\sum_k r_{k3} \right) \times r_{g2} \right) \\ (3) r_{g3} &= r_{g1} \times r_{g2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

όπου η συνάρτηση $N(v) = v/\|v\|$ κανονικοποιεί το διάνυσμα v . Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά προσδιορίζει μια μέση περιστροφή από την οριζοντίωση όλων των εικόνων.

Μια πιο ακριβής μέθοδος οριζοντίωσης βασίζεται στον προσδιορισμό κατακόρυφων ευθειών σε κάθε εικόνα ξεχωριστά, οι οποίες χρησιμεύουν για την επιβολή επιπλέον δεσμεύσεων που εξασφαλίζουν την οριζοντιότητα στην συνόρθωση του μοντέλου. Οι ευθείες μπορούν να βρεθούν αυτόματα με χρήση αλγορίθμων εντοπισμού ακμών, όπως ο αλγόριθμος του Canny (1986) ο οποίος χρησιμοποιείται και από το λογισμικό *Hugin* για την οριζοντίωση των εικόνων (όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια). Στην περίπτωση αυτόματης ανίχνευσης των ευθειών αναγκαία προϋπόθεση είναι η χρήση εικόνων που είναι σχεδόν κατακόρυφες ή είναι γνωστός εκ των προτέρων ο προσανατολισμός τους με ακρίβεια μερικών μοιρών. Η βασική λογική της μεθόδου έγκειται στην στροφή κάθε εικόνας κατά τρόπο τέτοιο, ώστε οι εντοπισμένες κατακόρυφες ευθείες να τέμνονται στο άπειρο. Ενδεικτικές σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές είναι η εργασία των Kosecka & Zhang (2002), που περιγράφουν μια ευέλικτη προσέγγιση για την εκτίμηση των σχετικών στροφών μιας κάμερας ως προς την απεικονιζόμενη σκηνή με αξιοποίηση σημείων φυγής, όπως και εκείνη των Ventura & Holleher (2013), οι οποίοι χρησιμοποιούν κατακόρυφες ευθείες για την απευθείας οριζοντίωση πανοραμικών εικόνων.

2.5.3 Αφαίρεση της παράλαξης

Συχνά, μετά από την συνόρθωση του μοντέλου και την εκτίμηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων μπορεί να εντοπιστούν προβλήματα στην σύνδεση των εικόνων, όπως, για παράδειγμα, η εικόνα που προέκυψε από την συνένωση (συρραφή) να είναι θολή ή να εμφανίζει φαινόμενα “κίνησης” (*ghosting*). Τα προβλήματα αυτά είναι δυνατόν να οφείλονται σε πληθώρα παραγόντων, όπως είναι πχ. η μη μοντελοποιημένη ακτινική διαστροφή του φακού, η τρισδιάστατη παράλλαξη (περιστροφή της κάμερας όχι περί το οπτικό της κέντρο), μικρές κινήσεις αντικειμένων της σκηνής (όπως πχ. η κίνηση φύλλων ενός δέντρου μεταξύ διαδοχικών λήψεων) ή και μεγαλύτερης κλίμακας κινήσεις στην σκηνή, όπως η μετατόπιση οχημάτων μεταξύ διαδοχικών λήψεων.

Κάθε μια από τις παραπάνω αιτίες σφαλμάτων αντιμετωπίζεται και με διαφορετικό τρόπο. Έτσι, η ακτινική διαστροφή διορθώνεται με την προβαθμονόμηση της μηχανής που χρησιμοποιείται για την δημιουργία του πανοράματος. Η τρισδιάστατη παράλλαξη συνήθως παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου για την συνόρθωση των εικόνων έχει υιοθετηθεί το μοντέλο των ομόκεντρων λήψεων, ενώ στην πραγματικότητα τα κέντρα λήψης των εικόνων δεν συμπίπτουν. Επομένως το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με συνόρθωση των εικόνων με χρήση του πιο γενικού μοντέλου, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη και οι μεταθέσεις των σημείων λήψης των εικόνων. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι το γενικό μοντέλο συνόρθωσης δέσμης είναι πολύ πιο απαιτητικό από άποψη υπολογιστικών πόρων σε σχέση με το μοντέλο που προβλέπει μόνο στροφές μεταξύ των εικόνων, ενώ μπορεί να προκύψουν κενά στο πανόραμα λόγω αποκρύψεων (το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με πολλαπλές λήψεις και μεγάλη επικάλυψη μεταξύ τους). Τέλος, σε περιπτώσεις κινούμενων αντικειμένων η συνήθης πρακτική προβλέπει αποκοπή των τμημάτων που απεικονίζουν το κινούμενο αντικείμενο και χρήση των τιμών των εικονοψηφίδων μόνο από μια εικόνα στην προβληματική περιοχή (οι τεχνικές αυτές περιγράφονται εν συντομία στην ενότητα 1.7.2.1).

2.6 Σύνθεση του πανοράματος (Compositing)

Αφού έχουν υπολογιστεί οι παράμετροι σύνδεσης μεταξύ των εικόνων, ακολουθεί η διαδικασία σύνθεσης του τελικού πανοράματος. Πρώτο στάδιο της διαδικασίας είναι ο ορισμός της προβολής που θα χρησιμοποιηθεί στο τελικό πανόραμα, καθώς επίσης στην επιλογή των εικονοψηφίδων κάθε εικόνας που θα συνυπολογιστούν στην σύνθεση του πανοράματος όσο και στην επιλογή και υλοποίηση του βέλτιστου τρόπου με τον οποίο θα συγχωνευθούν (*blend*) οι εν λόγω εικονοψηφίδες ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ορατές “ραφές” (*seams*) μεταξύ

όμορων εικόνων, η οποία πιθανή θολότητα (*blur*) και φαινόμενα *ghosting* που μπορεί να παρουσιαστούν στο τελικό πανόραμα.

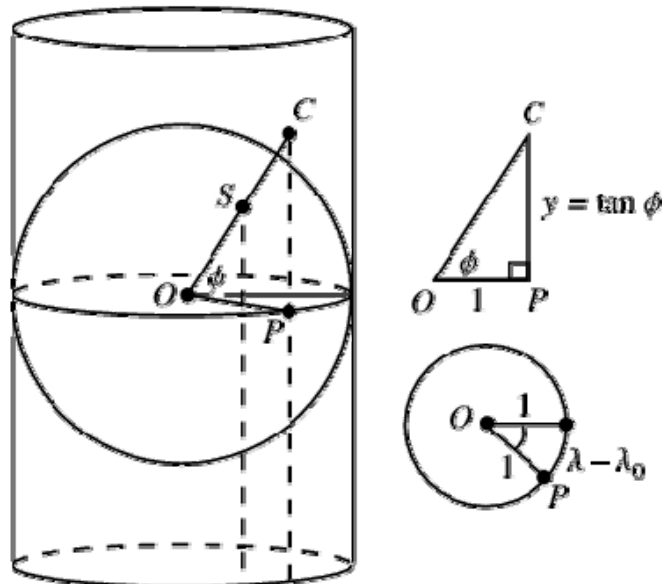
2.6.1 Επιλογή της προβολής

Σε περιπτώσεις πανοραμάτων μικρού γωνιακού ανοίγματος ($< 90^\circ$) μπορεί ως εικόνα αναφοράς να επιλεγεί μια από τις εικόνες που αποτελούν το πανόραμα, και οι υπόλοιπες εικόνες να ανασυσταθούν (*warp*) στο σύστημα αναφοράς της αρχικής. Το προκύπτον πανόραμα συνήθως καλείται “επίπεδο πανόραμα” (*flat panorama*) και η προβολή στην τελική επιφάνεια είναι μια συνήθης προοπτική προβολή, στην οποία όπως είναι γνωστό οι ευθείες γραμμές διατηρούνται ευθείες.

Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις το γωνιακό άνοιγμα ξεπερνά κατά πολύ τις 90° , οπότε η προβολή όλων των εικόνων του πανοράματος στο επίπεδο της εικόνας αναφοράς προξενεί πολύ έντονες παραμορφώσεις όσο απομακρύνεται κανείς από την αρχική εικόνα. Οι δύο προβολές που κυρίως χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μεγάλου γωνιακού ανοίγματος είναι η κυλινδρική και η ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή.

2.6.1.1 Κυλινδρική προβολή (Cylindrical Projection)

Η κυλινδρική προβολή είναι ένας τύπος προβολής για την απεικόνιση (*mapping*) τμήματος της επιφάνειας μιας σφαίρας σε μια επίπεδη εικόνα¹⁶. Προκύπτει από την προβολή των σημείων της σφαίρας στην επιφάνεια ενός κυλίνδρου εφαπτόμενου στην σφαίρα και ακτίνας ίσης με την ακτίνα της σφαίρας (Εικ. 2.15). Η προβολή των σημείων της σφαίρας στον κύλινδρο παράγεται από την τομή της ακτίνας που συνδέει το κέντρο της σφαίρας και το εκάστοτε σημείο της επιφάνειας της σφαίρας με την επιφάνεια του κυλίνδρου. Η τελική δισδιάστατη προβολή προκύπτει ως το επίπεδο ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας.



Εικόνα 2.15: Κυλινδρική Προβολή (<http://mathworld.wolfram.com/CylindricalProjection.html>)

Στις πανοραμικές εικόνες η κυλινδρική προβολή χρησιμοποιείται συνήθως για να απεικονίζονται σκηνές με οριζόντιο γωνιακό άνοιγμα μεγαλύτερο των 120° . Στην κυλινδρική προβολή και στην τυπική περίπτωση κατά την

¹⁶ [http://Hugin.sourceforge.net/docs/manual/Cylindrical Projection.html](http://Hugin.sourceforge.net/docs/manual/Cylindrical%20Projection.html)

οποία ο κύλινδρος εφάπτεται στον ισημερινό της σφαίρας, ο ορίζοντας απεικονίζεται ως ευθεία γραμμή και διατηρούνται οι κατακόρυφες ευθείες, ενώ δεν μπορούν να απεικονιστούν οι περιοχές περί τους πόλους όπου οι προβολικές παραμορφώσεις βαίνουν αυξανόμενες μέχρι που απειρίζονται στον βόρειο και τον νότιο πόλο. Οι ευθείες γραμμές, πλην των κατακόρυφων και του ορίζοντα, απεικονίζονται ως καμπύλες.

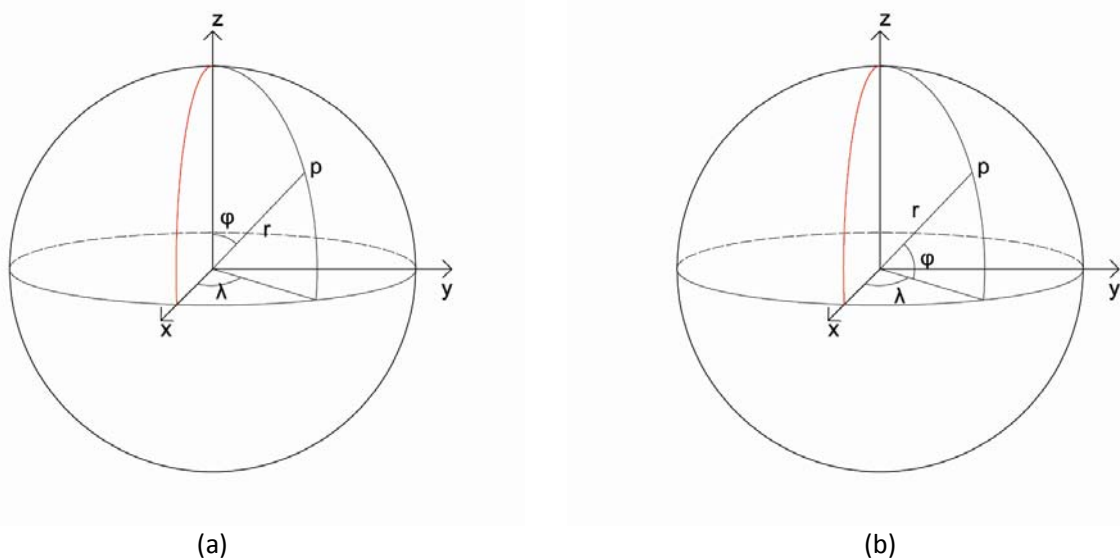
Οι εικονοσυντεταγμένες κυλινδρικής προβολής εκφράζονται συνήθως, χάριν ευκολίας, συναρτήσει σφαιρικών (φ, λ, r) και όχι καρτεσιανών συντεταγμένων:

$$\begin{aligned} x &= \lambda - \lambda_0 \\ y &= \tan \varphi \end{aligned} \tag{2.55}$$

Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση συστημάτων σφαιρικών συντεταγμένων, μέσω των οποίων εκφράζονται οι εικονοσυντεταγμένες τόσο της κυλινδρικής όσο και της ισαπέχουσας κυλινδρικής προβολής.

- **Σφαιρικές Συντεταγμένες**

Οι σφαιρικές συντεταγμένες βοηθούν για τον μετασχηματισμό από το τρισσορθώνιο σύστημα αναφοράς σε εικονοσυντεταγμένες x, y και σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η κυλινδρική ή η ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή.



Εικόνα 2.16: Συστήματα σφαιρικών συντεταγμένων (λ, φ, r) . (a) Ως γωνία φ χρησιμοποιείται η ζενίθια γωνία. (b) Ως γωνία φ χρησιμοποιείται η γωνία ύψους (παραπληρωματική της ζενίθιας).

Οι τρισδιάστατες σφαιρικές συντεταγμένες σημείου P ορίζονται από δύο γωνίες, λ και φ , και την ακτίνα της σφαίρας r . Ως γωνία λ ορίζεται η γωνία που μετρείται πάνω στο επίπεδο του ισημερινού μεταξύ του πρώτου μεσημβρινού (prime meridian) και του μεσημβρινού του εκάστοτε σημείου. Ως γωνία φ ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κάθετου διανύσματος στο επίπεδο του ισημερινού (Z) και της ακτίνας που συνδέει το κέντρο του κύκλου με το σημείο P (Εικ. 2.16a). Πολλές φορές (όπως και στην χαρτογραφία και την γεωδαισία) η γωνία φ μετρείται από το επίπεδο του ισημερινού και προς το σημείο P (Εικ. 2.16b). Στην περίπτωση όπου η σφαίρα έχει ως κέντρο της το κέντρο μάζας της γης, άξονα Z τον άξονα περιστροφής της γης και πρώτο μεσημβρινό τον μεσημβρινό του Greenwich, τότε οι γωνίες λ και φ ονομάζονται γεωγραφικό μήκος και πλάτος (με

το φ να ακολουθεί τη σύμβαση της Εικ. 2.16b). Στην περίπτωση όπου ο άξονας Z είναι παράλληλος με την διεύθυνση της βαρύτητας (και έχει αντίθετη φορά) και ο άξονας Y έχει κατεύθυνση προς τον βορρά, οι γωνίες λ και φ ονομάζονται αντίστοιχα αζιμούθιο και γωνία κλίσης (ζενίθια γωνία [Εικ. 2.16a]/γωνία ύψους [Εικ. 2.16b]).

Με χρήση του φορμαλισμού της Εικ. 2.16a, οι σχέσεις που συνδέουν σφαιρικές με τρισδιάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}\lambda &= \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ \varphi &= \arccos\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right) \\ r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}\end{aligned}\quad (2.56)$$

Σημειώνεται ότι για τον προσδιορισμό του τόξου εφαιπτομένης της γωνία λ απαιτείται (η γνωστή και από την γεωδαισία) διερεύνηση για την προσαρμογή της στο σωστό τεταρτημόριο. Οι αντίστροφες σχέσεις είναι:

$$X = r \sin \varphi \cos \lambda \quad Y = r \sin \varphi \sin \lambda \quad Z = r \cos \varphi \quad (2.57)$$

Εάν αντί του τυπικού συστήματος αναφοράς XYZ με το Z να έχει διεύθυνση προς τα πάνω χρησιμοποιηθεί το πιο σύνηθες στην φωτογραμμετρία τρισσορθογώνιο σύστημα της εικόνας με τον άξονα Z να είναι κάθετος στο επίπεδο της εικόνας και τον άξονα Y να είναι παράλληλος στην κατακόρυφο στο σημείο λήψης, και επιπλέον οι εικόνες που εξετάζονται είναι επίγειες, τότε αντιστρέφονται οι σχέσεις μεταξύ των Y και Z . Θεωρώντας την ακτίνα του κύκλου r ίση με τη μονάδα (εφόσον ενδιαφέρουν μόνον οι διευθύνσεις των ακτίνων από το κέντρο λήψης), μπορεί κανείς να γράψει τις σχέσεις και ως:

$$(\sin \varphi \cos \lambda, \sin \varphi \sin \lambda, \cos \varphi) = (X, Y, Z) \quad (2.58)$$

2.6.1.2 Ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή (Equirectangular Projection)

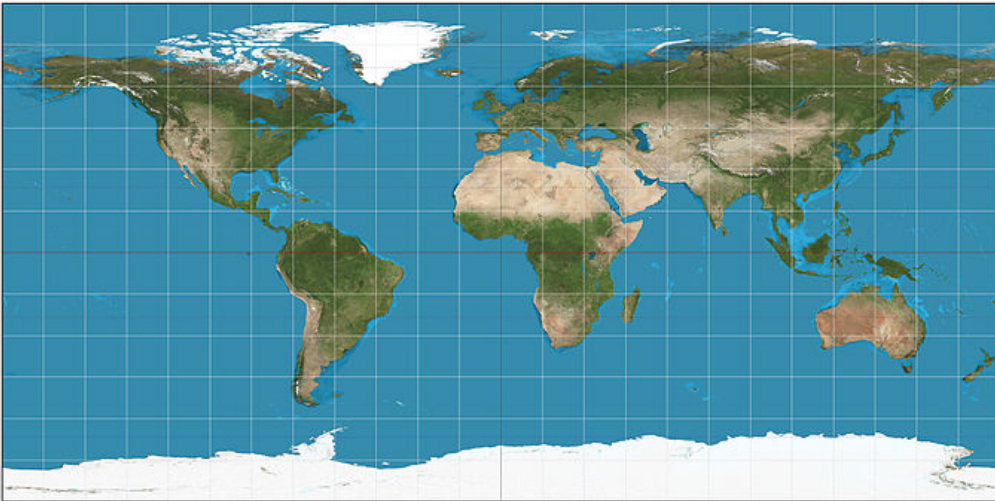
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην κυλινδρική προβολή οι περιοχές κοντά στους πόλους της σφαίρας προφανώς παρουσιάζουν πολύ έντονες παραμορφώσεις, ενώ οι ίδιοι οι πόλοι προβάλλονται στο άπειρο. Στις περιπτώσεις, λοιπόν, όπου το οριζόντιο όσο και το κατακόρυφο γωνιακό άνοιγμα είναι μεγάλα συνηθίζεται η χρήση της ισαπέχουσας κυλινδρικής προβολής. Βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να απεικονίσει ολόκληρη την σφαίρα, συμπεριλαμβανομένων των πόλων της οι οποίοι απεικονίζονται ως ευθείες.

Οι σχέσεις που συνδέουν τις σφαιρικές συντεταγμένες φ, λ με τις εικονοσυντεταγμένες x, y μιας εικόνας από ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή δίνονται ως:

$$x = r \lambda \cos \varphi_0 \quad y = r \varphi \quad (2.59)$$

όπου φ_0 είναι ο τυπικός παράλληλος κατά μήκος του οποίου δεν παρατηρείται μεταβολή στην κλίμακα, ενώ η παράμετρος r αναφέρεται στην ακτίνα της χρησιμοποιούμενης σφαίρας και ορίζει την κλίμακα της εικόνας. Για την μοναδιαία σφαίρα είναι $r = 1$, ενώ στην περίπτωση που επιλέγεται να εκφραστούν τα x, y σε pixel είναι $r = \frac{n}{360^\circ}$, όπου n ο αριθμός των στηλών της εικόνας. Σημειώνεται πως για να ισχύουν τα παραπάνω έχουν θεωρηθεί πανοραμική εικόνα οριζώντιου γωνιακού ανοίγματος 360° , γωνίες λ, φ εκφρασμένες σε μοίρες και εικονοψηφίδες τετραγωνικού σχήματος.

Σε περίπτωση όπου ως τυπικός παράλληλος επιλεγεί το επίπεδο του Ισημερινού (το επίπεδο που περιλαμβάνει το σημείο λήψης) τότε είναι $\cos \varphi_0 = 0$ και άρα η εικονοσυντεταγμένη $x = r \lambda$. Η εν λόγω προβολή ονομάζεται τετραγωνική ισαπέχουσα (*equiarectangular* ή *plate carrée*), καθώς προβάλλει τις περιοχές που περιβάλλονται από διαδοχικούς μεσημβρινούς και παράλληλους ως τετράγωνα (Εικ. 2.17). Οι παραμορφώσεις της προβολής εντείνονται όσο απομακρύνεται κανείς από τον ισημερινό, ενώ οι πόλοι της σφαίρας απεικονίζονται ως ευθείες γραμμές, μήκους ίσου με την περίμετρο της σφαίρας.



Εικόνα 2.17: Προβολή *plate carrée* της γήινης σφαίρας. Διαδοχικοί μεσημβρινοί και παράλληλοι σχηματίζουν τετράγωνα. (https://en.wikipedia.org/wiki/Equiarectangular_projection#/media/File:Equiarectangular_projection_SW.jpg)

Η προβολή *plate carrée* είναι εκείνη που υιοθετείται συνήθως για να απεικονιστούν σφαιρικά πανοράματα. Αν και δεν είναι ούτε σύμμορφη (προβολή που διατηρεί τα σχήματα) ούτε ισοδύναμη (προβολή που διατηρεί τα εμβαδά), έχει ως βασικό της πλεονέκτημα τον εύκολο προσδιορισμό των διευθύνσεων των ακτίνων του χώρου από την εικόνα μέσω των απλών σχέσεων $x = r\lambda$, $y = r\varphi$. Είναι ακριβώς αυτό της το πλεονέκτημα που αξιοποιείται μετρητικά στην συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Επίσης, εξισώνοντας τις σχέσεις μεταξύ σφαιρικών και καρτεσιανών συντεταγμένων (Εξ. 2.56) με τις σχέσεις μεταξύ εικονοσυντεταγμένων ισαπέχουσας κυλινδρικής προβολής (με $\varphi_0 = 0$) και σφαιρικών συντεταγμένων (Εξ. 2.59) παίρνει κανείς σχέσεις που συνδέουν απευθείας τις συντεταγμένες x', y' της ισαπέχουσας κυλινδρικής προβολής με τις συντεταγμένες της εικόνας x, y (Εξ. 2.60), καθώς και τις αντίστροφές τους (Εξ. 2.61):

$$\begin{aligned} x' &= s\lambda = s \tan^{-1} \frac{x}{f} \\ y' &= s\varphi = s \tan^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + f^2}} \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} x &= f \tan \lambda = f \tan \frac{x'}{s} \\ y &= \sqrt{x^2 + f^2} \tan \varphi = \tan \left(\frac{y'}{s} \right) f \sqrt{1 + \tan^2 \left(\frac{x'}{s} \right)} = f \tan \frac{y'}{s} \sec \frac{x'}{s} \end{aligned} \quad (2.61)$$

όπου ως γνωστόν $\sec(\alpha) = 1/\cos(\alpha)$.

Εκτός από την ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή σημειώνεται ότι το σφαιρικό πανόραμα μπορεί να προβληθεί και στις έξη επιφάνειες ενός κύβου. Η εν λόγω προβολή καλείται κυβική (cubic projection) και χρησιμοποιείται αρκετά στον τομέα των Γραφικών Υπολογιστών και σε εφαρμογές εικονικής περιήγησης. Στις Εικ. (2.18)–(2.20) απεικονίζονται παραδείγματα κυλινδρικής και ισαπέχουσας κυλινδρικής προβολής για το ίδιο πανόραμα της *Google Street View*, το οποίο δημιουργήθηκε με χρήση του προγράμματος *Hugin*. Συγκρίνοντας τις Εικ. (2.18) και (2.19) παρατηρεί κανείς τις πολύ πιο έντονες παραμορφώσεις της κυλινδρικής προβολής κοντά στον πόλο της σφαίρας. Ο τρόπος για να παρουσιαστεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα χωρίς τόσο έντονες παραμορφώσεις με χρήση της κυλινδρικής προβολής είναι η αποκοπή του πάνω τμήματος του πανοράματος, δηλαδή η μείωση του γωνιακού του ανοίγματος (Εικ. 2.20).

Ακόμη, η Εικ. (2.21) παρουσιάζει έναν εναλλακτικό τρόπο απεικόνισης ενός σφαιρικού πανοράματος με χρήση της κυβικής προβολής. Το λογισμικό *Hugin*, που κυρίως χρησιμοποιήθηκε εδώ, δεν υποστηρίζει απευθείας την δημιουργία κυβικής προβολής και απαιτεί την εγκατάσταση επιπλέον εκτελέσιμων αρχείων από την βιβλιοθήκη *Panotools*. Εν προκειμένω χρησιμοποιήθηκε έτοιμος κώδικας σε *python* που ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο¹⁷ και στον οποίο έγιναν ορισμένες αναγκαίες προσαρμογές. Ο κώδικας δέχεται ως στοιχείο εισόδου ένα πανόραμα σε κυλινδρική ισαπέχουσα προβολή και επιστρέφει την κυβική προβολή του.

Πέρα από τις προβολές που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα, για την απεικόνιση ενός πανοράματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οποιαδήποτε άλλη γνωστή χαρτογραφική προβολή. Το *Hugin* παρέχει έναν αρκετά μεγάλο αριθμό χαρτογραφικών προβολών (πχ. Μερκατορική, Ημιτονοειδή, προβολή Miller, προβολή Lambert κ.α.¹⁸), με τις οποίες μπορεί να πειραματιστεί ο χρήστης και να επιλέξει εκείνη που καλύπτει επαρκέστερα της εκάστοτε ανάγκες.



Εικόνα 2.18: Ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή πανοράματος της *Google Street View* της οδού Λέρου (περιοχή Κυψέλης).

¹⁷ <http://stackoverflow.com/a/29681646>

¹⁸ Για περισσότερες πληροφορίες: <http://Hugin.sourceforge.net/docs/manual/Projections.html>



Εικόνα 2.19: Κυλινδρική προβολή πανοράματος Google Street View της οδού Λέρου μεγάλου κατακόρυφου γωνιακού ανοίγματος.



Εικόνα 2.20: Κυλινδρική Προβολή πανοράματος της Google Street View της οδού Λέρου με αποκοπή των έντονα παραμορφωμένων περιοχών κοντά στο ζενίθ.



Εικόνα 2.19: Κυβική προβολή του ίδιου σφαιρικού πανοράματος της *Google Street View*.

2.7 Επιλογή περιοχών συρραφής και μίξη χρώματος (*seam selection - blending*)

Το τελευταίο βήμα για την δημιουργία του πανοράματος αφορά τον τρόπο σύνθεσης των εικονοψηφίδων των επιμέρους εικόνων σε ενιαίο πανόραμα με ομοιόμορφο τρόπο. Περιλαμβάνει την επιλογή των εικονοψηφίδων που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του τελικού πανοράματος (επιλογή περιοχών συρραφής) όσο και τον τρόπο απόδοσης βαρών ή μίξης των εικονοψηφίδων. Η διάκριση μεταξύ των δύο σταδίων είναι πολλές φορές κάπως ασαφής, καθώς η απόδοση βαρών στις εικονοψηφίδες κάθε εικόνας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός επιλογής και μίξης των τιμών φωτεινότητας (RGB). Ο Szelinski (2006) διαχωρίζει τις μεθόδους σε μεθόδους εκχώρησης βαρών με βάση την θέση των σημείων στην εικόνα (*spatially varying weighting*), επιλογής έγκυρων εικονοστοιχείων - δημιουργία ραφών (*pixel selection - seam placement*) και, τέλος, σε πιο σύνθετες μεθόδους, οι οποίες ακολουθούν διαφορετικές προσεγγίσεις η κάθε μια.

Δεδομένου ότι οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν εδώ προέρχονται από έτοιμες πανοραμικές της *Google Street View*, το συγκεκριμένο στάδιο δημιουργίας του πανοράματος δεν απαιτούσε σύνθετες τεχνικές για την υλοποίησή του, οπότε η αναλυτική παρουσίασή του δεν εμπίπτει στον στόχο της παρούσας εργασίας. Ακολουθεί απλώς μια σύντομη παρουσίαση της βασικής λογικής πίσω από τις μεθόδους, ενώ ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στον Szelinski (2006) για πληρέστερη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.

2.7.1 Απλές τεχνικές (Feathering και Center- Weighting)

Ο πιο απλός τρόπος για την δημιουργία ενός συνθέτου (*composite*) από επικαλυπτόμενες εικόνες υλοποιείται με χρήση της μέσης τιμής που προκύπτει για κάθε εικονοψηφίδα ως:

$$C(x) = \frac{\sum_k w_k(x) I_k(x)}{\sum_k x_k(x)} \quad (2.21)$$

όπου I_k είναι η εικόνα k και ο δυαδικός όρος w_k παίρνει τιμές 1 σε έγκυρες εικονοψηφίδες και 0 στις υπόλοιπες. Η χρήση ενός απλού μέσου όρου συνήθως δεν δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς οι διαφορές έκθεσης, η εναπομείνασα παράλλαξη λόγω σφαλμάτων σύνδεσης των εικόνων και οι όποιες κινήσεις στην σκηνή είναι ορατές στο τελικό πανόραμα. Σημειώνεται πάντως ότι το πρόβλημα των κινούμενων αντικειμένων μπορεί κατ' αρχήν να αντιμετωπιστεί με φίλτρο διαμέσου (*median*).

Μια καλύτερη προσέγγιση από τον απλό μέσο όρο προβλέπει εκχώρηση μεγαλύτερου βάρους σε pixel που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της εκάστοτε εικόνας και μικρότερου σε εκείνα που βρίσκονται κοντά στα άκρα της. Όταν από μια εικόνα έχουν αφαιρεθεί τμήματά της (*cutout regions*) είναι προτιμότερο να εκχωρείται μικρότερο βάρος στα pixel που βρίσκονται κοντά τόσο στα άκρα της εικόνας όσο και στα αποκομμένα τμήματά της. Αυτό γίνεται με υπολογισμό ενός χάρτη απόστασης ή με χρήση του μετασχηματισμού *grassfire* (Xiong & Turkowski, 1998), όπου για κάθε εικονοψηφίδα υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση από την εγγύτερη μη έγκυρη εικονοψηφίδα. Η χρήση σταθμισμένου μέσου όρου συναντάται στην αγγλόφωνη βιβλιογραφία και ως *feathering*, και εξασφαλίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις διαφορών έκθεσης μεταξύ των εικόνων, χωρίς όμως να αντιμετωπίζει φαινόμενα εναπομείνασας παράλλαξης ή κινούμενων αντικειμένων στις εικόνες.

Ένας τρόπος για την βελτίωση της τεχνικής *feathering* έγκειται στην ύψωση των τιμών των βαρών του χάρτη απόστασης w_k σε κάποια δύναμη p (w_k^p). Με αυτό τον τρόπο η τιμή του σταθμισμένου μέσου όρου προκύπτει κατά κύριο λόγο από τα pixel με μεγάλες τιμές βάρους. Μια τέτοια προσέγγιση εξισορροπεί τις επιδράσεις των ορατών διαφορών στην έκθεση μεταξύ τμημάτων από διαφορετικές εικόνες και της θολότητας που προκύπτει γύρω από ακμές σε περίπτωση χρήσης ενός απλού σταθμισμένου μέσου όρου. Όταν η τιμή της δύναμης p τείνει στο άπειρο ($p \rightarrow \infty$) επιλέγεται μόνο η εικονοψηφίδα με το μεγαλύτερο βάρος. Επομένως στο τελικό πανόραμα κάθε εικονοψηφίδα προέρχεται από μια και μόνο εικόνα. Αυτός ο "αυστηρός" τρόπος επιλογής των εικονοψηφίδων παράγει ουσιαστικά μια μάσκα ορατότητας, που προσομοιάζει στο διάγραμμα *Voronoi*, το οποίο εκχωρεί κάθε εικονοψηφίδα του πανοράματος στην εικόνα της οποίας το κέντρο βρίσκεται εγγύτερα στο αυτό.

2.7.2 Σύνθετες τεχνικές

2.7.2.1 Βέλτιστη επιλογή των περιοχών συρραφής

Η αποκοπή τμημάτων των εικόνων κατά την σύνθεση του τελικού πανοράματος επιτρέπει να παρακάμπτονται προβλήματα όπως το *ghosting*, λόγω κινούμενων αντικειμένων στο πανόραμα, καθώς και η θολότητα σε τμήματα του πανοράματος, πχ. εξαιτίας εναπομείνασας παράλλαξης μεταξύ εικόνων προερχόμενης από αστοχίες στην σύνδεσή τους (αγνόηση ακτινικής διαστροφής, μικρές μεταθέσεις εικόνων που θεωρήθηκαν ομόκεντρες).

Μια μέθοδος για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αποτελεί η χρήση διαγραμμάτων *Voronoi* ή η χρήση της μεθόδου *feathering* με ύψωση των βαρών του χάρτη απόστασης σε κάποια μεγάλη δύναμη p . Το βασικό μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου είναι ότι λαμβάνει υπόψη μόνο την απόσταση των εικονοψηφίδων του

τελικού πανοράματος από το άκρο της εικόνας, χωρίς να συνυπολογίζει την δομή της κάθε εικόνας (το “περιεχόμενο” της) στην περιοχή των συρραφών. Στο αποτέλεσμα του συνθέτου με την χρήση διαγραμμάτων Voronoi μπορεί να εμφανίζονται οι επαφές μεταξύ των εικόνων σε περίπτωση διαφορών έκθεσης, ενώ υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν και τμήματα κινούμενων αντικειμένων.

Μια καλύτερη προσέγγιση βασίζεται στην επιλογή των συρραφών σε περιοχές του επικαλυπτόμενου τμήματος όπου οι εικόνες “συμφωνούν”, ώστε η μετάβαση από την μια στην άλλη να γίνεται όσο το δυνατόν ομαλότερα. Για ένα ζεύγος εικόνων αυτή η διαδικασία μπορεί να διαμορφωθεί ως ένα απλό δυναμικό πρόγραμμα, το οποίο ξεκινά από κάποιο σημείο συμφωνίας στο ένα άκρο της επικαλυπτόμενης περιοχής και καταλήγει στο άλλο. Για παράδειγμα, ο Davis(1998) αναπτύσσει έναν αλγόριθμο εύρεσης της βέλτιστης ραφής μεταξύ δύο εικόνων, ο οποίος βασίζεται στην εικόνα της διαφοράς του επικαλυπτόμενου τμήματος της μιας εικόνας από την άλλη. Ορίζει την σχετική διαφορά μεταξύ των *pixel* δύο εικόνων I_1, I_2 ως: $abs(I_1 - I_2) / \max(I_1 - I_2)$, την οποία στην συνέχεια χρησιμοποιεί ως μέτρο ομοιότητας μεταξύ των δύο εικόνων. Δημιουργώντας μια εικόνα με τις τιμές της σχετικής διαφοράς στο επικαλυπτόμενο τμήμα, προσδιορίζει μια διαδρομή χαμηλής έντασης (*low intensity*) των τιμών της διαφοράς, η οποία θα οδηγήσει στην μικρότερη δυνατή ασυνέχεια μεταξύ των εικόνων. Για τον σκοπό αυτό, αφού προσδιορίσει το αρχικό σημείο στο ένα άκρο της εικόνας χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του Dijkstra για την ελαχιστοποίηση του κόστους της διαδρομής, χρησιμοποιώντας ως κόστη τις σχετικές διαφορές. Στην περίπτωση πολλών εικόνων, αυτές ενσωματώνονται σταδιακά στο πανόραμα, όπου για κάθε νέα εικόνα συγκρίνεται το επικαλυπτόμενο τμήμα της με το σύνθετο που έχει δημιουργηθεί έως εκείνη την στιγμή. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου παρουσιάζεται στις Εικ. 2.22 και 2.23, ενώ στην Εικ. 2.24 απεικονίζεται η κατάτμηση όλων των εικόνων που αποτελούν το τελικό πανόραμα.

Πιο σύνθετους αλγορίθμους εύρεσης βέλτιστων συρραφών έχουν αναπτύξει οι Uyttendaele et al. (2001) που εντοπίζουν περιοχές διαφορών μεταξύ επικαλυπτόμενων εικόνων, τις οποίες χρησιμοποιούν ως ακμές σε έναν γράφο. Οι ακμές του γράφου αντιπροσωπεύουν ζεύγη περιοχών διαφοράς που επικαλύπτονται στο τελικό σύνθετο. Ο αλγόριθμος αφαιρεί κορυφές από τον γράφο, έως ότου οι κορυφές που θα απομείνουν να μην συνδέονται με καμία ακμή. Μια άλλη σύνθετη μέθοδος αποκοπής οφείλεται στους Agarwala et al. (2004). Αυτή εκχωρεί κάθε εικονοψηφίδα του τελικού πανοράματος σε μια μόνο εικόνα βασιζόμενη στην ελαχιστοποίηση δύο συναρτήσεων κόστους. Η πρώτη βασίζεται στην εκχώρηση βαρών σε κάθε *pixel* του τελικού πανοράματος για κάθε εικόνα. Τα βάρη καθορίζονται είτε από τον χρήστη (με επιλογή κάποιων *pixel* από κάθε εικόνα) είτε αυτόματα με χρήση του κριτηρίου επιλογής της μέγιστης πιθανοφάνειας για την επιλογή εικονοψηφίδων που εμφανίζονται συχνότερα στο επικαλυπτόμενο τμήμα του συνθέτου. Η δεύτερη συνάρτηση αφορά στις ραφές μεταξύ γειτονικών εικόνων και εκχωρεί κόστη με βάση τις τοπικές διαφορές στις τιμές φωτεινότητας RGB μεταξύ των γειτονικών εικόνων στην περιοχή περί κάθε εικονοψηφίδα.

2.7.2.2 Μίξη χρώματος (*Blending*)

Μετά από την επιλογή των ραφών και την αφαίρεση των μη επιθυμητών αντικειμένων από το πανόραμα απαιτείται η μίξη των εικόνων για την αντιστάθμιση των διαφορών έκθεσης μεταξύ των εικόνων. Για τον σκοπό αυτό μια απλή λύση είναι η χρήση τεχνικών *feathering* (ενότητα 2.7.1). Ωστόσο, τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά χρησιμοποιούν πιο σύνθετους αλγορίθμους, καθώς με χρήση τεχνικών *feathering* είναι δύσκολο να επιτευχθεί ικανοποιητική ισορροπία ανάμεσα στην εξομάλυνση των διαφορών έκθεσης και την διατήρηση της αναγκαίας ενάργειας στις περιοχές κοντά στην επαφή όμορων εικόνων.



Εικόνα 2.20: Δημιουργία μωσαϊκού με χρήση απλού αλγορίθμου blending (Davis, 1998).



Εικόνα 2.21: Δημιουργία μωσαϊκού με χρήση του αλγορίθμου του Davis. Κάθε περιοχή του μωσαϊκού έχει τμήματα από μια και μόνο εικόνα (Davis, 1998).



Εικόνα 2.22: Κατάτμηση του μωσαϊκού της Εικ. 2.23 στις εικόνες που το αποτελούν (Davis, 1998).

Για την διαδικασία της μίξης εικόνων έχουν αναπτυχθεί πολλοί σύνθετοι αλγόριθμοι, κάθε ένας από τους οποίους ακολουθεί και διαφορετική προσέγγιση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ο Szeliski (2006) τους κατηγοριοποιεί στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

- **Μίξη Λαπλασιανής πυραμίδας (Laplacian pyramid blending):** Η μεθοδολογία αναπτύχθηκε από τους Burt &

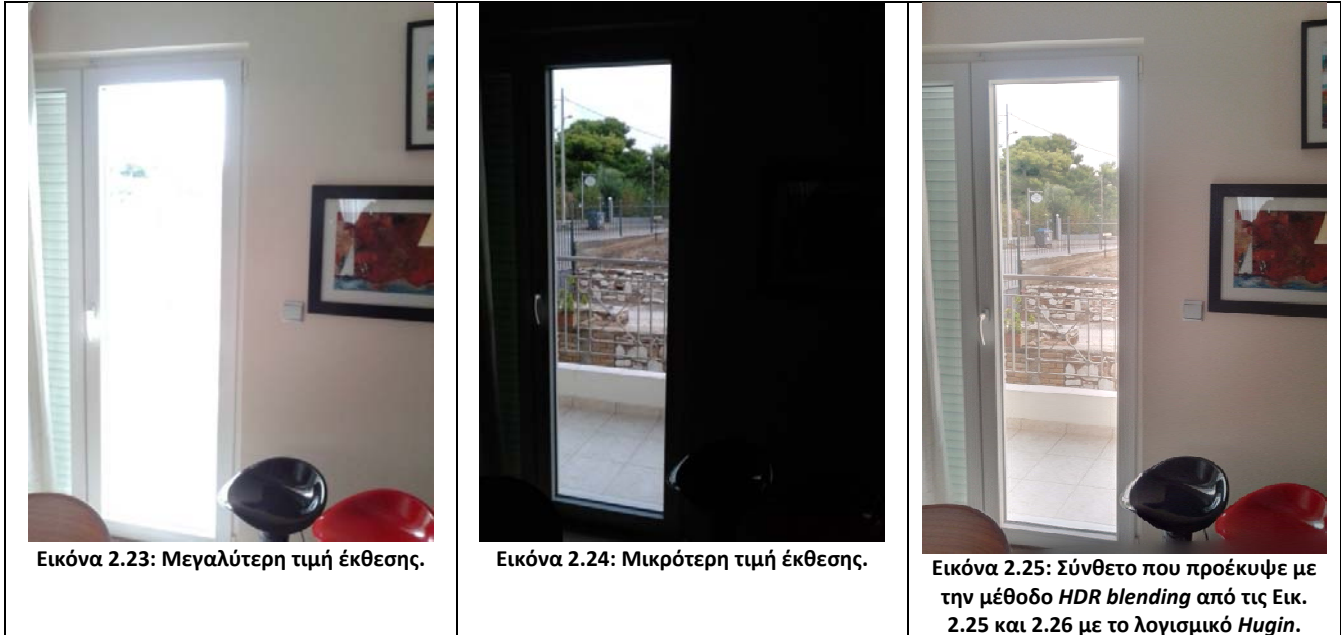
Adelson (1983) οι οποίοι, αντί να εφαρμόσουν *feathering* απευθείας στις εικόνες, πρότειναν την δημιουργία Λαπλασιανής πυραμίδας για κάθε μια από τις ανασυσταθείσες εικόνες και την εφαρμογή *feathering* σε κάθε ένα από τα επίπεδα της πυραμίδας. Η Λαπλασιανή πυραμίδα προκύπτει με εξομάλυνση κάθε επιπέδου με ένα διγραμμικό φίλτρο, μείωση της ανάλυσης της εικόνας στο μισό και αφαίρεση της νέας εικόνας από την αρχική. Στην συνέχεια η μάσκα κάθε εικόνας (που απεικονίζει τα έγκυρα pixel της) μετατρέπεται και αυτή σε μια Γκαουσιανή πυραμίδα. Οι εξομαλυμένες και μειωμένης ανάλυσης μάσκες που προκύπτουν για κάθε εικόνα χρησιμοποιούνται ως βάρη στην μίξη (*feathered blend*) κάθε επιπέδου των εικόνων. Η τελική εικόνα προκύπτει από παρεμβολή και άθροισμα όλων των επιμέρους επιπέδων που προσδιορίστηκαν. Την μεθοδολογία αυτή αξιοποιούν και οι Brown & Lowe (2007) στον αλγόριθμο αυτόματης δημιουργίας πανοραμάτων.

- **Μίξη στο πεδίο των κλίσεων (gradient domain blending):** Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται στην υλοποίηση των υπολογισμών και της μίξης των εικόνων στον χώρο των παραγώγων των εικόνων (*gradient space*). Περισσότερες πληροφορίες δίνει σχετικά ο Szeliski (2006).
- **Αντιστάθμιση έκθεσης (exposure compensation):** Στις περιπτώσεις όπου οι διαφορές έκθεσης μεταξύ των εικόνων είναι πολύ μεγάλες, οι Uyttendaele et al. (2001) προτείνουν μια επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία εκτιμάται μια τοπική διόρθωση μεταξύ κάθε εικόνας και ενός προσωρινού συνθέτου που έχει προκύψει από *feathering*. Μετά από την διόρθωση όλων των εικόνων προσδιορίζεται εκ νέου το σύνθετο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Στην τυπική περίπτωση αρκούν τρεις επαναλήψεις για την ικανοποιητική μίξη των εικόνων σε ένα τελικό σύνθετο.
- **Εικόνες υψηλού δυναμικού εύρους (high dynamic range imaging – HDR):** Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αντιστάθμιση της έκθεσης στο τελικό σύνθετο αποτελεί η τεχνική HDR, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό ενός ραδιομετρικού χάρτη αυξημένου εύρους (*high dynamic range radiance map*) από τις εικόνες διαφορετικής έκθεσης. Η πρώτη μέθοδος για την παραγωγή ψηφιακών εικόνων HDR οφείλται στους Mann & Ricard (1995) και βασίζεται στην ιδέα της αύξησης του εύρους της φωτεινότητας που απεικονίζεται σε μια εικόνα σε σχέση με το εύρος των 8 bit που χαρακτηρίζει τις τυπικές ψηφιακές εικόνες. Η μέθοδος στηρίζεται στην αύξηση του εύρους έκθεσης χρησιμοποιώντας περισσότερες από μια εικόνες της ίδιας σκηνής, κάθε μια από τις οποίες έχει ληφθεί με διαφορετικές τιμές έκθεσης. Για την μετατροπή του ραδιομετρικού χάρτη που παράγεται με τεχνική HDR σε εικόνα τυπικού εύρους φωτεινότητας εφαρμόζονται μέθοδοι *tone mapping* (για μια συνοπτική βιβλιογραφία μπορεί κανείς να ανατρέξει στον Szeliski, 2006). Για την σύντομη παρουσίαση της μεθόδου HDR, καθώς και την τεκμηρίωση των ορίων απόδοσής της, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο άρθρο των Aguerrebere et al. (2012). Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου, το οποίο υλοποιήθηκε ενδεικτικά στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας με χρήση του λογισμικού *Hugin*, παρουσιάζεται στις Εικ. 2.25–2.27.

2.8 Αυτόματη δημιουργία πανοραμικών εικόνων και διαθέσιμα λογισμικά

Η εφαρμογή όλων των παραπάνω διαδικασιών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία της τελικής πανοραμικής εικόνας. Αυτή δημιουργείται με την βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών, στα οποία η εφαρμογή των εν λόγω διαδικασιών μπορεί να γίνει είτε σε στάδια και σε αλληλεπίδραση με τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να καθορίσει τις παραμέτρους των μοντέλων κάθε σταδίου, είτε κατά τρόπο αυτόματο με όλες τις παραμέτρους ρυθμισμένες από προεπιλογή ή προσδιοριζόμενες αυτόματα κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων. Το καλύτερο παράδειγμα

αλγορίθμου για την αυτόματη παραγωγή πανοραμάτων – που έχει υπόψη του ο γράφων – περιγράφεται από τους Brown & Lowe (2007). Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου τους, σε ψευδογλώσσα, δίνεται στην Εικ. 2.28.



	<p>Algorithm: Automatic Panorama Stitching</p> <p>Input: n unordered images</p> <ol style="list-style-type: none"> I. Extract SIFT features from all n images II. Find k nearest-neighbours for each feature using a k-d tree III. For each image: <ol style="list-style-type: none"> (i) Select m candidate matching images that have the most feature matches to this image (ii) Find geometrically consistent feature matches using RANSAC to solve for the homography between pairs of images (iii) Verify image matches using a probabilistic model IV. Find connected components of image matches V. For each connected component: <ol style="list-style-type: none"> (i) Perform bundle adjustment to solve for the rotation $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ and focal length f of all cameras (ii) Render panorama using multi-band blending <p>Output: Panoramic image(s)</p>
--	--

Εικόνα 2.26: Αλγόριθμός Αυτόματης Δημιουργίας Πανοραμικής Εικόνας (Brown & Lowe, 2007).

Υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων λογισμικών πακέτων, ελεύθερων και εμπορικών, για την σύνθεση πανοραμάτων από πολλαπλές λήψεις. Ένα από τα πλέον διαδεδομένα ελεύθερα πακέτα λογισμικού για τον σκοπό αυτό είναι το λογισμικό *Hugin*, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και αναλύεται στα επόμενα. Ένα άλλο λογισμικό, διανεμόμενο δωρεάν αλλά όχι ελεύθερο, είναι το *Image Composite Editor* της Microsoft¹⁹. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένα ακόμα εμπορικά λογισμικά για την παραγωγή πανοραμάτων. Πρόκειται για το *Microsoft Photosynth*²⁰ και το *Panoweaver 9*²¹ της εταιρείας *Easypano Holdings Inc.*, ενώ και το *PhotoShop* διαθέτει διάφορα *plugins* για την παραγωγή πανοραμικών εικόνων (ελεύθερο plugin: *PanoTools*, εμπορικό: *Flexify 2*). Δύο ακόμη λογισμικά κατασκευής πανοραμικών εικόνων που ανήκουν στην κατηγορία των λογισμικών *shareware* είναι τα *PTGui* και *PTAssembler* (πληροφορίες σχετικά με τις κατηγορίες ελεύθερου και μη ελεύθερου λογισμικού μπορούν να αναζητηθούν στην ιστοσελίδα του λειτουργικού συστήματος GNU²²).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι σύγχρονες φωτογραφικές μηχανές καθώς και τα κινητά *smartphone* έχουν ενσωματωμένα προγράμματα που επιτρέπουν την αυτόματη σύνθεση πανοραμικών από πολλαπλές λήψεις, ενώ συνήθως καθοδηγούν και τον χρήστη στον τρόπο λήψης των εικόνων. Στην Εικ. 2.29 παρουσιάζεται, για παράδειγμα, πανοραμική εικόνα που δημιουργήθηκε αυτόματα με χρήση ενός *smartphone* Samsung Galaxy Ace 2 με κάμερα 5-Megapixel (επισημαίνεται πως η κοπέλα που περπατάει κοντά στον στύλο φωτισμού στα αριστερά έχει δημιουργήσει διπλή εικόνα, δηλαδή φαινόμενο *ghosting*).



Εικόνα 2.27: Παράδειγμα πανοραμικής εικόνας που δημιουργήθηκε αυτόματα με χρήση κινητού τηλεφώνου.

2.9 Λογισμικό *Hugin*

Το *Hugin* είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα για την σύνθεση πανοραμικών εικόνων. Ξεκίνησε ως γραφική διεπαφή χρήστη (*Graphical User Interface - GUI*) για την σουίτα προγραμμάτων *Panorama Tools* που είχε αναπτυχθεί αρχικά από τον Helmut Dersch την περίοδο 1998-2001²³ και αποτελείτο από σειρά προγραμμάτων και βιβλιοθηκών προσβάσιμων από την γραμμή εντολών του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου λογισμικού (*windows, linux, OS*). Έκτοτε, την σουίτα *Panorama Tools* συντηρεί και αναβαθμίζει ομάδα προγραμματιστών στο πλαίσιο της ανάπτυξης λογισμικού ανοιχτού κώδικα. Το *Hugin* έχει επεκτείνει την λειτουργικότητα του *Panorama Tools* ενσωματώνοντας σταδιακά και μια σειρά επιπλέον υποπρογράμματα (*components*).

Στις εκδόσεις από το 2013 και μετά, το *Hugin* προσφέρει τρεις διαφορετικές διεπαφές χρήστη (*user interfaces*):

- Την απλή (*Simple*), η οποία είναι η πλέον αυτοματοποιημένη και επιτρέπει την δημιουργία πανοραμάτων,

¹⁹ <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/projects/ice/>

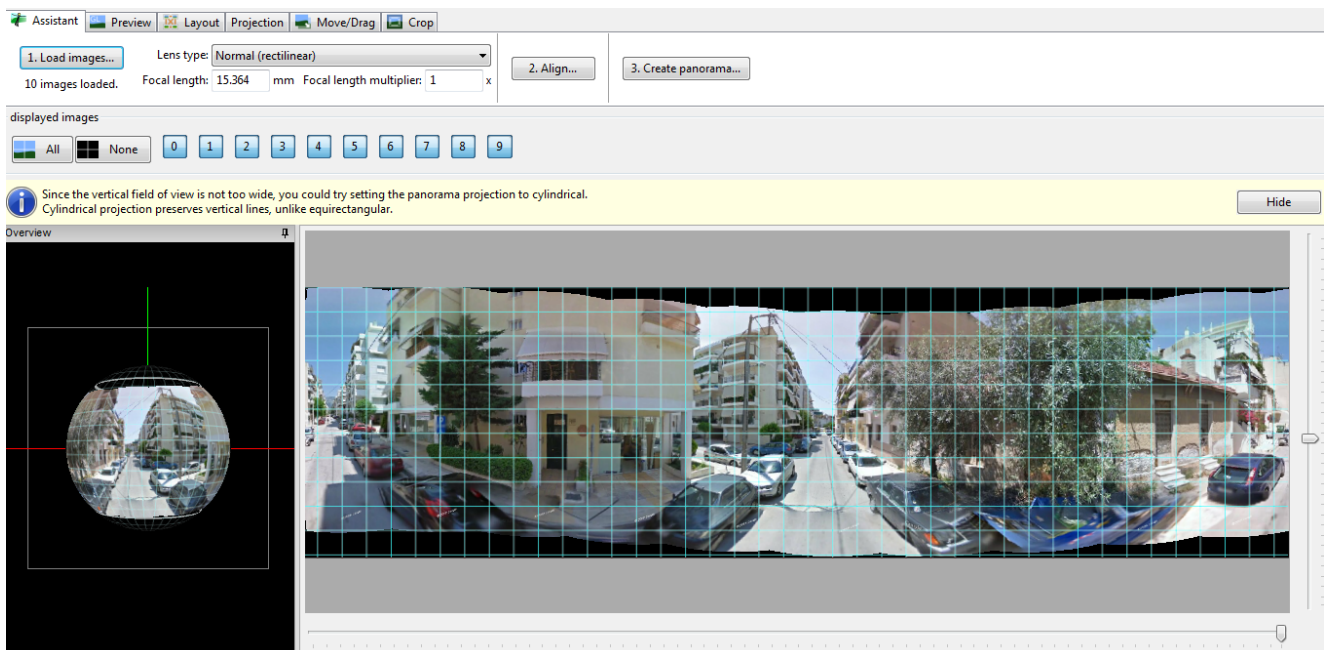
²⁰ <https://www.photosynth.net/>

²¹ <http://www.easypano.com/panorama-software.html>

²² <http://www.gnu.org/philosophy/categories.el.html>

²³ Πηγές: http://wiki.panotools.org/Panorama_tools , <http://www.panotools.org/dersch/>

αποκρύπτοντας όλες τις σύνθετες λειτουργίες, ενώ επαρκεί για το 90% των περιπτώσεων χρήσης²⁴ (Εικ. 2.30). Στην απλή λειτουργία ζητείται από τον χρήστη απλώς η εισαγωγή των εικόνων και η εκκίνηση της διαδικασίας σύνδεσής τους, η οποία πραγματοποιείται εντελώς αυτόματα βάσει προκαθορισμένων παραμέτρων. Επίσης ο χρήστης μπορεί να ορίσει την προβολή και τον προσανατολισμό του τελικού πανοράματος.



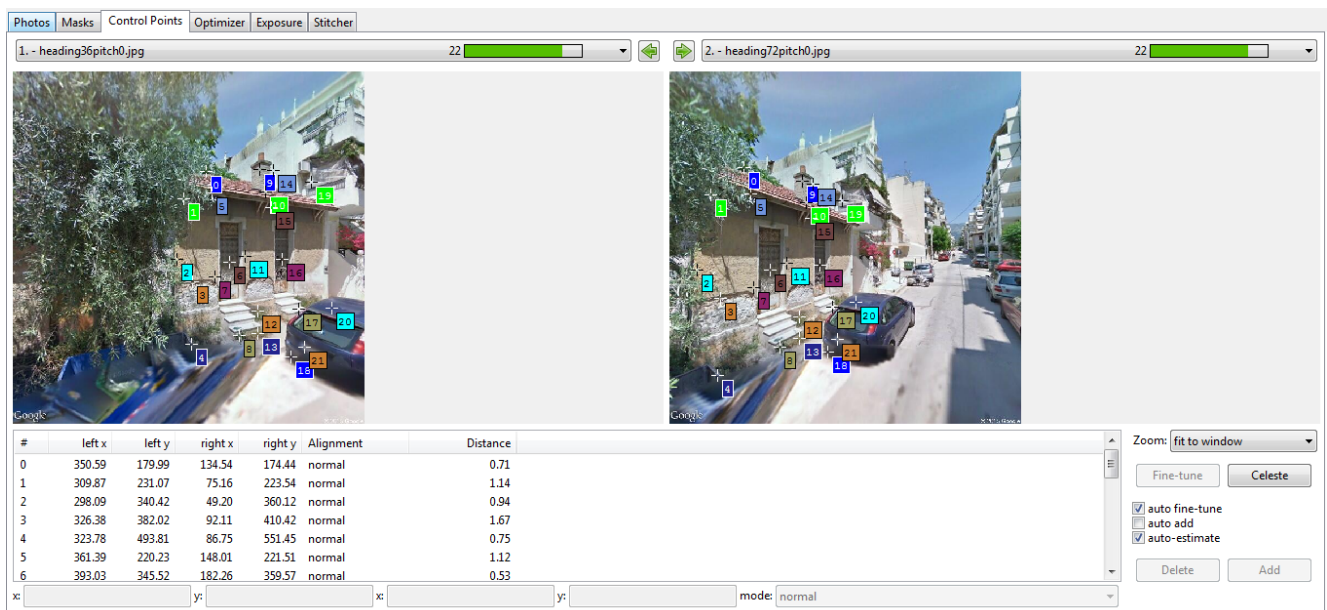
Εικόνα 2.30: Απλή διεπαφή χρήστη του λογισμικού *Hugin*.

- Την προχωρημένη (Advanced), όπου ο χρήστης ορίζει την διαδικασία κατασκευής του πανοράματος από το παράθυρο *Panorama Editor window*. Το παράθυρο αυτό αποτελείται από ένα σύνολο καρτελών: (α) Την **καρτέλα εικόνων** (*image tab*), που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των εικόνων, την ρύθμιση των αρχικών τιμών των παραμέτρων του φακού για κάθε εικόνα, την αυτόματη εύρεση και συνταύτιση επικαλυπτόμενων εικόνων (με χρήση μεθόδων βάσει χαρακτηριστικών), τον ορισμό της εικόνας αναφοράς και της θέσης των εικόνων στο τελικό πανόραμα, και την μέθοδο ραδιομετρικής βελτιστοποίησης του τελικού πανοράματος. (β) Την **καρτέλα ορισμού μάσκας** (*masks tab*), στην οποία ο χρήστης μπορεί να ορίσει για κάθε εικόνα επιμέρους περιοχές που θα ληφθούν υπόψη στην διαδικασία σύνθεσης του πανοράματος, ενώ το υπόλοιπο της εικόνας θα αγνοηθεί. (γ) Την **καρτέλα των σημείων σύνδεσης** (*control points tab*) – βλ. Εικ. 2.31 – όπου ο χρήστης μπορεί να επιθεωρήσει τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων, καθώς και τα σημεία που χρησιμοποιούνται για την σωστή οριζοντίωση του πανοράματος (όπως έχει προαναφερθεί) και να προσθαφαιρέσει σημεία. (δ) Την **καρτέλα γεωμετρικής βελτιστοποίησης** (*optimizer tab*), όπου ο χρήστης μπορεί να δεσμεύει για κάθε εικόνα παραμέτρους σύνδεσης (σχετικού προσανατολισμού) ή και φακού (εσωτερικού προσανατολισμού) – σημειώνεται πως η καρτέλα είναι διαθέσιμη μόνο εφόσον ο χρήστης δεν επιλέξει κάποια από τις έτοιμες επιλογές γεωμετρικής βελτιστοποίησης που προσφέρει η καρτέλα εικόνων. (ε) Την **καρτέλα ραδιομετρικής βελτιστοποίησης** (*exposure tab*), όπου ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους για την διόρθωση της φωτεινότητας και των χρωμάτων του πανοράματος – η καρτέλα είναι διαθέσιμη μόνο εφόσον από το μενού των διαθέσιμων μεθόδων ραδιομετρικής βελτιστοποίησης στην καρτέλα εικόνων ο χρήστης επιλέξει να ρυθμίσει ο ίδιος της παραμέ-

²⁴ <http://wiki.panotools.org/Hugin>

τρους (*Photometric Custom Parameters*). (στ) Την **καρτέλα σύνθεσης του πανοράματος** (*stitcher tab*), τέλος, όπου επιλέγεται η τελική προβολή, το οριζόντιο και κατακόρυφο γωνιακό άνοιγμα και το μέγεθος σε ρικελ του πανοράματος, καθώς και το τμήμα του που θα συμπεριληφθεί στην εικόνα που θα προκύψει ως τελικό πανόραμα (*crop*).

- Την εξειδικευμένη διεπαφή (*Expert*), η οποία περιλαμβάνει τις ίδιες καρτέλες με την διεπαφή *Advanced*, ενώ προσφέρει την δυνατότητα ρύθμισης ακόμη περισσότερων παραμέτρων. Επί παραδείγματι, στην περίπτωση της καρτέλας γεωμετρικής βελτιστοποίησης (*optimizer tab*) επιτρέπει να ρυθμίζονται παράμετροι μετάθεσης (δέσμευση και καθορισμός αρχικών τιμών) του σημείου λήψης, ενώ ακόμα στην διεπαφή *Advanced* οι εικόνες θεωρούνται ομόκεντρες και μπορούν να ρυθμιστούν μόνο οι παράμετροι στροφής.



Εικόνα 2.28: Καρτέλα διαχείρισης ομόλογων σημείων του λογισμικού *Hugin*.

Τα επιμέρους προγράμματα που είναι διαθέσιμα μέσω του *Hugin* μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μέσω της γραμμής εντολών των *windows* (και όχι μόνο). Το γεγονός αυτό δίνει δυνατότητες πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας παραγωγής πανοραμάτων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περίπτωση σύνθεσης πανοραμικών εικόνων από τα καρέ (*frames*) της *Google Street View*, καθώς όλα τα καρέ προέρχονται από το ίδιο πανόραμα, πράγμα που απλοποιεί την διαδικασία σύνθεσης πανοραμικών εικόνων. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται η δημιουργία πανοράματος με χρήση εκτελέσιμων προγραμμάτων του *Hugin* μέσω εντολών στο *command line* των *windows*. Προτιμήθηκε η παρουσίαση παραδείγματος με χρήση της γραμμής εντολών αφενός γιατί με αυτόν τον τρόπο είναι σαφή τα στάδια παραγωγής του πανοράματος και, αφετέρου, για να παρουσιαστεί το pipeline που διαμορφώθηκε για την δημιουργία των πανοραμάτων που θα εισαχθούν στον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.

2.9.1 Παράδειγμα παραγωγής πανοραμικής εικόνας από το *command line*

Δημιουργία project και φόρτωση των εικόνων. Το project του *Hugin* είναι ουσιαστικά ένα αρχείο κειμένου με συγκεκριμένο μορφότυπο (αρχείο PTO), στο οποίο ορίζονται και αποθηκεύονται όλες οι αναγκαίες παράμετροι για την δημιουργία μιας πανοραμικής εικόνας.

```
pto_gen.exe -o project.pto *.jpg
```

Ορισμός γωνιακού ανοίγματος των εικόνων που εισήχθησαν στο project. Κατά την εισαγωγή κάθε εικόνας στο project του *Hugin* απαιτείται να καθορισθεί το γωνιακό άνοιγμα της εικόνας. Σε περιπτώσεις όπου το γωνιακό άνοιγμα έχει αποθηκευτεί στο αρχείο *EXIF* της εικόνας, η ανάκτηση της εν λόγω πληροφορίας γίνεται απευθείας από το *Hugin*.

```
pto_var.exe -o project.pto -set v=90 project.pto
```

Ορισμός γωνιών yaw (οριζόντιων γωνιών) των εικόνων. Ο υπολογισμός των γωνιών θα μπορούσε να γίνει αυτόματα κατά την διαδικασία της γεωμετρικής βελτιστοποίησης από το *Hugin*, αλλά για την επίτευξη της διαδικασίας δίνονται προσωρινές τιμές. Το εκτελέσιμο πρόγραμμα *pto_var.exe*²⁵ επιτρέπει την διαχείριση των παραμέτρων των εικόνων σε ένα project του *Hugin*. Ειδικότερα, επιτρέπει την επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου προς βελτιστοποίηση και την επιβολή δεσμεύσεων σε παραμέτρους συγκεκριμένων εικόνων, την εκχώρηση αρχικών τιμών σε παραμέτρους κάθε εικόνας και την δημιουργία και διαχείριση ομάδων εικόνων που έχουν κοινές παραμέτρους. Διευκρινίζεται ότι ομάδες εικόνων μπορούν να δημιουργηθούν μόνον όσον αφορά τις παραμέτρους του φακού, δηλαδή δηλώνεται ότι ένα σύνολο εικόνων έχει ληφθεί με τον ίδιο φακό.

```
pto_var.exe -o project.pto -set y1=36 y2=72 y3=108 y4=144 y5=180 y6=216  
y7=252 y8=288 y9=324 y10=360 project.pto
```

Εύρεση σημείων σύνδεσης μεταξύ των εικόνων. Η εύρεση και περιγραφή των σημείων ενδιαφέροντος των εικόνων, η αντιστοίχιση των σημείων μεταξύ εικόνων και η συνταύτιση των εικόνων (άρα και η εύρεση των επικαλυπτόμενων τμημάτων μεταξύ των εικόνων) γίνονται με χρήση του προγράμματος *cpfind*²⁶. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα, το οποίο εντοπίζει σημεία ενδιαφέροντος σε κάθε εικόνα με έναν τελεστή που βασίζεται στις κλίσεις της έντασης των εικονοψηφίδων (*gradient-based detector*), δημιουργεί διανύσματα περιγραφικών χαρακτηριστικών (*descriptors*) για κάθε σημείο, εντοπίζει ομολογίες μεταξύ των εικόνων και απαλείφει χονδροειδή σφάλματα με την βοήθεια του αλγορίθμου RANSAC. Το πρόγραμμα διαθέτει διάφορες στρατηγικές για την συνταύτιση των εικόνων, που εξαρτώνται από την *a priori* γνώση των συσχετισμών μεταξύ τους. Επί παραδείγματι, εάν οι εικόνες 1-2-3-4 συνδέονται διαδοχικά μεταξύ τους με την σειρά που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα, τότε με την επιλογή *--linearmatch* επιχειρείται η σύνδεση μόνο μεταξύ διαδοχικών εικόνων: 1-2, 2-3, 3-4. Επίσης, μπορεί να καθορισθεί η απόσταση μεταξύ των εικόνων προκειμένου να εξεταστεί η πιθανότητα σύνδεσης μέσω της επιλογής *--linearmatchlen x*, όπου *x* η απόσταση. Για παράδειγμα, αν *x = 2*, τότε για το προηγούμενο σετ εικόνων θα εξεταστεί η σύνδεση μεταξύ των εικόνων 1-2, 1-3, 2-3, 2-4 και 3-4. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει η επιλογή *--multirow* για την σύνδεση εικόνων που ανήκουν σε ένα πανόραμα αποτελούμενο από πολλαπλές γραμμές και στήλες εικόνων. Σε αυτή την περίπτωση οι εικόνες συνταυτίζονται ανά δύο (περίπτωση *--linearmatch*) και δημιουργούνται σύνολα επικαλυπτόμενων εικόνων (ένα για κάθε γραμμή του πανοράματος). Στην συνέχεια επιχειρείται συνταύτιση της πρώτης και της τελευταίας εικόνας μεταξύ όλων των διαφορετικών γραμμών του πανοράματος. Τέλος, προσφέρεται και η βασική επιλογή (που υπάρχει ως προεπιλογή - *default*) εξαντλητικής διερεύνησης (κάθε εικόνα με όλες τις άλλες) για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει καμία *a priori* γνώση για τις σχετικές θέσεις των εικόνων. Η επιλογή αυτή, παρ' ότι δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα,

²⁵ http://wiki.panotools.org/Pto_var

²⁶ http://wiki.panotools.org/Cpfind#Feature_description

είναι η πιο απαιτητική υπολογιστικά και άρα απαιτεί περισσότερο χρόνο εκτέλεσης.

Με την επιλογή `--celeste` εφαρμόζεται ένας επιπλέον αλγόριθμος για την απαλοιφή ομόλογων σημείων που εντοπίζονται στα σύννεφα, ενώ το *Hugin* επιτρέπει να οριστούν το μέγεθος της περιοχής που εξετάζεται για την παραγωγή των descriptors των σημείων ενδιαφέροντος και ορισμένες παράμετροι του αλγορίθμου RANSAC.

Εναλλακτικά, θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει τα προγράμματα *Autopano-sift*²⁷, το οποίο προσδιορίζει ομολογίες σημείων με χρήση του αλγορίθμου SIFT, ή *Panomatic*²⁸, το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο SURF για την εύρεση ομολογιών. Τα δύο αυτά προγράμματα απαιτούν πάντως ξεχωριστή εγκατάσταση προκειμένου να χρησιμοποιηθούν από το *Hugin*.

```
cpfind.exe -o project.pto -multirow -celeste project.pto
```

Καθαρισμός των σημείων σύνδεσης από χονδροειδή σφάλματα. Πέραν της απαλοιφής λανθασμένων ομολογιών (με τον αλγόριθμο RANSAC) με εφαρμογή της επιτολικής γεωμετρίας ανά ζεύγος επικαλυπτόμενων εικόνων, το πρόγραμμα *cpclean*²⁹ επιτρέπει την απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων εξετάζοντας το σύνολο των σημείων που απαρτίζουν το πανόραμα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια πρώτη βελτιστοποίηση των παραμέτρων σύνδεσης και απορρίπτονται τα σημεία των οποίων το σφάλμα σύνδεσης μετά την συνόρθωση ξεπερνά κάποιο καθορισμένο κατώφλι (από προεπιλογή το κατώφλι ισούται με το διπλάσιο της σ posteriori τυπικής απόκλισης της συνόρθωσης).

```
cpclean.exe -o project.pto project.pto
```

Εύρεση Κατακόρυφων Ευθειών για την επιβολή δεσμεύσεων οριζοντίωσης του πανοράματος. Εν προκειμένω χρησιμοποιείται το πρόγραμμα *linefind*³⁰, το οποίο εντοπίζει κατακόρυφες ευθείες σε κάθε εικόνα και εκχωρεί σημεία κατακόρυφου ελέγχου (*vertical control points*) σε αυτές. Τα εν λόγω σημεία λειτουργούν ως δεσμεύσεις στο υπό βελτιστοποίηση σύστημα για την σωστή οριζοντίωση του τελικού πανοράματος. Προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία του αλγορίθμου είναι οι εικόνες να έχουν ληφθεί σχεδόν οριζόντια (μικρές τιμές των γωνιών *pitch* και *roll*), όπως άλλωστε συνηθίζεται στις τυπικές λήψεις. Στις εικόνες (Εικ. 2.32–2.34) παρουσιάζονται τα πανοράματα που προέκυψαν χωρίς δεσμεύσεις μέσω σημείων κατακόρυφου ελέγχου (Εικ. 2.32) καθώς και με την χρήση τέτοιων δεσμεύσεων (Εικ. 2.33). Δεδομένου ότι οι εικόνες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του πανοράματος αποτελούν τμήματα ενός ήδη οριζοντιωμένου πανοράματος, οι διαφορές μεταξύ των δύο απεικονίσεων δεν υπερβαίνουν τις 2° με 3° . Για καλύτερη παρουσίαση του αποτελέσματος εξήχθησαν οι ακμές και στα δύο πανοράματα με φίλτρο Sobel και απεικονίζονται υπερτεθειμένες στην (Εικ. 2.34).

```
linefind.exe -o project.pto project.pto
```

Επιλογή γεωμετρικών παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Σε αυτό το στάδιο ορίζονται, μέσω του προγράμματος *pto_var*, οι παράμετροι του μοντέλου προς βελτιστοποίηση. Στο επόμενο παράδειγμα βελτιστοποιούνται το γωνιακό άνοιγμα (ν), οι τρεις στροφές *yaw*(y), *pitch*(p) και *roll*(r), και οι παράμετροι διόρθωσης για πρωτεύον

²⁷ <http://hugin.sourceforge.net/docs/manual/Autopano-sift.html>

²⁸ <http://hugin.sourceforge.net/docs/manual/Panomatic.html>

²⁹ <http://wiki.panotools.org/Cpclean>

³⁰ <http://hugin.sourceforge.net/docs/manual/Linefind.html>

σημείο (d , e) και ακτινική διαστρόφη (b).

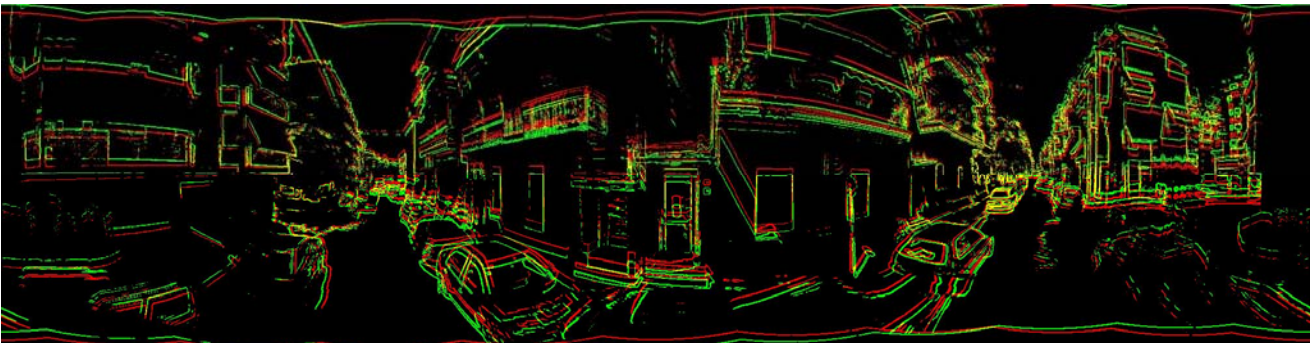
```
pto_var.exe -opt v,y,p,r,b,d,e -o project.pto project.pto
```



Εικόνα 2.29: Πανόραμα που προέκυψε χωρίς τις δεσμεύσεις μέσω των σημείων κατακόρυφου ελέγχου.



Εικόνα 2.30: Πανόραμα που προέκυψε με δεσμεύσεις μέσω των σημείων κατακόρυφου ελέγχου.



Εικόνα 2.31: Υπέρθηση των ακμών από εφαρμογή φίλτρου Sobel στα πανοράματα των Εικ. 2.32 (κόκκινο) και 2.33 (πράσινο).

Δέσμευση της τιμής της οριζόντιας γωνίας (γωνίας διεύθυνσης) της πρώτης εικόνας. Στην περίπτωση των εικόνων της *Google Street View* είναι, γενικά, επιθυμητή η δέσμευση της οριζόντιας γωνίας κάποιας εικόνας ώστε να είναι γνωστός ο προσανατολισμός του πανοράματος. Προς τούτο δεσμεύεται η οριζόντια γωνία της πρώτης εικόνας (γ_0), η οποία είναι ίση με 0. Με αυτό τον τρόπο το κέντρο του πανοράματος που θα προκύψει θα έχει διεύθυνση προς τον βορρά.

```
pto_var.exe -modify -opt -opt ! $\gamma_0$  -o project.pto project.pto
```

Βελτιστοποίηση παραμέτρων σύνδεσης και ραδιομετρικών παραμέτρων των εικόνων. Η βελτιστοποίηση αυτή πραγματοποιείται με το πρόγραμμα *autooptimiser*. Οι παράμετροι επιλογής του αφορούν την βελτιστοποίηση των παραμέτρων σύνδεσης που υπάρχουν στο αρχείο του project (-n) όπως αυτές ορίστηκαν από τις προηγούμενες εντολές, την βελτιστοποίηση των ραδιομετρικών παραμέτρων (-m) και την οριζόντιωση του πανοράματος (-l) με χρήση των δεσμεύσεων που προκύπτουν από τα σημεία κατακόρυφου ελέγχου.

```
autooptimiser.exe -n -m -l -o project.pto project.pto
```

Ορισμός γωνιακού ανοίγματος του πανοράματος και προβολής, και αυτόματος καθορισμός του μεγέθους της πανοραμικής εικόνας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιείται η ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή (κωδικός = 2), το οριζόντιο γωνιακό άνοιγμα ορίζεται ίσο με 360° και το τελικό μέγεθος της εικόνας (width × height σε pixel) προσδιορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα.

```
pano_modify.exe --canvas=AUTO --fov=360 --projection=2 -o project.pto
```

Δημιουργία του αρχείου σύνθεσης σε μορφότυπο *makefile*. Το *makefile* είναι ο τύπος του αρχείου που χρησιμοποιείται στην συνέχεια από το πρόγραμμα *make* για την τελική σύνθεση του πανοράματος.

```
pto2mk.exe -o project.mk -p eik_ project.pto
```

Δημιουργία του τελικού πανοράματος.

```
make.exe -f project.mk all
```

Με τρόπο ανάλογο εκείνου που παρουσιάστηκε εδώ έγινε η σύνθεση των εικόνων που ανακτήθηκαν με χρήση του *Street View API* σε ενιαία πανοράματα γωνιακού ανοίγματος 360°. Η επιλογή του λογισμικού *Hugin* για την σύνθεση των πανοραμάτων στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας στηρίχτηκε, αφενός, στο γεγονός ότι πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα το οποίο είναι ελεύθερα προσβάσιμο και, αφετέρου, στο ότι παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας πανοραμάτων με τρόπο πλήρως αυτοματοποιημένο.

3 Συνόρθωση παρατηρήσεων από πολλαπλές πανοραμικές εικόνες του Google Street View

Βασικός στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η περιγραφή της διαδικασίας που αναπτύχθηκε για την συνόρθωση πολλαπλών πανοραμικών εικόνων. Η διαδικασία αποτελείται από τα εξής βασικά στάδια:

- Προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων λήψης των εικόνων ενδιαφέροντος.
- Λήψη των πανοραμικών εικόνων τμηματικά σε προοπτικές εικόνες γωνιακού ανοίγματος 90° .
- Σύνθεση του πανοράματος από τις ληφθείσες εικόνες με χρήση του λογισμικού *Hugin*.
- Προσδιορισμός ομολογιών.
- Συνόρθωση βάσει μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την σχέση μεταξύ των πανοραμικών εικόνων.

Όπως είναι σαφές, τα τρία πρώτα στάδια έχουν περιγραφεί, τουλάχιστον μερικώς, σε προηγούμενα κεφάλαια. Ο προσδιορισμός των ομολογιών έγινε εδώ με μη αυτόματο τρόπο, και το μαθηματικό μοντέλο σύνδεσης μεταξύ πανοραμικών εικόνων περιγράφεται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Στα παραπάνω στάδια πρέπει να συνοπλογοιστεί και ο μετασχηματισμός μεταξύ των συστημάτων αναφοράς, καθώς οι συντεταγμένες των κέντρων λήψης των εικόνων δίνονται στο γήινο σύστημα αναφοράς (*Earth Centered Earth Fixed- ECEF*) *WGS84* (*World Geodetic Datum 1984*) και πρέπει να μετασχηματιστούν σε συντεταγμένες σε τοπικό σύστημα αναφοράς, όπως είναι το σύστημα *ENU* (*East North Up*). Όλα τα παραπάνω περιγράφονται λεπτομερώς στην συνέχεια, ενώ στην αρχή του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη αναφορά στη σχετική βιβλιογραφία που αφορά τον προσδιορισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων από μετρήσεις σε τουλάχιστον δύο πανοραμικές εικόνες.

3.1 Σχετική βιβλιογραφική έρευνα

Ως σχετική βιβλιογραφία μπορεί να θεωρηθεί τόσο η γενικότερη βιβλιογραφία που αφορά τον προσδιορισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων που είναι ορατά σε πολλαπλές εικόνες, με αρκετές δημοσιεύσεις στον τομέα της Όρασης Υπολογιστών και της Φωτογραμμετρίας, όσο και ορισμένες πιο εξειδικευμένες δημοσιεύσεις που αφορούν εφαρμογές για την εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας από εικόνες του *Street View*.

3.1.1 Εφαρμογές στην Όραση Υπολογιστών

Δύο από τις πρώτες εργασίες με αντικείμενο τον προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων που απεικονίζονται τουλάχιστον σε δύο πανοραμικές εικόνες δημοσιεύθηκαν από τους Kang & Szeliski (1996) και τους Shum et al. (1998). Οι πρώτοι δημιουργούν κυλινδρικές πανοραμικές εικόνες οριζόντιου γωνιακού ανοίγματος 360° με την περιστροφή μιας κάμερας περί τον κατακόρυφο άξονά της (διατηρώντας το οριζόντιο επίπεδο σταθερό), τις οποίες στην συνέχεια χρησιμοποιούν για τον προσδιορισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων που απεικονίζονται σε τουλάχιστον δύο εικόνες. Ταυτόχρονα με την παραγωγή των εικόνων γίνεται και βαθμονόμησή τους με αποτέλεσμα να μπορεί να προσδιοριστεί ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας (*Essential matrix*) με τον αλγόριθμο των 8 σημείων του Longuet Higgins (1981) για τον προσδιορισμό των σχέσεων των εικόνων ανά δύο. Στην συνέχεια του άρθρου προτείνονται και εξετάζονται δύο διαφορετικοί τρόποι για τον

προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων που είναι ορατά σε τουλάχιστον δύο εικόνες: (α) μέσω της συνόρθωσης μόνο των παρατηρήσεων των κανονικοποιημένων κυλινδρικών συντεταγμένων των ομολογων σημείων, με τις τιμές που προέκυψαν για τον πίνακα στροφής και το διάνυσμα μετάθεσης από τον δεσμευμένο επιπολικό πίνακα θεωρούμενα χωρίς σφάλμα, (β) μέσω μιας επαναληπτικής μεθόδου ταυτόχρονης συνόρθωσης των κανονικοποιημένων κυλινδρικών συντεταγμένων των ομολογων σημείων και των παραμέτρων προσανατολισμού και μετάθεσης των πανοραμικών εικόνων. Οι Shum et al. (1998) αναπτύσσουν ένα διαδραστικό σύστημα μοντελοποίησης για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων από πολλαπλές κυλινδρικές πανοραμικές εικόνες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος προσδιορισμού του πίνακα στροφής κάθε πανοράματος, σύμφωνα με τον οποίο οι στροφές των εικόνων σε σχέση με το σύστημα του χώρου προσδιορίζονται από την χρήση ευθειών γνωστών διευθύνσεων (για παράδειγμα ευθείες κτιρίων που θεωρείται εκ των προτέρων γνωστό ότι είναι οριζόντιες ή κατακόρυφες). Ο προσανατολισμός μιας κάμερας μπορεί να προσδιοριστεί αν είναι γνωστές δύο κατακόρυφες ευθείες και μια οριζόντια, ή μια κατακόρυφη και δύο οριζόντιες.

Σε ένα πιο θεωρητικό πλαίσιο, οι Torii et al. (2005) περιγράφουν τις γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ δύο και τριών σφαιρικών πανοραμικών εικόνων. Προσδιορίζουν την συνθήκη συνεπιπεδότητας που συνδέει τις σφαιρικές συντεταγμένες των ομολογων σημείων δύο πανοραμάτων, ενώ επίσης εκφράζουν τους περιορισμούς που ανακύπτουν από τον διϋισμό σημείων και μέγιστων κύκλων στην επιφάνεια της σφαίρας. Καθώς η συνθήκη συνεπιπεδότητας, όπως εκφράζεται μέσω του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα, χρησιμοποιείται σχεδόν από όλες τις ερευνητικές εργασίες που εξετάστηκαν κρίνεται σκόπιμη μια σύντομη αναφορά σε αυτήν.

Έστω τα κέντρα λήψης δύο σφαιρικών πανοραμικών εικόνων C_1 και C_2 . Θεωρείται για ευκολία, και χωρίς αυτό να επηρεάζει την γενικότητα του ισχυρισμού, ότι το σύστημα της εικόνας της πρώτης κάμερας συμπίπτει με το σύστημα αναφοράς του χώρου και άρα οι συντεταγμένες του διανύσματος $C_1 = \mathbf{0}$. Ο πίνακας στροφής \mathbf{R} και το διάνυσμα μετάθεσης \mathbf{t} ορίζουν τον προσανατολισμό και την θέση του σημείου λήψης της δεύτερης πανοραμικής εικόνας. Έστω σημείο \mathbf{P} του χώρου προβαλλόμενο στα σημεία \mathbf{p}_1 και \mathbf{p}_2 των φακών λήψης 1 και 2, αντίστοιχα. Σύμφωνα με την συνθήκη συνεπιπεδότητας, τα σημεία \mathbf{P} , \mathbf{p}_1 , C_1 , \mathbf{p}_2 και C_2 πρέπει να κείνται στο ίδιο επίπεδο. Μαθηματικά η συνθήκη μπορεί να εκφραστεί με την δήλωση ότι τα διανύσματα \mathbf{p}_2 , $\mathbf{R}\mathbf{p}_1$ και \mathbf{t} είναι συνεπίεδα μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{p}_2^T (\mathbf{t} \times \mathbf{R}\mathbf{p}_1) = \mathbf{p}_2^T \mathbf{E}\mathbf{p}_1 = 0, \text{ όπου } \mathbf{E} = [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{p}_2^T \mathbf{E} \mathbf{p}_1 = 0, \text{ όπου } \mathbf{E} = [\mathbf{t}]_{\times} \mathbf{R} \quad (3.2)$$

Ο πίνακας $[\mathbf{t}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix}$ του διανύσματος μετάθεσης \mathbf{t} χρησιμοποιείται για να εκφράσει το εξωτερικό γινόμενο $\mathbf{t} \times \mathbf{R}$. Για τον υπολογισμό του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα (Essential Matrix) \mathbf{E} απαιτούνται οι παρατηρήσεις 8 ομολογων σημείων (Longuet Higgins, 1981), ενώ έχει αναπτυχθεί από τον Nister (2004) αλγόριθμος που απαιτεί μόνο 5 σημεία – όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας του πίνακα (εκτενής αναφορά στην Αδάμ, 2011). Επειδή η Εξ. (3.1) χρησιμοποιεί μόνο την δέσμευση συνεπιπεδότητας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός των ακτίνων, η παραγοντοποίηση του πίνακα \mathbf{E} στους πίνακες \mathbf{R} και \mathbf{t} έχει 4 λύσεις. Για τις προοπτικές εικόνες η λύση δίνεται με το να ληφθεί υπόψη ότι η σωστή λύση είναι εκείνη για την οποία η τιμή για το βάθος Z των τρισδιάστατων σημείων που προκύπτουν είναι θετική. Στην περίπτωση πανοραμικών εικόνων χρησιμοποιείται ως κριτήριο το πρόσημο του εσωτερικού γινομένου $\mathbf{m}^T \mathbf{M}_C$ το οποίο πρέπει να είναι θετι-

κό (το διάνυσμα της προβολής του σημείου και το διάνυσμα της τρισδιάστατης θέσης του έχουν την ίδια διεύθυνση).

Οι Torii et al. (2009) αναπτύσσουν έναν αλγόριθμο για τον προσδιορισμό του τρισδιάστατου μοντέλου μεγάλων αστικών περιοχών, ο οποίος βασίζεται στις πανοραμικές εικόνες του Google Street View. Χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο *SURF* για την εύρεση και περιγραφή χαρακτηριστικών σημείων στις πανοραμικές εικόνες και προσδιορίζουν ένα πρώτο σύνολο ομολογιών με χρήση της βιβλιοθήκης *FLANN* για την συνταύτιση των σημείων. Η σύνδεση των εικόνων γίνεται ανά δύο με βάση και τις *a priori* γνωστές σχέσεις μεταξύ εικόνων από τον γράφο του Street View. Στην συνέχεια απαλείφουν χονδροειδή σφάλματα από τις ομολογίες με χρήση του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα, τον οποίο υπολογίζουν με εφαρμογή του αλγορίθμου των 5 σημείων του Nister (2004) και χρήση του αλγορίθμου *PROSAC*, μιας παραλλαγής του *RANSAC*. Από τους δεσμευμένους επιπολικούς πίνακες E_{ij} που προκύπτουν για κάθε ζεύγος εικόνων i και j προσδιορίζονται ο πίνακας στροφής και το διάνυσμα μετάθεσης που συνδέουν τις δύο εικόνες: $E_{ij} = [t_{ij}]_x R_{ij}$. Στην συνέχεια συνορθώνονται οι παρατηρήσεις όλων των χαρακτηριστικών σημείων που απέμειναν μετά από το φιλτράρισμα όλων των εικόνων, και προσδιορίζονται οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων καθώς και οι συνορθωμένες παράμετροι προσανατολισμού και μετάθεσης των εικόνων. Για την διόρθωση του φαινομένου της “ολίσθησης” που παρατηρείται από την διαδοχική σύνδεση των εικόνων στην διαδικασία της συνόρθωσης προστίθενται επιπλέον δεσμεύσεις βάσει της τεχνικής “κλεισίματος βρόχων” (*loop closing*), σύμφωνα με την οποία εντοπίζονται κοινές εικόνες (εικόνες που απεικονίζουν την ίδια περιοχή και προέκυψαν όταν το όχημα της Google πέρασε για δεύτερη φορά από το ίδιο σημείο για να καλύψει κάποια άλλη οδό) και προσδιορίζονται και για αυτές οι παράμετροι σύνδεσης με την συνταύτιση αυτή την φορά των τρισδιάστατων σημείων της νέας εικόνας με τα τρισδιάστατα σημεία που έχουν προκύψει από την επίλυση του μοντέλου. Τελικό αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι ένα τρισδιάστατο νέφος των χαρακτηριστικών σημείων όσο και οι τελικές θέσεις και οι τελικοί προσανατολισμοί των πανοραμάτων. Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για την εφαρμογή κάποιας τεχνικής πυκνής συνταύτισης (*dense matching*) των εικόνων.

Αντίστοιχη εφαρμογή με αυτήν ανέπτυξαν οι Pagani & Stricker (2011). Ο αλγόριθμός τους εκκινεί με τον υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού μεταξύ των δύο πρώτων εικόνων με χρήση ομολογιών σημείων, οι οποίες προσδιορίζονται με έναν αλγόριθμο στην λογική του αλγορίθμου Affine SIFT (ASIFT), και την δέσμευση της επιπολικής γεωμετρίας με τον προσδιορισμό του επιπολικού πίνακα. Παράλληλα απαλείφονται χονδροειδή σφάλματα στις ομολογίες με χρήση του αλγορίθμου *RANSAC* και, ακολούθως, προσδιορίζονται ο πίνακας στροφής και το διάνυσμα μετάθεσης από τον δεσμευμένο επιπολικό πίνακα. Στην συνέχεια ακολουθεί η εμπροσθοτομία (τριγωνισμός) των ομολογιών για την ανάκτηση των τρισδιάστατων συντεταγμένων του σημείου που προκύπτει για κάθε ομολογία (πρώτο τρισδιάστατο μοντέλο). Μετά από τον προσδιορισμό των τιμών του πρώτου ζεύγους εικόνων ακολουθούν τα εξής βήματα: (1) προσθήκη νέας εικόνας στο σετ των εικόνων, (2) εύρεση 2D-3D ομολογιών μεταξύ σημείων της νέας εικόνας και των 3D σημείων που έχουν ήδη προσδιοριστεί, (3) υπολογισμός του σχετικού προσανατολισμού (*pose*) της νέας εικόνας με χρήση των 2D-3D ομολογιών, και (4) τριγωνισμός όλων των σημείων που έχουν προκύψει μέχρι στιγμής για όλες τις εικόνες. Μετά από την εισαγωγή κάθε νέας εικόνας εφαρμόζεται συνόρθωση δέσμης για να βελτιστοποιηθούν όλες οι ομολογίες του μοντέλου.

Οι Ventura & Höllerer (2013) προτείνουν μια μεθοδολογία η οποία αρχικά προβλέπει οριζοντίωση όλων των πανοραμικών εικόνων που θα χρησιμοποιηθούν κατά την συνόρθωση με χρήση σημείων φυγής. Στην συνέχεια πραγματοποιείται συνταύτιση των εικόνων με προσδιορισμό ομολογων σημείων με τον αλγόριθμο SIFT. Στην

συνέχεια προσδιορίζεται ο σχετικός προσανατολισμός μεταξύ των επικαλυπτόμενων εικόνων με χρήση ενός απλοποιημένου δεσμευμένου επιπολικού πίνακα, καθώς αυτός βασίζεται στην θεώρηση οριζοντιωμένων πανοραμάτων. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε διάφορα σύνολα δεδομένων, ένα εκ των οποίων αποτελείται από εικόνες του *Google Street View Research Dataset* όπου οι εικόνες έχουν πολύ μεγαλύτερη χωρική πυκνότητα (πολύ μικρότερες βάσεις λήψης) σε σχέση με τα τυπικά πανοράματα του *Street View* (~1 m έναντι 10-12 m).

Οι Aly & Bouguet (2012) παρουσίασαν έναν αλγόριθμο ο οποίος δέχεται ως είσοδο ένα σύνολο μη βαθμονομημένων σφαιρικών πανοραμικών εικόνων σε τυχαία σειρά και προσδιορίζει τον σχετικό προσανατολισμό μεταξύ των εικόνων σε αυθαίρετη κλίμακα (*up to scale*). Οι εκτιμώμενες παράμετροι του σχετικού προσανατολισμού χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός χάρτη της τοποθεσίας που φωτογραφήθηκε, ο οποίος επιτρέπει την εύκολη οπτική πλοήγηση στην τοποθεσία μέσω των πανοραμάτων με τρόπο αντίστοιχο με εκείνον του *Google Street View*.

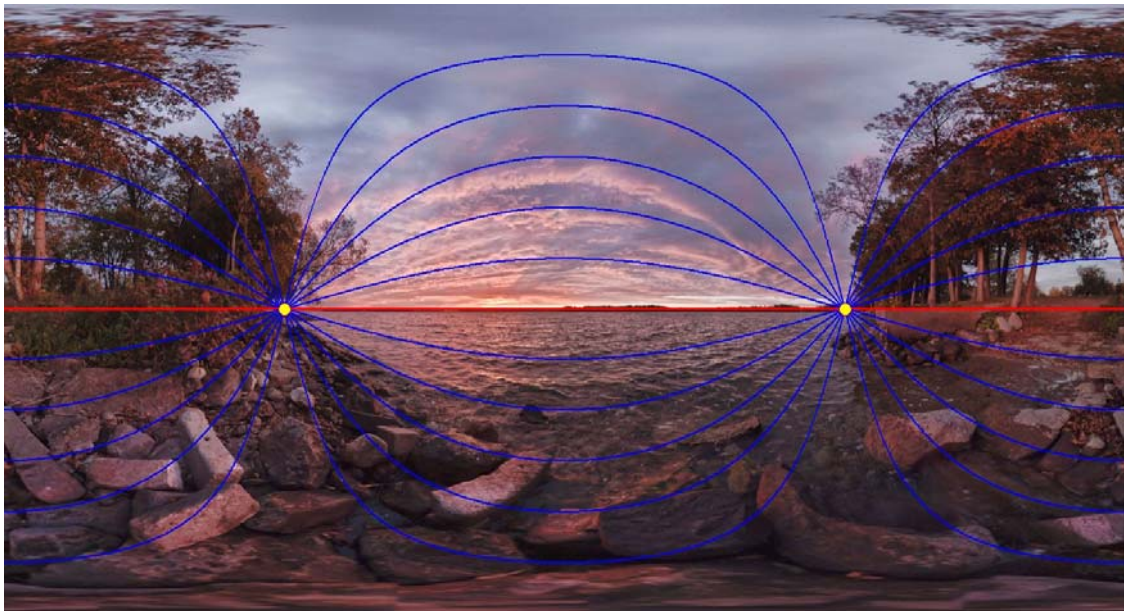
Σε μια λιγότερο σύνθετη προσέγγιση, οι Tsai & Chang (2012) αναπτύσσουν ένα λογισμικό που προσδιορίζει με εμπροσθοτομία τις τρισδιάστατες συντεταγμένες σημείων που είναι ορατά σε δύο πανοραμικές εικόνες του *Google Street View*, θεωρώντας το διάνυσμα θέσης του κέντρου λήψης και τους προσανατολισμούς των εικόνων γνωστούς και χωρίς σφάλμα. Επιπλέον, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα υπολογισμού των συντεταγμένων του σημείου λήψης του πανοράματος με την παρατήρηση στην εικόνα τριών σημείων ήδη ορισμένων στον χώρο (οπισθοτομία).

3.1.2 Φωτογραμμετρικές εφαρμογές

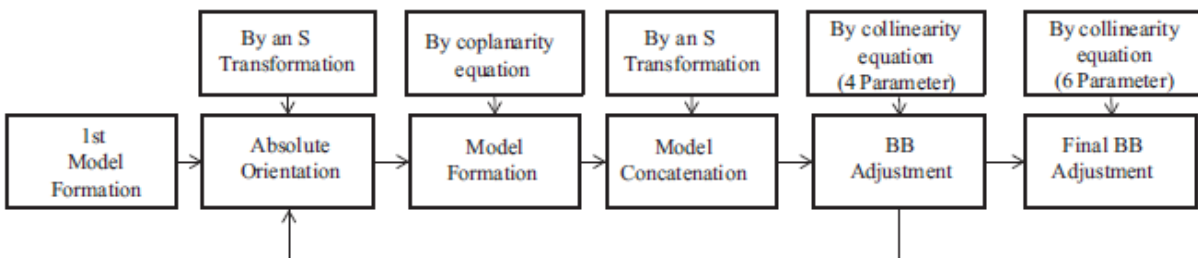
Οι Luhmann & Tecklenburg (2004) αναπτύσσουν τις εξισώσεις συγγραμμικότητας σε πανοραμικές εικόνες, στις οποίες χρησιμοποιείται η κυλινδρική προβολή, περιγράφουν βασικές έννοιες επιπολικής γεωμετρίας σε κυλινδρικές εικόνες, ενώ έχουν αναπτύξει και το πρόγραμμα *PANO* για την συνόρθωση των παρατηρήσεων και των παραμέτρων εξωτερικού προσανατολισμού (μετάθεση και στροφές) πολλαπλών πανοραμικών εικόνων (*bundle adjustment*) βάσει των εξισώσεων συγγραμμικότητας. Αντίστοιχη εργασία έχει δημοσιευτεί την ίδια περίοδο και από τους Schneider & Maas (2004), που επίσης συνορθώνουν κυλινδρικές εικόνες με χρήση των προσαρμοσμένων εξισώσεων συγγραμμικότητας, με την μικρή διαφορά ότι προσθέτουν δύο επιπλέον αγνώστους για κάθε εικόνα οι οποίοι αντισταθμίζουν τυχόν ατέλειες στον εσωτερικό προσανατολισμό της μηχανής. Επίσης, το άρθρο αυτό αναφέρεται κατά κύριο λόγο σε περιστρεφόμενες γραμμικές κάμερες (*rotating line cameras*), αλλά η διαδικασία της συνόρθωσης δέσμης μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου και σε πανοραμικές εικόνες που έχουν προκύψει από συρραφή. Σε άλλη εργασία τους, οι Schneider & Maas (2007) ενσωματώνουν παρατηρήσεις από πανοραμικές εικόνες με παρατηρήσεις από σαρωτές laser και συμβατικές προοπτικές εικόνες.

Οι Fangi & Nardinocchi (2013) αναπτύσσουν μια διαδικασία βασιζόμενη σε σφαιρικές πανοραμικές εικόνες (οι οποίες έχουν προκύψει με χρήση της ισαπέχουσας κυλινδρικής προβολής), την οποία ονομάζουν *Panoramic Spherical Photogrammetry (PSP)*. Βασικός στόχος της διαδικασίας είναι η γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων με χρήση πανοραμάτων. Η διαδικασία ξεκινά με τον σχηματισμό του μοντέλου με εφαρμογή της συνθήκης συνεπιπεδότητας για δύο πανοραμικές εικόνες, η οποία ακολουθείται από τον προσδιορισμό μετασχηματισμού ομοιότητας του πρώτου αυτού μοντέλου σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του χώρου που χρησιμοποιείται. Η συνθήκη συνεπιπεδότητας εκφράζεται συναρτήσεως μόνο τριών αγνώστων, με την θεώρηση ότι οι πανοραμικές είναι σχεδόν οριζόντιες και αγνόηση των δύο στροφών περί τους οριζόντιους άξονες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί η οριζόντια στροφή μεταξύ των συστημάτων των δύο εικόνων που εξετάζονται κάθε φο-

ρά. Η συνόρθωση δέσμης των εικόνων πραγματοποιείται με εφαρμογή της προσαρμοσμένης στις σφαιρικές εικόνες συνθήκης συγγραμμικότητας. Στις εξισώσεις της συγγραμμικότητας, αντί για πλήρη πίνακα στροφής, οι ερευνητές αφαιρούν την οριζόντια στροφή μεταξύ των δύο πανοραμικών εικόνων από την μέτρηση της στροφής και χρησιμοποιούν δύο συντελεστές για να προσεγγίσουν τις στροφές περί τους δύο άλλους άξονες, θεωρώντας ότι οι τιμές τους είναι πολύ μικρές αφού τα πανοράματα είναι οριζοντιωμένα. Οι εξισώσεις συγγραμμικότητας χρησιμοποιούνται αρχικά για την συνόρθωση εικόνων σε ζεύγη και, τέλος, για την συνόρθωση δέσμης ολόκληρου του *block*. Η διαδικασία εφαρμόζεται για την αποτύπωση μνημείου με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων να είναι της τάξης των λίγων cm. Επίσης, σε μια λίγο πιο γενική ενότητα, οι συγγραφείς εξετάζουν τον σχηματισμό των επιπολικών γραμμών μεταξύ «συνθετικών» πανοραμικών εικόνων. Ένα παράδειγμα για την διάταξη των επιπολικών γραμμών δίνει και ο Τσιρώνης (2015) – βλ. Εικ. 3.1. Τέλος, σε μεταγενέστερο άρθρο ο Fangi (2015) εξετάζει αναλυτικότερα την περίπτωση μοντέλου αποτελούμενου από τρεις πανοραμικές εικόνες.



Εικόνα 3.1: Επιπολικές γραμμές σε κυλινδρική ισαπέχουσα προβολή πανοραμικής εικόνας (Τσιρώνης, 2015)



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα Ροής της διαδικασίας PSP (Fangi & Nardinocchi, 2013)

3.2 Διαδικασία αξιοποίησης της γεωμετρικής πληροφορίας του Google Street View

Η παρούσα ενότητα είναι αφιερωμένη στην αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων από πανοραμικές εικόνες του Google Street View. Κάθε στάδιο της διαδικασίας αναπτύσσεται ξεχωριστά, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της συνόρθωσης δέσμης που εφαρμόζεται για την συνόρθωση των παρατηρήσεων.

3.2.1 Προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων λήψης των εικόνων ενδιαφέροντος

Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων που απεικονίζουν την σκηνή ενδιαφέροντος. Η διαδικασία ξεκινά με τον ορισμό ενός ζεύγους γεωδαιτικών συντεταγμένων (ϕ, λ) – ένα στίγμα στο χάρτη – από τον χρήστη. Το ζεύγος αυτό θα μπορούσε να προκύψει με τον προσεγγιστικό προσδιορισμό μιας θέσης μέσω ενός δέκτη του συστήματος GPS ή με την εύρεση των προσεγγιστικών συντεταγμένων της προς μελέτη σκηνής από έναν χάρτη (για παράδειγμα: Google Maps). Κατόπιν προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του πανοράματος με το εγγύτερο σημείο λήψης στο στίγμα που ορίζει ο χρήστης, καθώς και οι συντεταγμένες των γειτονικών του πανοραμάτων στον γράφο του Street View. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από τον χρήστη, ο οποίος δίνει ως αρχικές συντεταγμένες στον αλγόριθμο τις συντεταγμένες μιας εκ των γειτονικών πανοραμικών εικόνων που προσδιορίστηκαν προηγουμένως. Παρακάτω δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για τον αλγόριθμο που συντάχθηκε σε *Javascript* για την ανάκτηση των πανοραμάτων.

Χρησιμοποιώντας την υπηρεσία *Google Maps JavaScript API* (Ενότητα 1.4) και τις αρχικές συντεταγμένες (ϕ, λ) μπορεί να προσδιορίσει κανείς το πανόραμα εκείνο, του οποίου το κέντρο λήψης βρίσκεται εγγύτερα στο στίγμα (ϕ, λ) και σε απόσταση μικρότερη από ένα κατώφλι. Για τον προσδιορισμό του πανοράματος πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο αντικείμενο (object) *StreetViewService*, το οποίο παρέχει διεπαφή για την πρόσβαση στα δεδομένα που διατηρούνται στην υπηρεσία Google Street View³¹. Στην συνέχεια πρέπει να υποβληθεί ένα αίτημα στην υπηρεσία Street View, το οποίο αφορά στην ανάκτηση του πανοράματος που βρίσκεται εντός του κύκλου που ορίζεται από το δεδομένο ζεύγος (ϕ, λ) (*LatLng*) και ακτίνα r . Σε περίπτωση όπου στην ακτίνα βρίσκονται περισσότερα του ενός πανοράματα επιλέγεται το εγγύτερο. Το αίτημα αυτό διατυπώνεται με χρήση της συνάρτησης *getPanoramaByLocation()* στο αντικείμενο *StreetViewService*, η οποία δέχεται ως στοιχεία εισόδου το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του σημείου, την ακτίνα του κύκλου αναζήτησης και μια νέα συνάρτηση στην οποία εκχωρούνται τα δεδομένα του πανοράματος. Τα μεταδεδομένα που είναι αποθηκευμένα σε κάθε πανόραμα δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Από τα στοιχεία του Πίνακα 3.1 χρησιμοποιούνται η θέση του σημείου λήψης της πανοραμικής εικόνας (*location.LatLng*), που είναι και το τελικό ζητούμενο, και τα ID των πανοραμάτων που βρίσκονται σε γειτονικούς κόμβους με το εν λόγω πανόραμα στον γράφο του Google Street View (*links.pano*). Με χρήση των ID των γειτονικών πανοραμάτων και ένα νέο αίτημα *getPanoramaById()* στην υπηρεσία μπορούν να ανακτηθούν οι συντεταγμένες των σημείων λήψης και των γειτονικών πανοραμικών.

Ο κώδικας που υλοποιήθηκε για την ανάκτηση των συντεταγμένων των σημείων λήψης εικόνων που βρίσκονται κοντά στο σημείο επιλογής του χρήστη ανακτά τις συντεταγμένες της εγγύτερης εικόνας και των πρώτων γειτονικών της, ενώ με την ρύθμιση μιας παραμέτρου δίνει την δυνατότητα να επεκταθεί η αναζήτηση και στις εικόνες που γειτνιάζουν με τις γειτονικές κ.ο.κ.. Παρ' όλα αυτά προτείνεται, αντί της χρήσης της παραμέτρου, η

³¹ <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/streetview>

εφαρμογή του κώδικα περισσότερες φορές με το να δοθούν ως συντεταγμένες του σημείου εισόδου οι συντεταγμένες των γειτονικών σημείων στο αρχικό πανόραμα που προσδιορίστηκαν από την πρώτη εφαρμογή του αλγορίθμου.

```
    {
      "location": {
        "latLng": LatLng,
        "description": string,
        "pano": string
      },
      "copyright": string,
      "links": [{
        "heading": number,
        "description": string,
        "pano": string,
        "roadColor": string,
        "roadOpacity": number
      }],
      "tiles": {
        "worldSize": Size,
        "tileSize": Size,
        "centerHeading": number
      }
    }
```

Πίνακας 3.1: Μεταδεδομένα που είναι διαθέσιμα για κάθε πανόραμα (<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/streetview>)

Ένα αρχείο κειμένου τύπου html αποτελεί τον τελικό κώδικα προς εκτέλεση. Για την εκτέλεσή του αναπτύχθηκε μια επιπλέον συνάρτηση σε ρυθον, η οποία δέχεται τις συντεταγμένες του σημείου ενδιαφέροντος ως όρισμα από τον χρήστη και τις ενσωματώνει στο αρχείο html μέσω συναρτήσεων επεξεργασίας κειμένου. Εν συνεχεία το αρχείο html εκτελείται με χρήση του google chrome browser, και τα αποτελέσματα είτε ανακτώνται από τον browser, είτε για μεγαλύτερη αυτοματοποίηση αποθηκεύονται σε αρχείο τύπου log που χρησιμοποιεί ο google chrome browser για δοκιμές κώδικα και ανακτώνται αυτόματα από τον κώδικα της ρυθον με χρήση συναρτήσεων επεξεργασίας αρχείων κειμένου.

3.2.2 Ανάκτηση των καρτέκων κάθε πανοράματος

Τα καρτέκων κάθε πανοραμικής εικόνας ανακτώνται με χρήση του *Google Street View Image API* που έχει περιγραφεί στην ενότητα 1.3. Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής των πανοραμικών εικόνων αναπτύχθηκε η συνάρτηση *downloadImages()* σε ρυθον, η οποία δέχεται ως ορίσματα το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του σημείου λήψης της εικόνας, τον φάκελο στον οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα, και στην συνέχεια ανακτά και αποθηκεύει 10 καρτέκων της πανοραμικής οριζόντιου γωνιακού ανοίγματος ίσου με 90° και με την οριζόντια γωνία διεύθυνσης του πρώτου να ξεκινά από 0° και να αυξάνεται με βήμα 36° μέχρι την λήψη και του τελευταίου καρτέκων. Επομένως διαδοχικές εικόνες έχουν μεταξύ τους 60% επικάλυψη. Οι γωνίες pitch και roll είναι ίσες με 0° από προεπιλογή, ενώ με την ρύθμιση μιας επιπλέον προαιρετικής παραμέτρου μπορούν να ληφθούν επιπλέον γραμμές των δέκα πανοραμικών εικόνων, η κάθε μια με διαφορετικό pitch, σε περίπτωση που ζητείται η δημιουργία πανοραμάτων με κατακόρυφο γωνιακό άνοιγμα μεγαλύτερο των 90°.

3.2.3 Δημιουργία των πανοραμάτων από τα καρτέκων

Για την δημιουργία της πανοραμικής εικόνας από τα καρτέκων που έχουν ανακτηθεί χρησιμοποιείται το πρόγραμμα

Hugin και, ειδικότερα, η σειρά εντολών που παρουσιάστηκε στο παράδειγμα της ενότητας 2.1.2. Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας αναπτύχθηκε η συνάρτηση *createPanorama()* στην γλώσσα προγραμματισμού *Python*, η οποία δέχεται ως όρισμα την διεύθυνση του φακέλου στον οποίο είναι αποθηκευμένα τα καρέ, εκτελεί όλα τα στάδια της διαδικασίας δημιουργίας του πανοράματος όπως αναφέρονται στην ενότητα 2.1.2 και αποθηκεύει την τελική πανοραμική εικόνα στον αυτό φάκελο. Για την εκτέλεση των προγραμμάτων στην γραμμή εντολών των *Windows* χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη της *Python subprocess*.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η επισήμανση κάποιων βασικών θεωρήσεων που έγιναν κατά τον προγραμματισμό της συνάρτησης. Η γωνία διεύθυνσης του καρέ που είναι προσανατολισμένο προς τον Βορρά διατηρείται σταθερή κατά την συνόρθωση και ίση με το 0. Για την συνόρθωση των εικόνων χρησιμοποιείται το μοντέλο του αμιγώς περιστρεφόμενου πανοράματος (όλες οι εικόνες έχουν το ίδιο σημείο λήψης). Οι γωνίες *yaw*, *pitch* και *roll* δεν θεωρούνται σταθερές και ίσες με τις τιμές που δίνονται από την *Google Street View Image Service*, αλλά προσδιορίζονται κατά την διαδικασία της συνόρθωσης (με τις διαφορές από τις αρχικές τιμές να μην ξεπερνούν τις 0.5°). Η οριζοντίωση του πανοράματος πραγματοποιείται με τον αυτόματο προσδιορισμό κατακόρυφων ευθειών στις εικόνες και την επιβολή δεσμεύσεων στην συνόρθωση.

3.2.4 Προσδιορισμός ομολογιών

Παρ' ότι σε αρκετές από τις επιστημονικές εργασίες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.1 αναφέρεται ως μέρος του αλγορίθμου τους η αυτόματη συνταύτιση πανοραμικών εικόνων με χρήστη διαφόρων αλγορίθμων συνταύτισης χαρακτηριστικών (*SIFT*, *SURF*, *Affine-SIFT*), σε καμία από τις περιπτώσεις αυτές οι βάσεις λήψεων δεν ήταν τόσο μεγάλες όσο στην τυπική περίπτωση των πανοραμάτων του *Google Street View*. Ακόμη και εκείνοι που χρησιμοποίησαν δεδομένα του *Street View* δεν χρησιμοποίησαν τις συμβατικές λήψεις, αλλά ένα συγκεκριμένο dataset (πχ. το *Google Street View Pittsburg Experimental Dataset*) που είχε παραχωρήσει η *Google* με σκοπό την ανάπτυξη ερευνητικών εργασιών και στο οποίο η μέση βάση λήψης ήταν λίγο μικρότερη από 1 m (*Sato et al.*, 2011), σε αντίθεση με την μέση βάση λήψης των συμβατικών πανοραμικών που ξεπερνά τα 10 m. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο Dataset δεν είναι πλέον διαθέσιμο. Οι *Sato et al.* (2011) προτείνουν την επιβολή τριών σχετικά απλών νέων δεσμεύσεων στην διαδικασία του αλγορίθμου *RANSAC* που βοηθούν στην αυτόματη συνταύτιση χαρακτηριστικών μεταξύ πανοραμικών εικόνων με μεγάλη βάση λήψης. Παρ' ότι τα αποτελέσματά τους είναι ενθαρρυντικά, τα σφάλματα στην σύνδεση μεταξύ των εικόνων παραμένουν μεγάλα και οι ομολογίες που συνήθως προκύπτουν εντοπίζονται σε περιοχές με πολύ μεγάλο βάθος κοντά στα σημεία φυγής.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με χρήση των αλγορίθμων *SIFT* και *Affine SIFT* με τα αποτελέσματα να μην μπορούν να αξιοποιηθούν για την αυτόματη σύνδεση πανοραμάτων. Ο βασικός λόγος αποτυχίας των αλγορίθμων είναι οι πολύ μεγάλες βάσεις λήψεων. Για τον λόγο αυτό οι ομολογίες σημείων προσδιορίστηκαν με μη αυτόματο τρόπο, δηλαδή με τον χειροκίνητο ορισμό κάθε ομολογίας με χρήση του προγράμματος *MPT (Matlab Photogrammetric Toolbox)* των *Kalisperakis et al.* (2006). Εξάλλου, και στην βιβλιογραφία των φωτογραμμετρικών εφαρμογών με χρήση πανοραμικών εικόνων που εξετάστηκε ο προσδιορισμός των ομολογιών επίσης πραγματοποιείται με μη αυτόματο τρόπο.

3.2.5 Μετατροπή μεταξύ συστημάτων αναφοράς των κέντρων λήψης

Οι συντεταγμένες των σημείων λήψης των πανοραμικών που ανακτώνται από την υπηρεσία της *Google* είναι εκφρασμένες σε γεωδαιτικό πλάτος και μήκος (φ, λ) στο σύστημα *WGS84*. Για την αξιοποίησή τους στον αλγόριθμο συνόρθωσης δέσμευσης απαιτείται ο μετασχηματισμός τους σε καρτεσιανές συντεταγμένες κάποιου τοπι-

κού συστήματος αναφοράς. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελεί το σύστημα *East- North- Up* που περιγράφεται στην συνέχεια. Η διαδικασία μετατροπής των συντεταγμένων εκκινεί με την μετατροπή των (φ, λ, h) σε καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y, Z) στο γήινο σύστημα WGS84 και συνεχίζεται με την μετατροπή των (X, Y, Z) σε συντεταγμένες (E, N, U) με την εφαρμογή ενός πίνακα στροφής και ενός διανύσματος μετάθεσης.

3.2.5.1 Μετατροπή μεταξύ καρτεσιανών και ελλειψοειδών συντεταγμένων

Η μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων (φ, λ, h) σε καρτεσιανές πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων:

$$\begin{aligned} X &= (N + h)\cos\varphi\cos\lambda \\ Y &= (N + h)\cos\varphi\sin\lambda \\ Z &= [(1 - e^2)N + h]\sin\varphi \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου N είναι η ακτίνα καμπυλότητας της κύριας τομής που προσδιορίζεται από την Εξ. (3.4) και a, e ο μεγάλος ημιάξονας και η εκκεντρότητα του ελλειψοειδούς αναφοράς, αντίστοιχα:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} \quad (3.4)$$

Η τιμή του μεγάλου ημιάξονα a του ελλειψοειδούς του WGS84 είναι ίση με 6378137, ενώ η τιμή της εκκεντρότητας του ελλειψοειδούς προσδιορίζεται από την τιμή της επιπλάτυσης $f = 1/298.257223563$ από την σχέση $e = \sqrt{1 - (1 - f)^2}$.

Καθώς η τιμή του γεωμετρικού ύψους h από την επιφάνεια του ελλειψοειδούς δεν δίνεται από την υπηρεσία του Street View εξετάστηκαν δύο εναλλακτικά ενδεχόμενα: είτε η θεώρηση ότι το τυχόν σημείο εφάπτεται στην επιφάνεια του ελλειψοειδούς ($h = 0$) είτε ο προσδιορισμός του υψομέτρου του σημείου με χρήση της υπηρεσίας *Google Elevation API*. Οι διαφορές που προέκυψαν στις τελικές συντεταγμένες του συστήματος ENU από τις δύο μεθόδους ήταν αμελητέες και έτσι επιλέχθηκε η χρήση μηδενικής τιμής για το h .

Αντίστροφα, ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων (φ, λ, h) από τις καρτεσιανές (X, Y, Z) απαιτεί εφαρμογή μιας επαναληπτικής διαδικασίας για τον προσδιορισμό του φ (Εξ. 3.5), όπου $p = \sqrt{X^2 + Y^2}$.

$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$ $\varphi_0 = \operatorname{atan}\left(\frac{Z}{(1 - e^2)p}\right)$ $N_{i+1} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 (\sin \varphi_i)^2}}$ $h_{i+1} = \frac{p}{\cos(\varphi_i)} - N_{i+1}$ $\varphi_{i+1} = \operatorname{atan}\left(\frac{Z}{\left(1 - e^2 \frac{N_{i+1}}{N_{i+1} + h_{i+1}}\right)p}\right)$	(3.5)
--	-------

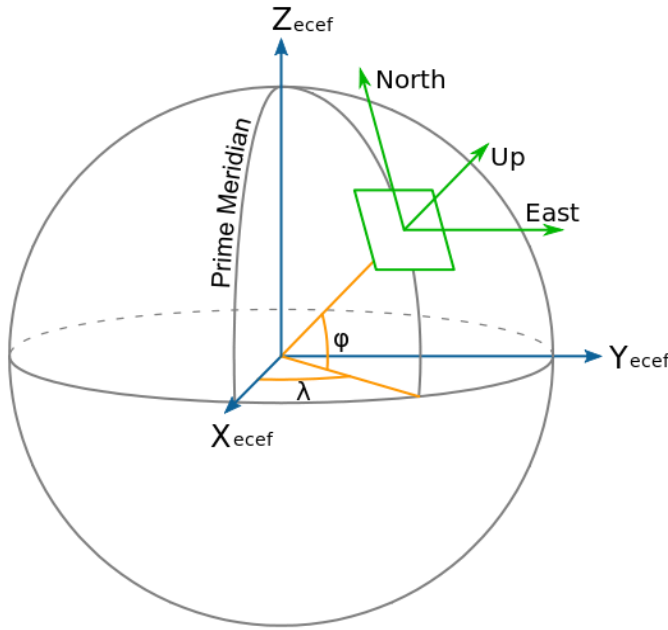
3.2.5.2 Μετατροπή γήινων συντεταγμένων σε συντεταγμένες τοπικού συστήματος East-North-Up

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες (ϕ , λ) του σημείου λήψης κάθε πανοράματος που ανακτώνται από την υπηρεσία Street View Service θα πρέπει να μετατραπούν σε καρτεσιανές συντεταγμένες ενός τοπικού συστήματος αναφοράς, στο οποίο ο ένας άξονας θα είναι κάθετος στο οριζόντιο επίπεδο στο σημείο λήψης, και οι άλλοι δύο θα κείνται επί του οριζώντιου επιπέδου με κατεύθυνση ο ένας προς Βορρά και ο άλλος προς Ανατολάς (εφόσον θεωρείται γνωστός και ο προσανατολισμός του πανοράματος).

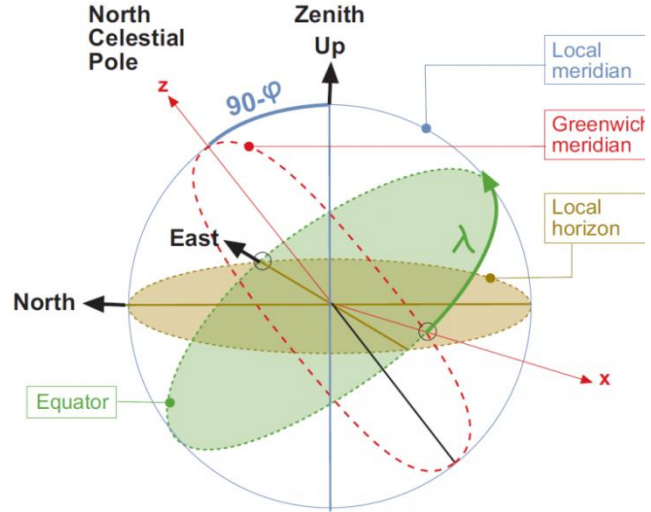
Ένα τέτοιο σύστημα αποτελεί το σύστημα *East-North-Up* (*ENU*) το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές δορυφορικής γεωδαισίας³², δορυφορικές εφαρμογές και εφαρμογές πλοήγησης (Gade, 2010, Μπούσιας-Αλεξάκης, 2013). Πρόκειται για ένα τοπικό σύστημα αναφοράς το οποίο ορίζεται από την κάθετη στο ελλειψοειδές (*Up*) (ή το σφαιροειδές) αναφοράς και δύο άξονες κείμενους επί του εφαπτόμενου στο ελλειψοειδές επιπέδου (στο σημείο τομής της κάθετης με το ελλειψοειδές), από τους οποίους ο ένας έχει διεύθυνση προς τον Βορρά (*North*) και ο άλλος προς Ανατολάς (*East*), όπως αυτό παρουσιάζεται και στην Εικ. 3.3.

Από τις Εικ. 3.3 και 3.4 παρατηρεί κανείς ότι για την μετατροπή μεταξύ ενός τοπικού συστήματος *ENU* και ενός γήινου συστήματος αναφοράς (*ECEF*), όπως το *WGS84*, απαιτείται στροφή μέτρου $\frac{\pi}{2} - \varphi$ του συστήματος *ENU* περί τον άξονα *East* ούτως ώστε ο άξονας *Up* να γίνει παράλληλος με τον άξονα *Z*, και στη συνέχεια στροφή μέτρου $\frac{\pi}{2} + \lambda$ περί τον άξονα *Up* προκειμένου ο άξονας *East* να γίνει παράλληλος με τον άξονα *X*. Οι πίνακες στροφής κατά φ και κατά λ δίνονται από τις Εξ. (3.6) και (3.7), αντίστοιχα (Subirana et al., 2011). Η Εξ. (3.8) μετατρέπει τις συντεταγμένες $[X, Y, Z]^T$ ενός γήινου συστήματος σε τοπικές συντεταγμένες $[E, N, U]^T$ χωρίς να λαμβάνει υπόψη το διάνυσμα μετάθεσης μεταξύ των δύο συστημάτων, ενώ ο πίνακας στροφής μεταξύ των δύο συστημάτων προκύπτει από τους πίνακες των Εξ. (3.6) και (3.7) και δίνεται στην Εξ. (3.9).

³²Για παράδειγμα, περιγράφεται από τον Seeber (2003) (σσ. 24-25) και τους Φωτίου & Πικριδάς (2006)



Εικόνα 3.3: Το σύστημα Συντεταγμένων ως προς ένα Earth Centered Earth Fixed (ECEF) σύστημα αναφοράς (http://en.wikipedia.org/wiki/File:ECEF_ENU_Longitude_Latitude_relationships.svg)



Εικόνα 3.4: Στροφές μεταξύ των συστημάτων ECEF και ENU. (Πηγή: Subirana et al., 2011)

$$R_1\left[\frac{\pi}{2} - \varphi\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \\ 0 & -\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$R_3\left[\frac{\pi}{2} + \lambda\right] = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = R_1\left[\frac{\pi}{2} - \varphi\right]R_3\left[\frac{\pi}{2} + \lambda\right] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1\left[\frac{\pi}{2} - \varphi\right]\mathbf{R}_3\left[\frac{\pi}{2} + \lambda\right] = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda\sin\varphi & -\sin\lambda\sin\varphi & \cos\varphi \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Στην συνέχεια αρκεί ο ορισμός του πρώτου σημείου ως αρχής των αξόνων του συστήματος, και οι συντεταγμένες όλων των υπόλοιπων σημείων θα προκύπτουν από εφαρμογή του πίνακα στροφής \mathbf{R} του αρχικού σημείου και στην συνέχεια αφαίρεση των αρχικών συντεταγμένων (ENU) του αρχικού σημείου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των πινάκων στροφής (Εξ. 3.10) μπορούν εύκολα να υπολογιστούν και οι αντίστροφες σχέσεις για τον προσδιορισμό του πίνακα στροφής που μετασχηματίζει τις συντεταγμένες (E,N,U)

σε (X,Y,Z) (Εξ. 3.11 και 3.12) [Subirana et al., 2011].

$$\mathbf{R}_i^{-1}(\theta) = \mathbf{R}_i(-\theta) = \mathbf{R}_i^T(\theta) \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_3[-(\pi/2 + \lambda)]\mathbf{R}_1[-(\pi/2 - \varphi)] \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{R}_3[-(\pi/2 + \lambda)]\mathbf{R}_1[-(\pi/2 - \varphi)] = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & -\cos\lambda\sin\varphi & \cos\lambda\cos\varphi \\ \cos\lambda & -\sin\lambda\sin\varphi & \sin\lambda\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Για τους μετασχηματισμούς από (φ, λ) σε (E, N, U) και το αντίστροφο αναπτύχθηκαν κατάλληλες εξισώσεις σε ρυθμό.

3.2.6 Περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της συνόρθωσης

Επόμενο και τελικό στάδιο της διαδικασίας αποτελεί ο προσδιορισμός των τρισδιάστατων συντεταγμένων κάθε ομολογίας. Ο απλούστερος τρόπος για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων, εφόσον είναι ήδη γνωστές οι συντεταγμένες των σημείων λήψης και οι προσανατολισμοί των εικόνων του Street View, είναι η εφαρμογή της κλασικής στην γεωδαισία μεθόδου της εμπροσθοτομίας.

Έστω δύο πανοραμικές εικόνες A, B σε ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή. Έστω ακόμα ότι είναι γνωστές οι συντεταγμένες των δύο κέντρων λήψης A και B : (X_A, Y_A, Z_A) και (X_B, Y_B, Z_B) , αντίστοιχα, και έχουν επίσης προσδιοριστεί από μετρήσεις στις εικόνες η γωνία διεύθυνσης $(Az_{A\Sigma}, Az_{B\Sigma})$ και οι γωνίες ύψους $(\nu_{A\Sigma}, \nu_{B\Sigma})$ που σχηματίζονται μεταξύ του παρατηρούμενου σημείου Σ και του σημείου λήψης των πανοραμικών A και B , αντίστοιχα (Εικ. 3.5). Από την επίλυση της εμπροσθοτομίας για το τρίγωνο $AB\Sigma$ προκύπτουν οι συντεταγμένες του σημείου Σ :

$$X_\Sigma = \frac{X_B * \tan(Az_{A\Sigma}) + X_A * \tan(Az_{B\Sigma}) - (Y_A - Y_B) * \tan(Az_{A\Sigma}) * \tan(Az_{B\Sigma})}{\tan(Az_{B\Sigma}) - \tan(Az_{A\Sigma})} \quad (3.13)$$

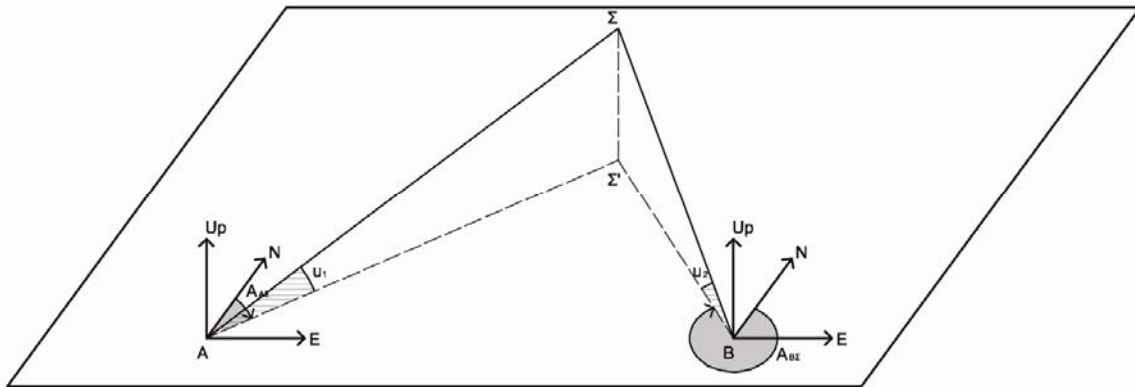
$$Y_\Sigma = \frac{X_\Sigma - X_B}{\tan(Az_{B\Sigma})} + Y_B \quad (3.14)$$

$$Z_\Sigma = D_{A\Sigma} * \tan(\nu_{A\Sigma}) \quad (3.15)$$

$$Z_\Sigma' = D_{B\Sigma} * \tan(\nu_{B\Sigma}) \quad (3.16)$$

Οι τιμές των γωνιών προκύπτουν από την παρατήρηση των εικονοσυντεταγμένων των προβολών του σημείου Σ στις πανοραμικές εικόνες A και B , οι οποίες συνδέονται με τις γωνίες μέσω των απλών σχέσεων $x_{A\Sigma} = \frac{1}{\delta} A_{A\Sigma}$ και $y_{A\Sigma} = \frac{1}{\delta} \nu_{A\Sigma}$, όπου για πανοραμική εικόνα οριζόντιου γωνιακού ανοίγματος 2π και οριζόντιας διάστασης W εικονοψηφίδων είναι $\delta = \frac{2\pi}{W}$ (για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. Ενότητα 2.6.1.2). Από την διαφορά των δύο τιμών Z_Σ και Z_Σ' του υψομέτρου του σημείου Σ , που προκύπτουν ανάλογα με το σημείο λήψης από το οποίο υ-

πολογίζεται το ύψος του σημείου, μπορεί να προσδιοριστεί η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο σημείων λήψης (η οποία δεν είναι γνωστή από τα μεταδεδομένα της Google).



Εικόνα 3.5: Εμπροσθοτομία

Έστω τώρα ότι εξετάζεται η περίπτωση τριών διαδοχικών πανοραμικών εικόνων του Google Street View. Μετά από μια σειρά δοκιμών σε τριάδες εικόνων σε διαφορετικές σκηνές του Street View διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα των τρισδιάστατων συντεταγμένων που προκύπτουν από δύο διαδοχικά ζεύγη πανοραμικών για τα ίδια σημεία παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Πιθανή αιτία αποτελεί ο όχι και τόσο υψηλής ακριβείας προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων λήψης από τα συστήματα GPS που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και μια σειρά από άλλα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις.

Μια πιο συνεπής αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού θα ήταν η συνόρθωση όλων των παρατηρήσεων και των κέντρων λήψης των πανοραμικών εικόνων με ταυτόχρονο προσδιορισμό διορθώσεων των συντεταγμένων των κέντρων λήψης. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση συνόρθωσης δύο πανοραμικών εικόνων και στην συνέχεια η μέθοδος γενικεύεται για N πανοραμικές εικόνες.

3.2.7 Συνόρθωση δύο πανοραμικών εικόνων

3.2.7.1 Εξισώσεις παρατήρησης

Έστω οι δύο πανοραμικές εικόνες A και B που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Οι σχέσεις μεταξύ των συντεταγμένων των σημείων λήψης, του σημείου σκόπευσης Σ και των παρατηρούμενων γωνιών δίνονται από τις Εξ. (3.17-3.18) για την εικόνα A και (3.19-3.20) για την εικόνα B , όπου οι παρατηρούμενες γωνίες είναι εκφρασμένες σε παρατηρούμενες εικονοψηφίδες. Ουσιαστικά πρόκειται για τις εξισώσεις συγγραμμικότητας προσαρμοσμένες σε σφαιρικές πανοραμικές εικόνες.

Οι συντεταγμένες του σημείου A θεωρούνται χωρίς σφάλμα και ορίζουν την θέση του μοντέλου, ενώ η τετμημένη X_B διατηρείται σταθερή και σε συνδυασμό με την X_A πορίζουν την κλίμακα του μοντέλου. Προκειμένου οι τετμημένες X_A και X_B να ορίζουν την κλίμακα του μοντέλου απαιτείται η εφαρμογή ακόμη μιας στροφής στο σύστημα αναφοράς ENU περί τον άξονα Up ώστε ο άξονας East να συμπέσει με την διεύθυνση του διανύσμα-

τος \overrightarrow{AB} .

$$\frac{X - X_A}{Y - Y_A} = \tan Az_{A\Sigma} = \tan(x_1 \delta) \rightarrow f_{1i}: x_1 = \frac{1}{\delta} \arctan\left(\frac{X - X_A}{Y - Y_A}\right) \quad (3.17)$$

$$Z = \sqrt{(X - X_A)^2 + (Y - Y_A)^2} \cdot \tan(y_1 \delta) \rightarrow y_1 = \frac{1}{\delta} \arctan\left(\frac{Z}{\sqrt{(X - X_A)^2 + (Y - Y_A)^2}}\right) \quad (3.18)$$

$$\frac{X - X_B}{Y - Y_B - B_Y} = \tan Az_{B\Sigma} = \tan(x_2 \delta) \rightarrow x_2 = \frac{1}{\delta} \arctan\left(\frac{X - X_B}{Y - Y_B - B_Y}\right) \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} Z + B_Z &= \sqrt{(X - X_B)^2 + (Y - Y_B - B_Y)^2} \cdot \tan(y_2 \delta) \rightarrow \\ &\rightarrow y_2 = \frac{1}{\delta} \arctan\left(\frac{Z + B_Z}{\sqrt{(X - X_B)^2 + (Y - Y_B - B_Y)^2}}\right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.2.7.2 Επίλυση του συστήματος

Για n παρατηρούμενες ομολογίες σημείων το διάνυσμα x των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων και το διάνυσμα l των παρατηρήσεων δίνονται από τις Εξ. (3.21) και (3.22), όπου για x_{ji} ο δείκτης j αφορά τον αριθμό της πανοραμικής εικόνας (1 ή 2) και ο δείκτης i τον αριθμό του σημείου σκόπευσης 1... n .

$$x = [X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, \dots, X_n, Y_n, Z_n, B_Y, B_Z]^T \quad (3.21)$$

$$l = [x_{11}, y_{11}, x_{21}, y_{21}, x_{12}, y_{12}, x_{22}, y_{22}, \dots, x_{1n}, y_{1n}, x_{2n}, y_{2n}]^T \quad (3.22)$$

3.2.7.3 Παρατηρήσεις - Άγνωστες Καθοριστικές Παράμετροι - Βαθμός Ελευθερίας

Για κάθε ζεύγος ομόλογων σημείων μετρημένο στις εικόνες 1, 2 με αντίστοιχες οριζόντιες συντεταγμένες των σημείων λήψης (X_A, Y_A) και (X_B, Y_B) προστίθενται στο σύστημα τέσσερις εξισώσεις παρατήρησης. Οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι του μοντέλου είναι οι συντεταγμένες του κάθε σημείου σκόπευσης (X_i, Y_i, Z_i) καθώς και οι διορθώσεις στις συντεταγμένες Y_B και Z_B του σημείου λήψης της πανοραμικής εικόνας 2. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων είναι $m = 3 * n + 2$, όπου n είναι ο συνολικός αριθμός των σημείων σκόπευσης στις δύο εικόνες, ενώ ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων είναι $n = 4 * n$. Ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος είναι $r = n - m = n - 2$. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι προκειμένου να έχει λύση το σύστημα εξισώσεων απαιτείται η παρατήρηση τουλάχιστον δύο ομόλογων σημείων στα δύο πανοράματα.

3.2.7.4 Κατασκευή του πίνακα σχεδιασμού A

Οι εξισώσεις παρατήρησης που δόθηκαν στην ενότητα 3.2.7.1 είναι μη γραμμικές ως προς τις άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους. Επομένως απαιτείται γραμμικοποίηση των εξισώσεων κατά Taylor για την επίλυση του μη γραμμικού συστήματος με την μέθοδο των Εμμέσων Παρατηρήσεων. Ο πίνακας Σχεδιασμού A έχει την μορφή:

$$A = \begin{bmatrix}
\frac{\partial f_{11}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{11}^o}{\partial Y_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial f_{21}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{21}^o}{\partial Y_1} & \frac{\partial f_{21}^o}{\partial Z_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial f_{31}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{31}^o}{\partial Y_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{31}^o}{\partial B_Y} & 0 & 0 \\
\frac{\partial f_{41}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{41}^o}{\partial Y_1} & \frac{\partial f_{41}^o}{\partial Z_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{41}^o}{\partial B_Y} & \frac{\partial f_{41}^o}{\partial B_Z} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{12}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{12}^o}{\partial Y_2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{22}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{22}^o}{\partial Y_2} & \frac{\partial f_{22}^o}{\partial Z_2} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{32}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{32}^o}{\partial Y_2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{32}^o}{\partial B_Y} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{42}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{42}^o}{\partial Y_2} & \frac{\partial f_{42}^o}{\partial Z_2} & \dots & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{42}^o}{\partial B_Y} & \frac{\partial f_{42}^o}{\partial B_Z} & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{1v}^o}{\partial X_v} & \frac{\partial f_{1v}^o}{\partial Y_v} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{2v}^o}{\partial X_v} & \frac{\partial f_{2v}^o}{\partial Y_v} & \frac{\partial f_{2v}^o}{\partial Z_v} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{3v}^o}{\partial X_v} & \frac{\partial f_{3v}^o}{\partial Y_v} & 0 & \frac{\partial f_{3v}^o}{\partial B_Y} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{4v}^o}{\partial X_v} & \frac{\partial f_{4v}^o}{\partial Y_v} & \frac{\partial f_{4v}^o}{\partial Z_v} & \frac{\partial f_{4v}^o}{\partial B_Y} & \frac{\partial f_{4v}^o}{\partial B_Z} & 0
\end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Οι προσωρινές συντεταγμένες των ομόλογων σημείων προσδιορίζονται από τις Εξ. (3.13)-(3.14) και (3.15) ή (3.16), η προσωρινή τιμή του B_Y λαμβάνεται ίση με 0 και η προσωρινή τιμή του B_Z προκύπτει από την διαφορά των σχέσεων (3.15) και (3.16).

3.2.8 Συνόρθωση πολλαπλών πανοραμικών εικόνων

Στην περίπτωση συνόρθωσης περισσότερων των δύο πανοραμικών εικόνων (πολυεικονική συνόρθωση δέσμης) πέρα από τις διορθωτικές παραμέτρους B_Y και B_Z προστίθεται ακόμη μια διορθωτική παράμετρος B_X για κάθε νέα εικόνα, η οποία μεταβάλλει το εκάστοτε μήκος της βάσης των εικόνων (κλίμακα του μοντέλου). Προκειμένου να δώσει κανείς κλίμακα στο μοντέλο χρησιμοποιώντας την μεγαλύτερη δυνατή απόσταση, η τετμημένη X των κέντρων λήψης της πρώτης και της τελευταίας πανοραμικής εικόνας του μοντέλου θεωρούνται γνωστές χωρίς σφάλμα.

Επομένως στην γενική περίπτωση συνόρθωσης n πανοραμικών εικόνων με παρατηρήσεις σε m σημεία σκόπευσης οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι του μοντέλου είναι οι συντεταγμένες X_i, Y_i, Z_i ($i = 1 \dots m$) των m σημείων σκόπευσης και οι διορθωτικές παράμετροι B_{xj}, B_{yj}, B_{zj} με $j = 2 \dots n - 1$ των $(n - 2)$ εικόνων (δηλαδή όλων των εικόνων πλην της πρώτης και της τελευταίας), καθώς και οι διορθωτικές παράμετροι B_{yn} και B_{zn} της τελευταίας εικόνας.

Οι εξισώσεις παρατήρησης για τυχαίο σημείο σκόπευσης i ($i = 1 \dots m$) από σημείο λήψης j ($j = 2 \dots n - 1$) δίνονται από τις γενικές σχέσεις:

$$x_{ji} = f_{ji1}(X_i, Y_i, Bx_j, By_j) = \frac{1}{\delta_j} \tan\left(\frac{X_i - X_j - Bx_j}{Y_i - Y_j - By_j}\right) \quad (3.24)$$

$$y_{ji} = f_{ji2}(X_i, Y_i, Z_i, Bx_j, By_j, Bz_j) = \frac{1}{\delta_j} \arctan\left(\frac{Z_i + Bz_j}{\sqrt{(X_i - X_j - Bx_j)^2 + (Y_i - Y_j - By_j)^2}}\right) \quad (3.25)$$

ενώ για τις περιπτώσεις των σημείων λήψης 1 και n οι εξισώσεις δίνονται από τις Εξ. (3.26-3.27) και (3.28-3.29), αντίστοιχα:

$$x_{1i} = f_{1i1}(X_i, Y_i) = \frac{1}{\delta_1} \tan\left(\frac{X_i - X_1}{Y_i - Y_1}\right) \quad (3.26)$$

$$y_{1i} = f_{1i2}(X_i, Y_i, Z_i) = \frac{1}{\delta_1} \arctan\left(\frac{Z_i}{\sqrt{(X_i - X_1)^2 + (Y_i - Y_1)^2}}\right) \quad (3.27)$$

$$x_{ni} = f_{ni1}(X_i, Y_i, By_n) = \frac{1}{\delta_n} \tan\left(\frac{X_i - X_n}{Y_i - Y_n - By_n}\right) \quad (3.28)$$

$$y_{ni} = f_{ni2}(X_i, Y_i, Z_i, By_n, Bz_n) = \frac{1}{\delta_n} \arctan\left(\frac{Z_i + Bz_n}{\sqrt{(X_i - X_n)^2 + (Y_i - Y_n - By_n)^2}}\right) \quad (3.29)$$

Είναι προφανές ότι οι εξισώσεις παρατήρησης κάθε σημείου σκόπευσης i συμμετέχουν στην συνόρθωση υπό την προϋπόθεση ότι το σημείο έχει παρατηρηθεί σε τουλάχιστον δύο πανοραμικές εικόνες. Ακολουθώντας κανείς την ίδια διαδικασία με την περίπτωση συνόρθωσης δύο πανοραμάτων, γραμμικοποιεί τις εξισώσεις κατά Taylor και καταλήγει σε ένα σύστημα της μορφής:

$$A\delta x + \delta l = 0 \quad (3.30)$$

$$\text{όπου: } \delta l = l - l^o \text{ και } \delta x = \hat{x} - x^o \quad (3.31)$$

και το διάνυσμα των αγνωστων καθοριστικών παραμέτρων είναι της μορφής:

$$\hat{x} = [\widehat{X}_1, \widehat{Y}_1, \widehat{Z}_1, \dots, \widehat{X}_m, \widehat{Y}_m, \widehat{Z}_m, \Delta\widehat{X}_2, \Delta\widehat{Y}_2, \Delta\widehat{Z}_2, \dots, \Delta\widehat{X}_{n-1}, \Delta\widehat{Y}_{n-1}, \Delta\widehat{Z}_{n-1}, \Delta\widehat{Y}_n, \Delta\widehat{Z}_n]^T \quad (3.32)$$

ενώ το διάνυσμα των παρατηρήσεων είναι της μορφής:

$$\delta l = [x_{11}, y_{11}, x_{21}, y_{21}, \dots, x_{12}, y_{12}, x_{22}, y_{22}, \dots, x_{hn}, y_{hn}, x_{h+1,n}, y_{h+1,n}, \dots, x_{mn}, y_{mn}]^T \quad (3.33)$$

Ο δείκτης h αντιπροσωπεύει το σημείο με τον μικρότερο δείκτη που απεικονίζεται στην πανοραμική n . Η σύμβαση που χρησιμοποιήθηκε για να σχηματιστεί το διάνυσμα των παρατηρήσεων δl προδιαγράφει ότι προηγούνται τα στοιχεία της εικόνας 1 τοποθετημένα σε αύξουσα σειρά, ακολουθούν τα στοιχεία της εικόνας 2 σε

αύξουσα σειρά και ούτω καθεξής.

Ο πίνακας σχεδιασμού A του συστήματος είναι ο Ιακωβιανός πίνακας της διανυσματικής συνάρτησης f με συνιστώσες f_{ij1}, f_{ij2} i, j που αντιστοιχούν στα στοιχεία του διανύσματος των παρατηρήσεων \mathbf{dl} όπως αυτές δίνονται από τις Εξ. (3.24-3.29):

$A =$

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial f_{111}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{111}^o}{\partial Y_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial f_{112}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{112}^o}{\partial Y_1} & \frac{\partial f_{112}^o}{\partial Z_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{121}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{121}^o}{\partial Y_2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{122}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{122}^o}{\partial Y_2} & \frac{\partial f_{122}^o}{\partial Z_2} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial f_{211}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{211}^o}{\partial Y_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial f_{211}^o}{\partial B_{X2}} & \frac{\partial f_{211}^o}{\partial B_{Y2}} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\partial f_{212}^o}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{212}^o}{\partial Y_1} & \frac{\partial f_{212}^o}{\partial Z_1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial f_{212}^o}{\partial B_{X2}} & \frac{\partial f_{212}^o}{\partial B_{Y2}} & \frac{\partial f_{212}^o}{\partial B_{Z2}} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{221}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{221}^o}{\partial Y_2} & 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial f_{221}^o}{\partial B_{X2}} & \frac{\partial f_{221}^o}{\partial B_{Y2}} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{222}^o}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{222}^o}{\partial Y_2} & \frac{\partial f_{222}^o}{\partial Z_2} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial f_{222}^o}{\partial B_{X2}} & \frac{\partial f_{222}^o}{\partial B_{Y2}} & \frac{\partial f_{222}^o}{\partial B_{Z2}} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n-1,m,1}^o}{\partial X_m} & \frac{\partial f_{n-1,m,1}^o}{\partial Y_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n-1,m,1}^o}{\partial B_{X_{n-1}}} & \frac{\partial f_{n-1,m,1}^o}{\partial B_{Y_{n-1}}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n-1,m,2}^o}{\partial X_m} & \frac{\partial f_{n-1,m,2}^o}{\partial Y_m} & \frac{\partial f_{n-1,m,2}^o}{\partial Z_m} & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n-1,m,2}^o}{\partial B_{X_{n-1}}} & \frac{\partial f_{n-1,m,2}^o}{\partial B_{Y_{n-1}}} & \frac{\partial f_{n-1,m,2}^o}{\partial B_{Z_{n-1}}} & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n,m,1}^o}{\partial X_m} & \frac{\partial f_{n,m,1}^o}{\partial Y_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{n,m,1}^o}{\partial B_{Y_n}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n,m,2}^o}{\partial X_m} & \frac{\partial f_{n,m,2}^o}{\partial Y_m} & \frac{\partial f_{n,m,2}^o}{\partial Z_m} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{n,m,2}^o}{\partial B_{Y_n}} & \frac{\partial f_{n,m,2}^o}{\partial B_{Z_n}}
 \end{bmatrix} \quad 3.34$$

3.2.8.1 Εύρεση προσωρινών τιμών

Ως προσωρινές τιμές για τις συντεταγμένες X_j, Y_j, Z_j των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες που λαμβάνονται από το *Google Street View Service*. Οι προσωρινές συντεταγμένες για τα σημεία σκόπευσης $X_\Sigma, Y_\Sigma, Z_\Sigma$ προκύπτουν από την επίλυση εμπροσθοτομίας με σημεία λήψης τα σημεία λήψης δύο εκ των πανοραμικών εικόνων από τις οποίες υπάρχει μέτρηση προς το σημείο (συγκεκριμένα, στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε εδώ χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες των πανοραμάτων με το μικρότερο και το δεύτερο μικρότερο ID). Οι αρχικές τιμές των διορθώσεων B_{Xj}, B_{Yj} λαμβάνονται ίσες με 0, ενώ η τιμή της υψομετρικής διαφοράς B_{Zj} προκύπτει από την διαφορά των Εξ. (3.15) και (3.16). Στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε λαμβάνεται ως προσεγγιστική τιμή του Z_Σ η τιμή που προκύπτει από το σημείο A (Εξ. 3.15).

3.2.8.2 Επίλυση της συνόρθωσης- Σφάλματα

Το διάνυσμα των διορθώσεων των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων δx υπολογίζεται από την Εξ. (3.45). Στις περιπτώσεις γραμμικοποιημένων συστημάτων όπως αυτή που εξετάζεται απαιτείται η επανάληψη της συνόρθωσης με χρήση ως προσωρινών τιμών των καλύτερων τιμών που προέκυψαν από την προηγούμενη λύση,

έως ότου όλες οι τιμές των στοιχείων του διανύσματος δx γίνουν μικρότερες από ένα κατώφλι (δηλαδή όταν το σύστημα συγκλίνει στην τελική λύση):

$$\delta x = (A^T A)^{-1} A^T \delta l \quad (3.45)$$

$$\hat{x} = x^o + \delta x \quad (3.46)$$

Ο a priori πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του διανύσματος των καλύτερων τιμών προκύπτει από την Εξ. (3.47), όπου σ_o^2 η a priori μεταβλητότητα της μονάδας βάρους:

$$V_x = \sigma_o^2 (A^T A)^{-1} = \sigma_o^2 N^{-1} \quad (3.47)$$

Ο a posteriori πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του διανύσματος των καλύτερων τιμών προκύπτει από την Εξ. (3.48), όπου $\hat{\sigma}_o^2$ είναι η a posteriori μεταβλητότητα της μονάδας βάρους που υπολογίζεται από την Εξ. (3.49). Στην Εξ. (3.49) το v συμβολίζει το διάνυσμα των υπολοίπων των παρατηρήσεων Εξ. (3.50) και r είναι ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος:

$$V_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_o^2 (A^T A)^{-1} = \hat{\sigma}_o^2 N^{-1} \quad (3.48)$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{v^T v}{r} \quad (3.49)$$

$$v = \hat{l} - l \quad (3.50)$$

Ο βαθμός ελευθερίας του μοντέλου προσδιορίζεται από τον συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων (από όλες τις εικόνες προς όλα τα σημεία που σκοπεύτηκαν σε κάθε εικόνα) και τον αριθμό των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων που προκύπτει από το πλήθος των σημείων σκόπευσης και τον συνολικό αριθμό των εικόνων. Αν ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων είναι *obs* (συμπεριλαμβάνονται τόσο οι σκοπεύσεις κατά x όσο και κατά y), το πλήθος των σημείων που σκοπεύθηκαν είναι *m* και ο αριθμός των πανοραμικών εικόνων είναι *n*, ο βαθμός ελευθερίας προκύπτει ως:

$$r = obs - (3m + 3(n - 2) + 2) \quad (3.51)$$

3.2.8.3 Περιγραφή του αλγορίθμου συνόρθωσης

Η παραπάνω διαδικασία συνόρθωσης υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού python. Η βασική συνάρτηση *intersection_npoints()* δέχεται ως ορίσματα τρία αρχεία κειμένου (txt): ένα αρχείο που περιλαμβάνει τις παρατηρήσεις, ένα αρχείο με τις συντεταγμένες των σημείων λήψης των εικόνων και, τέλος, ένα αρχείο με τις διαστάσεις των εικόνων σε pixel. Το αρχείο των παρατηρήσεων έχει την μορφή:

```
Point ID, Image ID, x, y
```

όπου οι συντεταγμένες x,y είναι εκφρασμένες ως προς την επάνω αριστερή γωνία της εικόνας (ο αλγόριθμος τις μετασχηματίζει στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων – βλ. ενότητα 2.1.1.1). Το αρχείο των συντεταγμένων των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων έχει την μορφή:

```
Image ID, X, Y, Z
```

όπου το σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z αναφέρεται στο σύστημα ENU το οποίο έχει στραφεί κατά γωνία ϕ περί τον άξονα U_r ώστε ο άξονας East να συμπίπτει με την διεύθυνση της μεγαλύτερης βάσης λήψης. Το αρχείο των διαστάσεων των εικόνων έχει την μορφή:

Image ID, x shape (pixel), y shape (pixel)

Από τα τρία αυτά αρχεία εισόδου, και με κατάλληλους μετασχηματισμούς, ο αλγόριθμος δημιουργεί το διάνυσμα των παρατηρήσεων, το διάνυσμα των προσωρινών τιμών των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων, τον πίνακα σχεδιασμού \mathbf{A} και το διάνυσμα των προσωρινών τιμών των παρατηρήσεων, και επιλύει την συνόρθωση. Οι κωδικοί των σημείων χρησιμοποιούνται κατά την δημιουργία καθενός από τους παραπάνω πίνακες και διανύσματα.

Μετά από την σύγκλιση της συνάρτησης αφαιρούνται οι παρατηρήσεις των οποίων το τυπικό σφάλμα ξεπερνά το κατώφλι του $2.326 \times \widehat{\sigma}_0$ (99% επίπεδο εμπιστοσύνης) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τις παρατηρήσεις που απέμειναν. Με κατάλληλο έλεγχο αφαιρούνται από το διάνυσμα \hat{x} που προκύπτει από την συνόρθωση οι παράμετροι οι αναφερόμενες σε παρατηρήσεις που έχουν απορριφθεί όταν έχει απομείνει μόνο μια παρατήρηση που αφορά το συγκεκριμένο σημείο (δηλαδή δεν υπάρχει πλέον ομόλογο).

3.2.9 Εναλλακτικά μοντέλα συνόρθωσης

Το μοντέλο που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.8 είναι και το βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, προφανώς υπάρχουν και άλλοι εναλλακτικοί τρόποι για την συνόρθωση των παρατηρήσεων.

Σε ένα απλουστευμένο μοντέλο συνόρθωσης θα μπορούσαν να απαλειφθούν εντελώς οι παράμετροι Bx_j, By_j από τις Εξ. (3.24) και (3.25), και από την συνόρθωση να προσδιορίζονται μόνο οι βέλτιστες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων λήψης και οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των ομόλογων σημείων. Το εν λόγω μοντέλο υλοποιήθηκε και ορισμένα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Εναλλακτικά, σε ένα πιο γενικευμένο μοντέλο συνόρθωσης θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στις εξισώσεις παρατήρησης και παράμετροι στροφής κάθε πανοραμικής σε σχέση με την αρχική εικόνα. Σε μια τέτοια περίπτωση οι Εξ. (3.24) και (3.25) θα έπαιρναν την πιο γενική μορφή των εξισώσεων:

$$x_{ji} = f_{ji1}(X_i, Y_i, Bx_j, By_j) = \frac{1}{\delta_j} \tan\left(\frac{r_{11}(X_i - X_j - Bx_j) + r_{12}(Y_i - Y_j - By_j) + r_{13}(Z_i + Bz_j)}{r_{21}(X_i - X_j - Bx_j) + r_{22}(Y_i - Y_j - By_j) + r_{23}(Z_i + Bz_j)}\right) \quad (3.52)$$

$$y_{ji} = f_{ji2}(X_i, Y_i, Z_i, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, Bx_j, By_j, Bz_j) = \frac{1}{\delta_j} \arctan\left(\frac{r_{31}(X_i - X_j - Bx_j) + r_{32}(Y_i - Y_j - By_j) + r_{33}(Z_i + Bz_j)}{\sqrt{[r_{11}(X_i - X_j - Bx_j) + r_{12}(Y_i - Y_j - By_j) + r_{13}(Z_i + Bz_j)]^2 + [r_{21}(X_i - X_j - Bx_j) + r_{22}(Y_i - Y_j - By_j) + r_{23}(Z_i + Bz_j)]^2}}\right) \quad (3.53)$$

όπου $\omega_j, \varphi_j, \kappa_j$ οι στροφές της εικόνας j ως προς την πρώτη εικόνα και r_{ij} στοιχείο του πίνακα στροφής \mathbf{R} (Εξ. 2.3). Επομένως, σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας \mathbf{A} θα είχε τρεις επιπλέον στήλες για κάθε πανοραμική εικόνα εκτός από την πρώτη, ενώ θα είχε αυξηθεί ανάλογα και το διάνυσμα \mathbf{x} , και η λύση θα ολοκληρωνόταν με τρόπο αντίστοιχο με εκείνον που περιγράφεται στην ενότητα 3.2.8.

Ο κώδικας αυτός έχει επίσης υλοποιηθεί στο πλαίσιο της εργασίας. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα πανοράματα είχαν εξ ορισμού αντληθεί από την υπηρεσία του Google Street View με μηδενικές γωνίες του οριζόντιου επιπέδου και προσανατολισμό προς Βορρά είχε ως συνέπεια τα αποτελέσματα των συνορθώσεων με άγνωστες γωνίες στροφής να μην έχουν ουσιαστική διαφορά από την απλούστερη μορφή συνόρθωσης της ενότητας 3.2.8. Συνεπώς, για μην επιβαρυνθεί αχρείαστα η διαδικασία, τα αποτελέσματα του επομένου κεφαλαίου προέρχονται από επιλύσεις με γνωστές γωνίες στροφής των πανοραμάτων.

4 Εφαρμογή Αλγορίθμου σε Δεδομένα του Google Street View

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 σε δύο μελέτες περίπτωσης, και η αξιολόγηση τους ως προς την ακρίβεια (*precision*) και ορθότητα (*accuracy*) τους. Η εσωτερική ακρίβεια των αποτελεσμάτων της συνόρθωσης δέσμης εκφράζεται από τις τιμές του a posteriori πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας $V_{\hat{x}}$ των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων και από το a posteriori τυπικό σφάλμα $\hat{\sigma}_0$. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων εκτιμάται με σύγκριση αποτελεσμάτων της συνόρθωσης με δεδομένα ελέγχου μέσω μετασχηματισμού ομοιότητας προκειμένου να εξεταστούν ξεχωριστά οι στροφές, η κλίμακα και η μετάθεση του σημειοσύνολου που προέκυψε από τον αλγόριθμο ως προς το σημειοσύνολο που χρησιμοποιείται για έλεγχο.

Επίσης, από τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων λήψης των πανοραμάτων που προσδιορίστηκαν κατά την συνόρθωση εκτιμήθηκαν οι κλίσεις του δρόμου στην περίπτωση της οδού Λέρου. Για τον έλεγχο της ακρίβειας προσδιορισμού των κλίσεων εφαρμόζεται νόμος μετάδοσης μεταβλητοτήτων στα αποτελέσματα της συνόρθωσης, ενώ για να ελεγχθεί η ορθότητά τους γίνεται σύγκριση με κλίσεις που προσδιορίστηκαν από παρατηρήσεις πεδίου.

Το κεφάλαιο ξεκινά με μια σύντομη αναφορά στον μετασχηματισμό ομοιότητας που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί η περιγραφή του τρόπου εφαρμογής του νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων για τον υπολογισμό του σφάλματος στον προσδιορισμό των κλίσεων οδού που θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια του κεφαλαίου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δύο πρακτικές εφαρμογές του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 3.

4.1 Τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας για σύγκριση των αποτελεσμάτων

Για την διερεύνηση της ορθότητας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή της συνόρθωσης δέσμης στις πανοραμικές εικόνες της υπηρεσίας Google Street View έγινε λοιπόν σύγκριση με μετασχηματισμό ομοιότητας ως προς δεδομένα ελέγχου.

Προσδιορίζονται, έτσι, οι παράμετροι μετασχηματισμού ομοιότητας ($\lambda, \omega, \varphi, \kappa, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) που συνδέουν το σημειοσύνολο από την συνόρθωση δέσμης με το σημειοσύνολο ελέγχου. Έστω λοιπόν σημείο i με συντεταγμένες $[X_i, Y_i, Z_i]^T$ στο σύστημα αναφοράς του μοντέλου της συνόρθωσης δέσμης και αντίστοιχες συντεταγμένες $[X'_i, Y'_i, Z'_i]^T$ στο σύστημα αναφοράς του μοντέλου ελέγχου. Ο μετασχηματισμός ομοιότητας μεταξύ των δύο συστημάτων δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \lambda \mathbf{R}_{\omega, \varphi, \kappa} \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

όπου $\mathbf{R}_{\omega, \varphi, \kappa}$ ο πίνακας στροφής μεταξύ των δύο συστημάτων και λ η κλίμακα. Το σύστημα επιλύεται με την μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων και προϋποθέτει τουλάχιστον 3 ομόλογα σημεία μεταξύ των δύο σημειοσυνόλων. Το διάνυσμα των παρατηρήσεων διαμορφώνεται από τις συντεταγμένες $[X_i, Y_i, Z_i]^T$ του σημειοσυνόλου της συνόρθωσης δέσμης, οι άγνωστες καθοριστικές παράμετροι του μοντέλου είναι οι 7 παράμετροι του μετα-

σηματισμού ομοιότητας ($\lambda, \omega, \varphi, \kappa, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), οι δε τιμές των συντεταγμένων $[X'_i, Y'_i, Z'_i]^T$ θεωρούνται γνωστές χωρίς σφάλμα. Οι μη γραμμικές σχέσεις απαιτούν γραμμικοποίηση κατά Taylor (αξιοποιήθηκε το *Symbolic Toolbox* του Matlab), ενώ ο κώδικας για την συνόρθωση προγραμματίστηκε σε python. Η συνόρθωση δέχεται ως στοιχεία εισόδου τα δύο σημειοσύνολα και επιστρέφει το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των παραμέτρων, τον a posteriori πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων, το a posteriori τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης και στατιστικά που αφορούν τα υπόλοιπα των παρατηρήσεων.

4.2 Υπολογισμός του σφάλματος προσδιορισμού της κλίσης με νόμο μετάδοσης μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε αφορά τον προσδιορισμό της κλίσης οδών με χρήση των πανοραμικών εικόνων του *Google Street View*. Όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα στην συνέχεια του κεφαλαίου, η ακρίβεια προσδιορισμού των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των σημείων λήψης είναι υψηλότερη κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τις ακρίβειες που προέκυψαν για την οριζοντιογραφία, επομένως η αξιοποίηση της υψομετρικής πληροφορίας που προκύπτει από την επίλυση του συστήματος αντιπροσωπεύει ένα από τα ουσιαστικότερα, από άποψη πρακτικής εφαρμογής, αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Πέρα από την ακρίβεια που χαρακτηρίζει την υψομετρική διαφορά μεταξύ των κέντρων λήψης και η οποία εκφράζεται από τον a posteriori πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας $V_{\hat{x}}$, ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο υπολογισμός της ακρίβειας προσδιορισμού της κλίσης μεταξύ διαδοχικών σημείων λήψης, η οποία μπορεί να προκύψει από τον πίνακα $V_{\hat{x}}$ με εφαρμογή του νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων.

Γνωρίζουμε ότι η κλίση κ μεταξύ δύο σημείων A και B υπολογίζεται ως:

$$\kappa_{AB} = \frac{\Delta Z_{AB}}{S(XY)_{AB}} = \frac{Z_B - Z_A}{\sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}} \quad (4.2)$$

Με την εύλογη υπόθεση ότι οι κάμερες του *Google Street View* διατηρούνται στο ίδιο ύψος από το έδαφος, η κλίση του δρόμου μπορεί να εκτιμηθεί από τις συντεταγμένες των σημείων λήψης των διαδοχικών πανοραμάτων. Επομένως, για κάθε ζεύγος διαδοχικών σημείων λήψης $i, i + 1$ για $i \in \{1, 2, \dots, n - 1\}$, όπου n ο αριθμός των σημείων λήψης, η κλίση υπολογίζεται ως:

$$f_{i,i+1}(X_i, Y_i, Z_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}) = \kappa_{i,i+1} = \frac{\Delta Z_{i,i+1}}{S(XY)_{i,i+1}} = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}} \quad (4.3)$$

Η μεταβλητότητα των παραμέτρων X_i, Y_i, Z_i ισούται με την μεταβλητότητα των διορθώσεων ($\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$) που υπολογίζονται κατά την συνόρθωση δέσμης. Για το πρώτο σημείο λήψης, το οποίο έχει θεωρηθεί σταθερό στην συνόρθωση, η μεταβλητότητα των τριών συντεταγμένων λαμβάνεται προφανώς ίση με 0, ενώ και για το τελευταίο σημείο της σειράς η μεταβλητότητα κατά X (λόγω δέσμευσης της κλίμακας) θεωρείται επίσης ίση με 0.

Έτσι ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του διανύσματος των κλίσεων $(k_{1,2}, k_{2,3}, k_{3,4}, \dots, k_{n,n+1})^T$ εκφράζεται από την σχέση:

$$V_{\kappa} = J V_{\hat{x}}' J^T \quad (4.4)$$

όπου J ο ιακωβιανός πίνακας των συναρτήσεων $f_{i,i+1}$:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}}{\partial X_1} & \frac{\partial f_{12}}{\partial Y_1} & \frac{\partial f_{12}}{\partial Z_1} & \frac{\partial f_{12}}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{12}}{\partial Y_2} & \frac{\partial f_{12}}{\partial Z_2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{23}}{\partial X_2} & \frac{\partial f_{23}}{\partial Y_2} & \frac{\partial f_{23}}{\partial Z_2} & \frac{\partial f_{23}}{\partial X_3} & \frac{\partial f_{23}}{\partial Y_3} & \frac{\partial f_{23}}{\partial Z_3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{34}}{\partial X_3} & \frac{\partial f_{34}}{\partial Y_3} & \frac{\partial f_{34}}{\partial Z_3} & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial f_{n-1,n}}{\partial X_{n-1}} & \frac{\partial f_{n-1,n}}{\partial Y_{n-1}} & \frac{\partial f_{n-1,n}}{\partial Z_{n-1}} & \frac{\partial f_{n-1,n}}{\partial X_n} & \frac{\partial f_{n-1,n}}{\partial Y_n} & \frac{\partial f_{n-1,n}}{\partial Z_n} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

και $V_{\hat{x}}'$ ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του διανύσματος $(X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, \dots, X_n, Y_n, Z_n)$, δηλαδή το αντίστοιχο τμήμα του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας που προέκυψε από την συνόρθωση, προσαναυξημένο με μηδενικές γραμμές και στήλες που αφορούν στα $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ του σημείου 1 και το σ_x του σημείου n .

4.3 Μελέτη περίπτωσης: Οδός Καισαριανής

Σε αυτή την εφαρμογή η περιοχή μελέτης ορίζεται από τις πανοραμικές εικόνες που αφορούν την οδό Ηρώων Πολυτεχνείου στην Περιοχή της Καισαριανής.

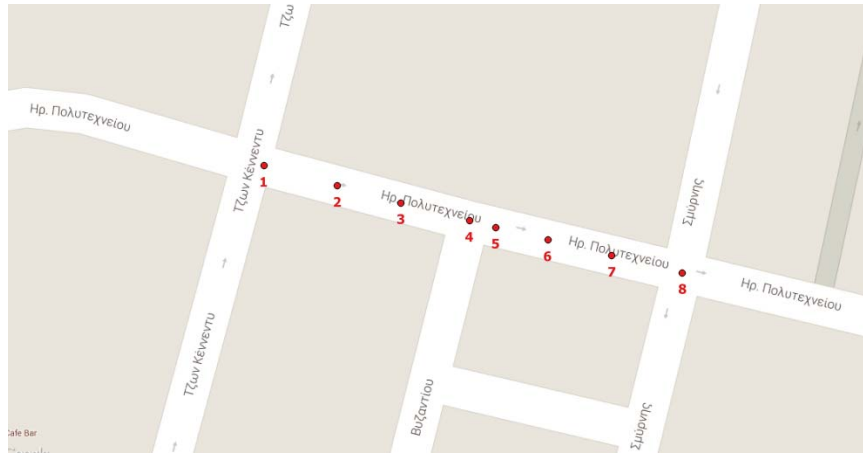
4.3.1 Ανάκτηση συντεταγμένων των κέντρων λήψης

Η ανάκτηση των εικόνων έγινε μέσω του κώδικα που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1. Οι αρχικές συντεταγμένες που απαιτούνται για την εκκίνηση του αλγορίθμου ελήφθησαν με χρήση του Google Maps σε τυχαίο σημείο εντός της περιοχής μελέτης. Μέσω της συνάρτησης *panoramaCoordinates()* – η οποία δέχεται ως είσοδο προσωρινές συντεταγμένες για μια εικόνα και επιστρέφει τις συντεταγμένες του εγγύτερου πανοράματος και των δύο γειτονικών του (τα οποία καθορίζονται από τον γράφο της βάσης του Google Street View) – προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του πρώτου σημείου λήψης. Στην συνέχεια προσδιορίζονται, με επανάληψη της διαδικασίας, οι συντεταγμένες όλων των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων που αντιστοιχούν στην οδό. Οι αρχικές συντεταγμένες των σημείων λήψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ χάρτες των σημείων σε υπόβαθρο Google Maps φαίνονται στις Εικ. 4.1-4.2.

Σημείο	$\phi(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$
1	37.9695	23.75588
2	37.96947	23.75601
3	37.96945	23.75611
4	37.96942	23.75623
5	37.96942	23.75628
6	37.9694	23.75637
7	37.96938	23.75648
8	37.96935	23.7566

Πίνακας 4.1: Γεωδαιτικές συντεταγμένες στο WGS84 των σημείων λήψης.

Οι χάρτες των σημείων δημιουργήθηκαν με χρήση του λογισμικού *QGIS* και του plugin *OpenLayers*. Η λήψη των πανοραμικών εικόνων, σύμφωνα με τα μεταδεδομένα της Google, είχε γίνει τον Ιούνιο του 2011.



Εικόνα 4.1: Χάρτης με τις θέσεις των σημείων λήψης των πανοραμάτων σε υπόβαθρο Google Street Maps.



Εικόνα 4.2: Χάρτης με τις θέσεις των σημείων λήψης των πανοραμάτων σε υπόβαθρο Google Maps.

4.3.2 Ανάκτηση καρέ και ανασύνθεση πανοραμικής εικόνας

Τα καρέ κάθε πανοράματος ανακτήθηκαν με την συνάρτηση *downloadImages()* και χρήση του Google Street-View API, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έπειτα η ανασύνθεση της πανοραμικής εικόνας από τα ανακτηθέντα καρέ με χρήση της συνάρτησης *CreatePanorama()* και του προγράμματος *Hugin*. Η γωνία διεύθυνσης του καρέ, που είναι προσανατολισμένο προς τον Βορρά, διατηρείται σταθερή κατά την συνόρθωση και ίση με 0. Για την συνόρθωση των εικόνων χρησιμοποιείται το μοντέλο των αμιγώς περιστρεφόμενων λήψεων (όλες οι εικόνες έχουν το ίδιο σημείο λήψης). Οι γωνίες *yaw*, *pitch* και *roll* δεν θεωρούνται σταθερές και ίσες με τις τιμές που δίνονται από την Google Street View Image Service, αλλά προσδιορίζονται κατά την διαδικασία της συρραφής. Οι εικόνες που προέκυψαν από την διαδικασία παρουσιάζονται στις Εικ. 4.3 έως και 4.10.



Εικόνα 4.3: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 1.



Εικόνα 4.4: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 2.



Εικόνα 4.5: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 3.



Εικόνα 4.6: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 4.



Εικόνα 4.7: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 5.



Εικόνα 4.8: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 6.



Εικόνα 4.9: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 7.



Εικόνα 4.10: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 8.

Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν σκοπεύσεις ομόλογων σημείων σε όλες τις εικόνες με χρήση του λογισμικού *mpt* (*Matlab Photogrammetric Toolbox*). Έγινε προσπάθεια η κατανομή των σημείων να καλύπτει ολόκληρο το

εύρος της πανοραμικής εικόνας κατά την οριζόντια διεύθυνση, ενώ δεν έγιναν μετρήσεις στα επάνω και κάτω άκρα της εικόνας καθώς εκεί παρατηρήθηκαν ασυνέχειες στα καρτέ του Google Street View (κατά βάση εγγενείς ατέλειες του συστήματος που δεν οφείλονται στην συρραφή με το Hugin). Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα σκοπευμένα σημεία για τις εικόνες 2, 4 και 6 (Εικ. 4.11 έως και 4.13).



Εικόνα 4.11: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 2.



Εικόνα 4.12: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 4.



Εικόνα 4.13: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 6.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 135 παρατηρήσεις που αφορούσαν σκοπεύσεις 43 σημείων στις 8 πανοραμικές εικόνες. Τελικά, μετά από εφαρμογή του αλγορίθμου της συνόρθωσης και απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων, για τον υπολογισμό των τελικών παραμέτρων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 126 παρατηρήσεις. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα σημεία που παρατηρήθηκαν και ο αριθμός των εικόνων στις οποίες παρατηρήθηκε κάθε

σημείο. Η δεξιά στήλη του πίνακα δίνει τον τελικό αριθμό των εικόνων στις οποίες παρατηρήθηκε κάθε σημείο μετά από την συνόρθωση και την απαλοιφή των σημείων με υπόλοιπο που υπερβaine το κατώφλι $2.326 \times \hat{\sigma}_0$. Ο μέσος αριθμός παρατηρήσεων ανά σημείο για την μεν αρχική λύση είναι 3.14, ενώ μετά από την απαλοιφή των χονδροειδών σφαλμάτων είναι 2.93 παρατηρήσεις ανά σημείο.

Σημείο Σκόπευσης	Παρατηρήσεις/σημείο	
	Πριν την απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων	Μετά την Απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων
1	3	3
2	4	4
3	3	3
4	3	3
5	3	3
6	3	3
7	4	3
8	4	4
9	4	4
10	3	3
11	3	3
12	5	4
13	4	4
14	4	4
15	2	2
16	5	5
17	4	4
18	4	4
19	4	4
20	6	6
21	4	4
22	4	3

Σημείο Σκόπευσης	Παρατηρήσεις/σημείο	
	Πριν την απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων	Μετά την Απαλοιφή των Outliers
24	2	2
25	2	2
26	3	3
27	2	2
28	4	2
29	3	2
30	2	2
31	3	2
32	3	3
33	3	2
34	2	2
35	3	3
36	2	2
37	3	2
38	2	2
39	2	2
41	2	2
42	2	2
43	2	2
44	2	2
άθροισμα	135	126
μέσος όρος	3.14	2.93

Πίνακας 4.2: Αριθμός παρατηρήσεων ανά σημείο πριν και μετά από την απαλοιφή χονδροειδών σφαλμάτων.

4.3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου της συνόρθωσης δέσμης στις ομολογίες που παρατηρήθηκαν προηγουμένως. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των διορθώσεων των συντεταγμένων των σημείων λήψης συνοδευόμενες από την τυπική τους απόκλιση. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τελικές συντεταγμένες των σημείων λήψης μετά την εφαρμογή των διορθώσεων που προέκυψαν από την συνόρθωση. Σημειώνεται πως το σύστημα αναφοράς των αποτελεσμάτων είναι το σύστημα *East-North-Up*, στραμμένο περί τον άξονα Up ούτως ώστε ο άξονας East να συμπέσει με την οριζόντια διεύθυνση που σχηματίζει η αρχή των αξόνων με το σημείο λήψης με την μέγιστη οριζόντια απόσταση. Στο ε-

ξής το εν λόγω στραμμένο σύστημα *ENU* θα αναφέρεται και ως σύστημα *XYZ*.

Σημείο Λήψης	$\Delta X(m)$	$\sigma_{\Delta X}(m)$	$\Delta Y(m)$	$\sigma_{\Delta Y}(m)$	$\Delta Z(m)$	$\sigma_{\Delta Z}(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	-1.02	± 0.25	1.38	± 0.07	-0.58	± 0.04
3	-1.32	± 0.45	1.38	± 0.07	-0.91	± 0.05
4	-0.91	± 0.55	1.36	± 0.10	-1.39	± 0.06
5	-0.21	± 0.56	1.09	± 0.12	-1.57	± 0.06
6	-0.25	± 0.59	1.20	± 0.12	-1.94	± 0.07
7	-0.84	± 0.38	1.03	± 0.20	-2.02	± 0.07
8	0.00	± 0.00	1.01	± 0.22	-2.56	± 0.08

Πίνακας 4.3: Διορθώσεις των συντεταγμένων *X, Y, Z* των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματα τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Σημείο Λήψης	$X(m)$	$\sigma_x(m)$	$Y(m)$	$\sigma_y(m)$	$Z(m)$	$\sigma_z(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	10.45	± 0.25	1.19	± 0.07	0.58	± 0.04
3	20.06	± 0.45	1.08	± 0.07	0.91	± 0.05
4	31.09	± 0.55	1.01	± 0.10	1.39	± 0.06
5	35.87	± 0.56	0.74	± 0.12	1.57	± 0.06
6	43.88	± 0.59	0.95	± 0.12	1.94	± 0.07
7	53.23	± 0.38	0.89	± 0.20	2.02	± 0.07
8	65.00	± 0.00	1.01	± 0.22	2.56	± 0.08

Πίνακας 4.4: Τελικές τιμές των συντεταγμένων *X, Y, Z* των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματα τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Παρατηρείται ότι το τυπικό σφάλμα των διορθώσεων της τετμημένης *X* των σημείων λήψης είναι αισθητά μεγαλύτερο από εκείνο των συντεταγμένων *Y* και *Z*. Το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη τιμή της συσχέτισης μεταξύ των διορθώσεων των τετμημένων *X* των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων, πιθανόν λόγω της δέσμευσης της τετμημένης ΔX της βάσης λήψης μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου σημείου.

Οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των μεταθέσεων $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ που εκτιμώνται από την συνόρθωση για κάθε σημείο λήψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Κάθε στοιχείο του πίνακα προκύπτει από τον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του διανύσματος των καλύτερων τιμών της συνόρθωσης, σύμφωνα με την σχέση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που δίνεται από την Εξ. (4.6), όπου σ_x, σ_y είναι το τυπικό σφάλμα των μεταβλητών *x* και *y*, και σ_{xy} η συμμεταβλητότητά τους:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.6)$$

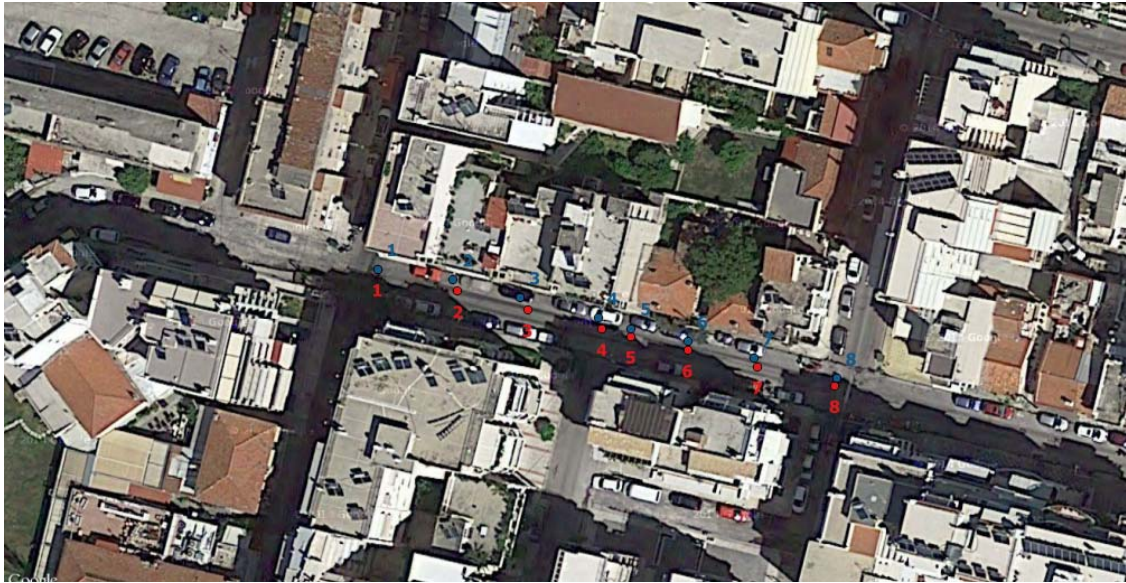
Η μέση τιμή του συντελεστή συσχέτισης (χωρίς βέβαια να λαμβάνεται υπόψη η αυτοσυσχέτιση) για τις κατά *X* συντεταγμένες των σημείων λήψης προκύπτει ως 0.86.

		2			3			4			5			6			7			8	
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔY	ΔZ
2	ΔX	1.00	0.24	-0.32	0.97	0.57	-0.45	0.90	0.60	-0.40	0.86	0.61	-0.34	0.77	0.52	-0.31	0.66	0.02	-0.14	0.05	0.02
	ΔY	0.24	1.00	-0.35	0.22	0.54	-0.28	0.27	0.52	-0.25	0.27	0.48	-0.23	0.26	0.42	-0.22	0.23	0.13	-0.14	0.13	-0.08
	ΔZ	-0.32	-0.35	1.00	-0.30	-0.30	0.78	-0.30	-0.29	0.65	-0.29	-0.29	0.62	-0.26	-0.25	0.54	-0.23	-0.04	0.45	-0.05	0.36
3	ΔX	0.97	0.22	-0.30	1.00	0.49	-0.44	0.95	0.58	-0.40	0.91	0.61	-0.34	0.82	0.50	-0.32	0.71	-0.02	-0.13	0.02	0.04
	ΔY	0.57	0.54	-0.30	0.49	1.00	-0.33	0.39	0.67	-0.28	0.37	0.60	-0.25	0.31	0.59	-0.21	0.27	0.25	-0.14	0.25	-0.07
	ΔZ	-0.45	-0.28	0.78	-0.44	-0.33	1.00	-0.42	-0.34	0.79	-0.40	-0.34	0.75	-0.37	-0.29	0.66	-0.31	-0.03	0.53	-0.04	0.42
4	ΔX	0.90	0.27	-0.30	0.95	0.39	-0.42	1.00	0.50	-0.42	0.98	0.56	-0.36	0.92	0.46	-0.35	0.79	-0.12	-0.12	-0.07	0.06
	ΔY	0.60	0.52	-0.29	0.58	0.67	-0.34	0.50	1.00	-0.23	0.44	0.84	-0.19	0.37	0.70	-0.18	0.31	0.33	-0.11	0.31	-0.03
	ΔZ	-0.40	-0.25	0.65	-0.40	-0.28	0.79	-0.42	-0.23	1.00	-0.42	-0.26	0.89	-0.39	-0.23	0.79	-0.34	0.04	0.64	0.01	0.51
5	ΔX	0.86	0.27	-0.29	0.91	0.37	-0.40	0.98	0.44	-0.42	1.00	0.47	-0.38	0.96	0.40	-0.37	0.83	-0.21	-0.12	-0.14	0.07
	ΔY	0.61	0.48	-0.29	0.61	0.60	-0.34	0.56	0.84	-0.26	0.47	1.00	-0.14	0.40	0.68	-0.19	0.32	0.32	-0.12	0.29	-0.04
	ΔZ	-0.34	-0.23	0.62	-0.34	-0.25	0.75	-0.36	-0.19	0.89	-0.38	-0.14	1.00	-0.36	-0.18	0.82	-0.32	0.07	0.66	0.04	0.54
6	ΔX	0.77	0.26	-0.26	0.82	0.31	-0.37	0.92	0.37	-0.39	0.96	0.40	-0.36	1.00	0.22	-0.43	0.87	-0.39	-0.14	-0.30	0.06
	ΔY	0.52	0.42	-0.25	0.50	0.59	-0.29	0.46	0.70	-0.23	0.40	0.68	-0.18	0.22	1.00	-0.01	0.20	0.56	0.01	0.53	0.06
	ΔZ	-0.31	-0.22	0.54	-0.32	-0.21	0.66	-0.35	-0.18	0.79	-0.37	-0.19	0.82	-0.43	-0.01	1.00	-0.36	0.24	0.78	0.20	0.63
7	ΔX	0.66	0.23	-0.23	0.71	0.27	-0.31	0.79	0.31	-0.34	0.83	0.32	-0.32	0.87	0.20	-0.36	1.00	-0.15	-0.21	0.02	0.03
	ΔY	0.02	0.13	-0.04	-0.02	0.25	-0.03	-0.12	0.33	0.04	-0.21	0.32	0.07	-0.39	0.56	0.24	-0.15	1.00	-0.10	0.90	-0.12
	ΔZ	-0.14	-0.14	0.45	-0.13	-0.14	0.53	-0.12	-0.11	0.64	-0.12	-0.12	0.66	-0.14	0.01	0.78	-0.21	-0.10	1.00	-0.11	0.85
8	ΔY	0.05	0.13	-0.05	0.02	0.25	-0.04	-0.07	0.31	0.01	-0.14	0.29	0.04	-0.30	0.53	0.20	0.02	0.90	-0.11	1.00	-0.06
	ΔZ	0.02	-0.08	0.36	0.04	-0.07	0.42	0.06	-0.03	0.51	0.07	-0.04	0.54	0.06	0.06	0.63	0.03	-0.12	0.85	-0.06	1.00

Πίνακας 4.5: Πίνακας συσχέτισης των διορθωτικών όρων ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων.

Ακολουθώντας τους αντίστροφους μετασχηματισμούς (αρχικά τον μετασχηματισμό στροφής ώστε να μετασχηματιστούν τα δεδομένα στο σύστημα *East-North-Up* και εν συνεχεία τον μετασχηματισμό από το σύστημα *ENU* στο σύστημα *WGS84*) μπορεί κανείς να προσδιορίσει τις διορθωμένες γεωδαιτικές συντεταγμένες φ , λ των σημείων λήψης των πανοραμικών εικόνων στο σύστημα *WGS84*. Στην Εικ. 4.14 παρουσιάζονται οι αρχικές όσο και οι διορθωμένες συντεταγμένες των σημείων λήψης σε υπόβαθρο Google Maps.

Όσον αφορά τώρα τις συντεταγμένες των σημείων σκόπευσης που προέκυψαν από την συνόρθωση, αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6. Η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης για όλα τα σημεία κατά X είναι 0.41 m, κατά Y 0.20 m και κατά Z 0.08 m. Παρατηρείται λοιπόν ότι η ακρίβεια προσδιορισμού του υψομέτρου είναι αισθητά καλύτερη σε σχέση με την ακρίβεια προσδιορισμού της οριζοντιογραφίας. Οι μεγάλες τυπικές αποκλίσεις κατά X αποδίδονται, κατά κύριο λόγο, στα προαναφερθέντα μεγάλα σφάλματα των όρων μετάθεσης κάθε σημείου λήψης κατά την διεύθυνση του άξονα X .

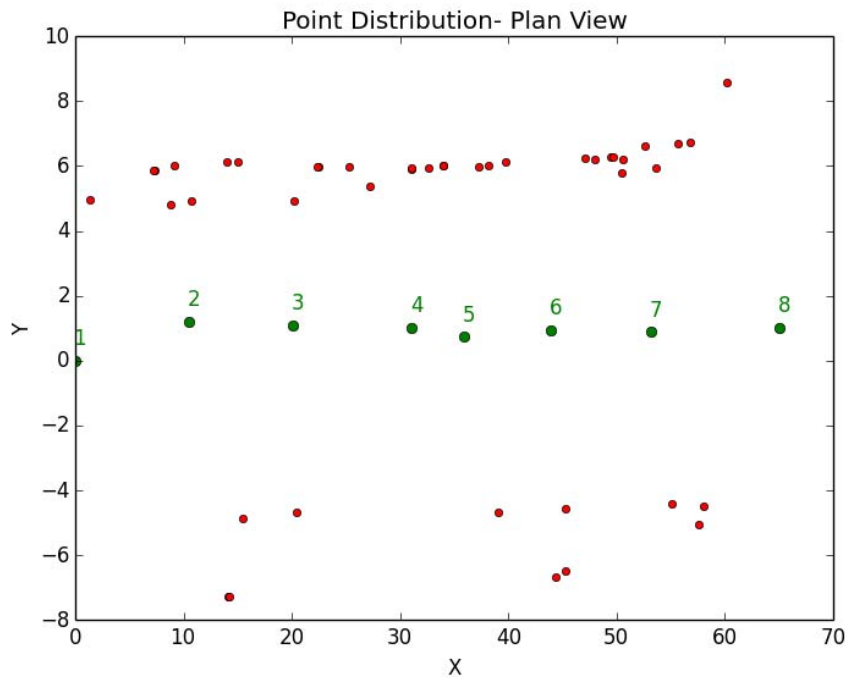


Εικόνα 4.14: Χάρτης με την θέση των αρχικών (κόκκινα) και των διορθωμένων (μπλε) σημείων λήψης σε υπόβαθρο Google Maps.

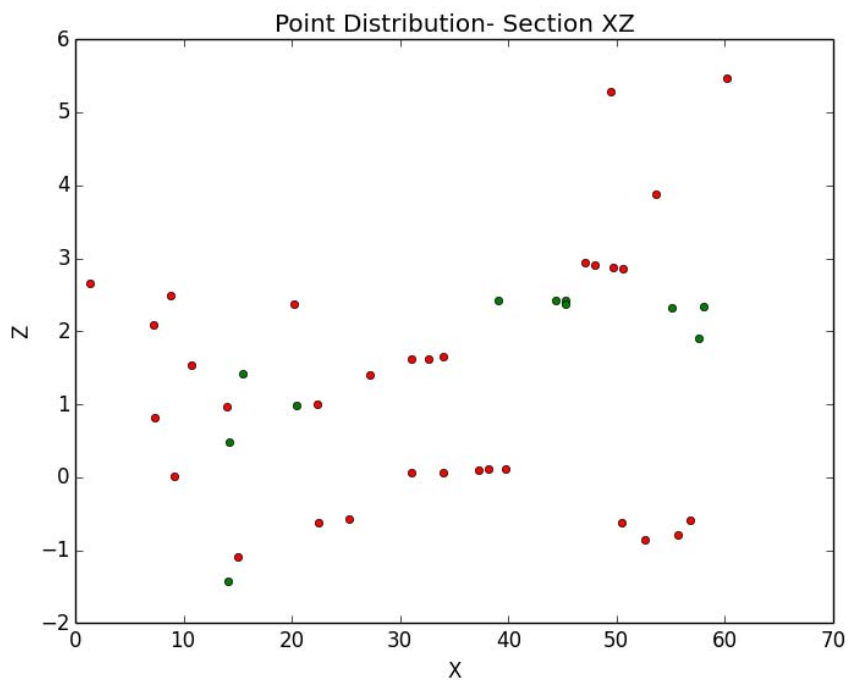
Σημεία	X(m)	$\sigma_x(m)$	Y(m)	$\sigma_y(m)$	Z(m)	$\sigma_z(m)$
1	1.38	±0.06	4.96	±0.14	2.65	±0.08
2	8.81	±0.22	4.79	±0.13	2.49	±0.08
3	7.29	±0.18	5.86	±0.16	0.81	±0.05
4	7.28	±0.18	5.86	±0.15	2.09	±0.07
5	9.11	±0.22	6.02	±0.16	0.02	±0.05
6	14.03	±0.34	6.14	±0.15	0.97	±0.06
7	14.99	±0.36	6.13	±0.15	-1.09	±0.06
8	10.68	±0.26	4.93	±0.14	1.53	±0.06
9	20.24	±0.45	4.91	±0.12	2.37	±0.07
10	14.17	±0.33	-7.27	±0.19	-1.42	±0.07
11	15.42	±0.35	-4.86	±0.14	1.43	±0.06
12	14.17	±0.32	-7.27	±0.17	0.48	±0.06
13	22.42	±0.47	5.97	±0.14	-0.63	±0.06
14	22.39	±0.48	6.00	±0.14	1.00	±0.06
15	20.39	±0.46	-4.67	±0.18	0.99	±0.06
16	25.25	±0.50	5.98	±0.12	-0.58	±0.06
17	27.19	±0.53	5.39	±0.12	1.40	±0.06
18	31.05	±0.55	5.92	±0.12	0.06	±0.06
19	31.04	±0.55	5.95	±0.12	1.62	±0.06
20	39.10	±0.57	-4.67	±0.18	2.43	±0.07
21	32.64	±0.55	5.94	±0.12	1.63	±0.06
22	45.30	±0.57	-4.58	±0.19	2.43	±0.07
23	44.33	±0.60	-6.65	±0.23	2.42	±0.08
24	37.23	±0.56	5.99	±0.17	0.09	±0.08

Σημεία	X(m)	$\sigma_x(m)$	Y(m)	$\sigma_y(m)$	Z(m)	$\sigma_z(m)$
25	34.01	±0.56	6.00	±0.14	0.06	±0.07
26	38.21	±0.56	6.04	±0.12	0.11	±0.07
27	33.99	±0.56	6.03	±0.14	1.65	±0.07
28	57.63	±0.23	-5.04	±0.29	1.91	±0.09
29	39.77	±0.57	6.11	±0.14	0.11	±0.08
30	45.31	±0.60	-6.48	±0.26	2.38	±0.08
31	49.42	±0.43	6.26	±0.27	5.29	±0.13
32	50.61	±0.40	6.21	±0.24	2.85	±0.08
33	55.67	±0.32	6.69	±0.30	-0.79	±0.14
34	47.09	±0.47	6.23	±0.30	2.94	±0.08
35	48.03	±0.45	6.21	±0.28	2.91	±0.08
36	49.71	±0.42	6.29	±0.26	2.88	±0.08
37	55.08	±0.31	-4.43	±0.29	2.32	±0.08
38	52.66	±0.40	6.63	±0.31	-0.85	±0.15
39	60.15	±0.18	8.59	±0.35	5.46	±0.14
41	53.59	±0.37	5.92	±0.29	3.88	±0.10
42	56.84	±0.29	6.74	±0.30	-0.60	±0.13
43	58.02	±0.22	-4.49	±0.27	2.34	±0.09
44	50.44	±0.46	5.78	±0.31	-0.62	±0.15
RMS		± 0.43		± 0.21		± 0.08
MAX		±0.60		±0.35		±0.15
MIN		±0.06		±0.12		±0.05

Πίνακας 4.6: Συντεταγμένες X,Y,Z των σημείων σκόπευσης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση.



Εικόνα 4.15: Κατανομή των σημείων σκόπευσης σε κάτοψη. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία σκόπευσης και με πράσινο τα σημεία λήψης των πανοραμικών εικόνων. Σύστημα αναφοράς: Στραμμένο ENU.



Εικόνα 4.16: Υψομετρική κατανομή σημείων σκόπευσης (με πράσινο και κόκκινο διακρίνονται τα σημεία στις δύο πλευρές του δρόμου). Τομή XZ.

Στην Εικ. 4.15 παρουσιάζεται κάτοψη με τα διορθωμένα σημεία λήψης και τα σημεία σκόπευσης μετά από την συνόρθωση στο στραμμένο σύστημα XYZ. Στην Εικ. 4.16 παρουσιάζεται η τομή XZ των σημείων σκόπευσης που

αποτελεί μια οπτικοποίηση της υψομετρικής κατανομής των σημείων σκόπευσης.

Η *a posteriori* τυπική απόκλιση που προέκυψε από την συνόρθωση των παρατηρήσεων είναι ίση με: $\hat{\sigma}_0 = 2.75$ ρixel και αποτελεί ένα μέτρο τόσο της ποιότητας των παρατηρήσεων όσο και του βαθμού στον οποίο οι παρατηρήσεις προσαρμόζονται στο μαθηματικό μοντέλο της συνόρθωσης.

4.3.4 Σύγκριση με αληθή δεδομένα

Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων της συνόρθωσης χρησιμοποιήθηκαν 16 σημεία που απεικονίζονται στο μοντέλο. Τα δεδομένα ελέγχου παραχωρήθηκαν από τον επιστημονικό υπεύθυνο του ερευνητικού προγράμματος "5 Dimensional Multi-Purpose Land Information System" καθηγητή κ. Χ. Ιωαννίδη. Σύστημα αναφοράς των σημείων ελέγχου είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 87 (ΕΓΣΑ87). Στην Εικ. 4.17 απεικονίζεται η κατανομή του σημειοσυνόλου ελέγχου επί του τρισδιάστατου μοντέλου που έχει παραχθεί από την επίλυση στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος.

Για τον έλεγχο, συγκρίθηκαν αρχικά τα αποτελέσματα της συνόρθωσης εκφρασμένα στο σύστημα *ENU* με τα σημεία ελέγχου, με αγνόηση του διανύσματος μετάθεσης που προκύπτει από τον μετασχηματισμό ομοιότητας, και με την (εύλογη) θεώρηση ότι οι προσανατολισμοί των συστημάτων *ENU* και *ΕΓΣΑ87* είναι σχεδόν οι ίδιοι. Επομένως σε αυτή την λύση αγνοείται το διάνυσμα μετάθεσης και εξετάζεται μόνον η κλίμακα και οι στροφές.



Εικόνα 4.17: Σημειοσύνολο Ελέγχου.

Εν συνεχεία έγινε ακόμη μια σύγκριση μεταξύ του σημειοσυνόλου ελέγχου και εκείνου που προέκυψε από την συνόρθωση, εκφρασμένου στο *ΕΓΣΑ87*. Για την μετατροπή τα δεδομένα από το σύστημα *ENU* μετασχηματίστηκαν στο *WGS84* και στην συνέχεια, με χρήση του *QGIS*, έγινε μετατροπή των συντεταγμένων στο *ΕΓΣΑ87*. Επειδή κατά την επίλυση προέκυψε η στροφή ω περί τον άξονα να είναι ίση με περίπου 5° και για να διασφαλιστεί η ορθότητα του ελέγχου, συντάχθηκε κώδικας σε *Python* με βάση το τεχνικό εγχειρίδιο της *NGIS* (*NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY*, 2014) και τις παραμέτρους του *ΕΓΣΑ* (Βέης κ.ά., 2009), για την μετατροπή από γεωδαιτικές συντεταγμένες *WGS84* σε *x,y* στο *ΕΓΣΑ87*.

Κωδικός Σημείου Ελέγχου	ΕΓΣΑ 87			Κωδικός Σημείου στην Συνόρθωση	East-North-Up		
	x	y	H		E	N	U
1	478433.1	4202169	137.8877	14	23.17873	0.307469	0.995868
2	478418	4202173	137.4682	3	8.510229	3.887712	0.813548
3	478441.5	4202167	138.5259	19	31.54548	-1.86406	1.618956
4	478441.5	4202167	137.0375	18	31.54897	-1.89637	0.064664
5	478424.8	4202171	137.723	6	15.10611	2.500081	0.9748
6	478421.3	4202171	138.3155	8	11.56525	2.152224	1.528526
7	478459.9	4202163	142.0949	31	49.44175	-6.08085	5.289154
8	478461.1	4202163	139.9067	32	50.57916	-6.42948	2.85326
9	478463.3	4202162	136.6236	38	52.67482	-6.51933	-0.85218
10	478466.1	4202161	136.8508	33	55.60300	-7.20620	-0.79183
11	478470.6	4202163	142.2064	39	60.41674	-6.46939	5.462707
12	478437.6	4202168	138.3375	17	27.68206	-1.46419	1.402307
13	478433.1	4202169	136.3226	13	23.19830	0.276049	-0.62768
14	478430.7	4202169	139.2425	9	20.83154	-0.21589	2.368239
15	478425.8	4202171	135.7911	7	16.03901	2.258913	-1.08579
16	478412.3	4202173	139.1343	1	2.558088	4.465319	2.649188

Πίνακας 4.7: Συντεταγμένες του σημειοσυνόλου ελέγχου όπως προέκυψαν από την λύση αναφοράς και εφαρμογή της συνόρθωσης της διπλωματικής εργασίας.

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται αριστερά οι συντεταγμένες του σημειοσυνόλου ελέγχου, όπως αυτές προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου ελέγχου, και δεξιά παρουσιάζονται ενδεικτικά οι συντεταγμένες των σημείων όπως προέκυψαν από την επίλυση της συνόρθωσης εκφρασμένες στο σύστημα East-North-Up.

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μετασχηματισμού ομοιότητας σε κάθε μια από τις περιπτώσεις συστημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα όσον αφορά τις γωνίες στροφής μπορούν να θεωρηθούν ίδια, ενώ το διάνυσμα μετάθεσης διαφέρει μεταξύ των συστημάτων ΕΓΣΑ 87 από τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε σχέση με τις συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ87 που υπολογίστηκαν με χρήση του QGIS³³.

Παρατηρώντας κανείς τα αποτελέσματα συμπεραίνει ότι η κλίμακα του μοντέλου που προέκυψε από την συνόρθωση είναι ικανοποιητική, όπως επίσης και οι στροφές φ, κ περί τους άξονες North και Up αντίστοιχα, ενώ τίθεται ένα ζήτημα ορθότητας ως προς την γεωαναφορά του μοντέλου καθώς οι συντεταγμένες του διανύσματος μετάθεσης είναι της τάξης των λίγων μέτρων. Επίσης, η στροφή περί των άξονα East είναι περίπου ίση με 5.5°, γεγονός που παραπέμπει σε πιθανά σφάλματα στην οριζοντιότητα των πανοραμικών εικόνων. Όσον αφορά την a posteriori τυπική απόκλιση, η οποία αποτελεί ένα μέτρο της καταλληλότητας του μετασχηματισμού ομοιότητας για την έκφραση της σχέσης μεταξύ των δύο μοντέλων, η τιμή της και στις τρεις περιπτώσεις προκύπτει ίση με 0.20 m.

³³ Τα αποτελέσματα του κώδικα που αναπτύχθηκε για την μετατροπή συντεταγμένων από WGS84 σε ΕΓΣΑ87 συμφωνούν με εκείνα της ιστοσελίδας: <http://topometrics.gr/icoord/iCoord.htm>

Παράμετροι	ΕΓΣΑ87 από QGIS		ΕΓΣΑ87 από κώδικα		East-North-Up	
	α	σ_α	α	σ_α	α	σ_α
λ	0.986	0.003	0.986	0.003	0.986	0.003
ω°	-5.217	0.029	-5.448	0.028	-5.447	0.028
ϕ°	0.543	0.007	0.593	0.007	0.592	0.007
κ°	0.549	0.003	0.556	0.003	0.406	0.003
$\Delta X(m)$	-1.126	0.123	-0.374	0.121	1.061	0.096
$\Delta Y(m)$	2.471	0.139	2.862	0.137	-5.142	0.101
$\Delta Z(m)$	-2.025	0.203	-2.049	0.200	-0.696	0.299
σ_α a posteriori	0.20 m		0.20 m		0.20 m	

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα του μετασχηματισμού ομοιότητας για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

4.3.5 Επίλυση με δέσμευση παραμέτρων των πανοραμάτων

Η τιμή της γωνίας στροφής (5.5°) περί τον άξονα East που προέκυψε από τον μετασχηματισμό ομοιότητας εγείρει ερωτήματα αναφορικά με την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Γίνεται αναφορά μόνο στην εν λόγω γωνία στροφής, καθώς οι άλλες δύο ήταν σαφώς μικρότερες – της τάξης των 0.5° , πράγμα αναμενόμενο – ενώ το διάνυμα μετάθεσης σχετίζεται με τον καθορισμό της απόλυτης θέσης του συστήματος του μοντέλου, η οποία είναι δυνατόν να βελτιωθεί είτε (α) με μετρήσεις GPS μεγαλύτερης ακρίβειας κατά την λήψη των πανοραμικών εικόνων είτε (β) με χρήση φωτοσταθερών, ενδεχόμενα που είναι εκτός προσέγγισης της εργασίας. Εκείνο που πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω είναι η ποιότητα των παραμέτρων των πανοραμικών εικόνων, οι οποίες προκύπτουν από τα δεδομένα και τα μεταδεδομένα (metadata) που λαμβάνονται από τις εφαρμογές της Google.

Για να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο επίδρασης της διαδικασίας ανασύνθεσης των πανοραμάτων στην ποιότητα των εικόνων έγινε εκ νέου ανασύσταση των εικόνων, αυτή τη φορά με δέσμευση των τιμών των παραμέτρων των γωνιών σύμφωνα με τις τιμές που παρέχει η Google. Συνεπώς οι στροφές *yaw* των εικόνων θα είναι $0^\circ, 36^\circ, 72^\circ, 108^\circ, 144^\circ, 180^\circ, 216^\circ, 252^\circ, 288^\circ, 324^\circ$, ενώ οι στροφές *pitch* και *roll* είναι μηδενικές για όλες τις εικόνες. Τέλος, το *horizontal field of view* είναι σταθερό και ίσο με 90° . Οι λοιπές παράμετροι που αφορούν την προβολή ή τις μεθόδους του ανάμιξης χρώματος και συρραφής των εικόνων παραμένουν οι ίδιες.

Στις Εικ. 4.18 έως και 4.21 δίνονται ενδεικτικά 4 από τις 8 πανοραμικές εικόνες που προέκυψαν με εφαρμογή της δεύτερης προσέγγισης. Στα πανοράματα έχουν σημειωθεί περιοχές όπου παρατηρούνται έντονες ασυνέχειες, οι οποίες δεν εμφανίζονταν στα αρχικά καρέ. Στις Εικ. 4.22 έως 4.25 παρουσιάζονται σε μεγέθυνση περιοχές με έντονες ασυνέχειες που οφείλονται στην επιβολή των δεσμεύσεων κατά την γεωμετρική βελτιστοποίηση των εικόνων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η μέση απόκλιση των σημείων σύνδεσης³⁴ μεταξύ των εικόνων κατά την βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων τους είναι της τάξης των 0.7 pixel για την πρώτη προσέγγιση, ενώ στην περίπτωση παραγωγής πανοραμάτων με όλες τις παραμέτρους δεσμευμένες φτάνει τα 8.5 pixel (Πίνακας 4.9 – τα αποτελέσματα προέρχονται από τον *PT-optimizer* του Hugin).

³⁴ Σημεία Ελέγχου ή Σύνδεσης (στο Hugin ονομάζονται *Control Points*): είναι τα σημεία σύνδεσης των εικόνων κατά την δημιουργία μιας πανοραμικής εικόνας.

Πανοραμική	1 ^η Προσέγγιση			2 ^η Προσέγγιση		
	<i>Average Control Point Distance</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>Maximum</i>	<i>Average Control Point Distance</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>Maximum</i>
eik1	0.7	0.4	2.1	10.5	5.9	24.3
eik2	0.7	0.6	7.5	9.1	5.4	20.8
eik3	0.7	0.4	2.5	7.8	4.3	18.2
eik4	0.7	0.5	6.0	8.9	5.5	23.1
eik5	0.7	0.7	6.7	9.5	5.8	23.5
eik6	0.7	0.4	1.9	8.8	4.8	21.0
eik7	0.7	0.5	3.8	6.6	3.1	14.7
eik8	0.7	0.5	4.5	7.1	3.6	16.5

Πίνακας 4.9: Μέσο και μέγιστο σφάλμα, και τυπική απόκλιση (σε ρίκελ) των σημείων σύνδεσης των καρέ μετά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων του πανοράματος με την πρώτη (αριστερά) και την δεύτερη (δεξιά) προσέγγιση παραγωγής πανοραμικών.



Εικόνα 4.18: Πανοραμική εικόνα (eik1) που προέκυψε με όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους δεσμευμένες.



Εικόνα 4.19 : Πανοραμική εικόνα (eik2) που προέκυψε με όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους δεσμευμένες.



Εικόνα 4.20: Πανοραμική εικόνα (εικ3) που προέκυψε με όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους δεσμευμένες.



Εικόνα 4.21: Πανοραμική εικόνα (εικ7) που προέκυψε με όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους δεσμευμένες.



Εικόνα 4.22: Μεγέθυνση σε ασυνέχεια της εικόνας 2 (εικ2).



Εικόνα 4.23: Μεγέθυνση σε ασυνέχεια της εικόνας 2 (εικ2).



Εικόνα 4.24: Μεγέθυνση σε ασυνέχεια της εικόνας 3 (eik3).



Εικόνα 4.25: Μεγέθυνση σε ασυνέχεια της εικόνας 3 (eik3).

Για την εφαρμογή της συνόρθωσης των πανοραμικών εικόνων σκοπεύθηκαν τα ίδια σημεία με προηγουμένως και στις 8 εικόνες. Οι συντεταγμένες των σημείων λήψης των εικόνων είναι οι ίδιες με την περίπτωση επίλυσης χωρίς δεσμεύσεις.

4.3.6 Επίλυση με δεσμεύσεις

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου σε πανοραμικές εικόνες που προέκυψαν με δέσμευση των γεωμετρικών παραμέτρων των καρτέ. Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των διορθώσεων των συντεταγμένων των σημείων λήψης συνοδευόμενες από την τυπική απόκλισή τους. Σε σχέση με τους Πίνακες 4.3 και 4.4 που αφορούν την επίλυση πανοραμάτων που προέκυψαν από εικόνες χωρίς δεσμεύσεις παρατηρείται αύξηση της τυπικής απόκλισης των διορθώσεων, κυρίως κατά τον άξονα X, η οποία φτάνει και τα 0.20 m, ενώ η τυπική απόκλιση των καλύτερων τιμών των διορθώσεων κατά τους άξονες Y και Z αυξάνεται, αλλά κατά λίγα cm.

Ο συνολικός αριθμός των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν στην συνόρθωση μετά από την απαλοιφή των χονδροειδών σφαλμάτων είναι 132, ενώ κατά μέσο όρο πραγματοποιήθηκαν 3.07 παρατηρήσεις ανά σημείο. Όσον αφορά την *a posteriori* τυπική απόκλιση, αυτή προέκυψε ίση με 5.5 pixel, δηλαδή σχεδόν διπλάσια σε σχέση με την προηγούμενη λύση, γεγονός που δικαιολογείται εν μέρει από την κακή ποιότητα των πανοραμικών εικόνων που προέκυψαν με την εφαρμογή των δεσμεύσεων.

Σημείο Λήψης	$\Delta X(m)$	$\sigma_{\Delta X}(m)$	$\Delta Y(m)$	$\sigma_{\Delta Y}(m)$	$\Delta Z(m)$	$\sigma_{\Delta Z}(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	-1.78	± 0.39	1.27	± 0.12	-0.44	± 0.07
3	-2.80	± 0.65	1.10	± 0.13	-0.50	± 0.08
4	-2.47	± 0.80	1.06	± 0.16	-1.43	± 0.10
5	-1.69	± 0.81	0.55	± 0.18	-1.56	± 0.11
6	-1.87	± 0.77	1.01	± 0.20	-0.10	± 0.12
7	-1.51	± 0.54	0.99	± 0.23	0.08	± 0.14
8	0.00	± 0.00	0.91	± 0.25	0.16	± 0.15

Πίνακας 4.10: Διορθώσεις των συντεταγμένων X,Y,Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματα τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Σημείο Λήψης	$\Delta X(m)$	$\sigma_{\Delta X}(m)$	$\Delta Y(m)$	$\sigma_{\Delta Y}(m)$	$\Delta Z(m)$	$\sigma_{\Delta Z}(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	9.69	± 0.39	1.08	± 0.12	-0.44	± 0.07
3	18.58	± 0.65	0.80	± 0.13	-0.50	± 0.08
4	29.53	± 0.80	0.70	± 0.16	-1.43	± 0.10
5	34.39	± 0.81	0.20	± 0.18	-1.56	± 0.11
6	42.25	± 0.77	0.76	± 0.20	-0.10	± 0.12
7	52.56	± 0.54	0.85	± 0.23	0.08	± 0.14
8	65.00	± 0.00	0.91	± 0.25	0.16	± 0.15

Πίνακας 4.11: Τελικές τιμές των συντεταγμένων X,Y,Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματα τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Τέλος, στον Πίνακα 4.12 εμφανίζονται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης των συντεταγμένων των σημείων σκόπευσης ως προς τις διευθύνσεις X, Y και Z. Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.6 παρατηρεί κανείς ότι οι στατιστικοί δείκτες και στις τρεις διευθύνσεις έχουν μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση συνόρθωσης των πανοραμμάτων με δεσμεύσεις.

Stats	$\sigma_x(m)$	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$
RMS	± 0.62	± 0.30	± 0.16
Max – Min	$\pm 0.83 - \pm 0.10$	$\pm 0.47 - \pm 0.19$	$\pm 0.27 - \pm 0.09$

Πίνακας 4.12: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης των συντεταγμένων των σημείων σκόπευσης κατά X, Y, Z

4.3.7 Εφαρμογή μετασχηματισμού ομοιότητας για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων

Όπως και στην περίπτωση συνόρθωσης των πανοραμμάτων χωρίς δεσμεύσεις, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα ελέγχου. Έγινε σύγκριση με χρήση του ίδιου σημειοσύνολου και με τα αποτελέσματα της συνόρθωσης των πανοραμικών εικόνων εκφρασμένα (α) στο τοπικό σύστημα ENU και (β) στο ΕΓΣΑ87. Τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.13. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα του Πίνακα 4.8 παρατηρεί κανείς ότι η τιμή της γωνίας ω μειώθηκε κατά 2.13° σε σχέση με την αρχική λύση, αλλά αυξήθηκε η τιμή της γωνίας ϕ (στροφή περί τον άξονα North), ενώ τα σφάλματα των άγνω-

στων καθοριστικών παραμέτρων του μετασχηματισμού εν γένει αυξήθηκαν, με το σ_0 posteriori να είναι διπλάσιο σε σχέση με τις λύσεις του Πίνακα 4.8.

Παράμετροι	ΕΓΣΑ87 από κώδικα		East-North-Up	
	X	σ_x	x	σ_x
λ	0.990	0.005	0.990	0.005
ω°	-3.370	0.056	-3.324	0.056
ϕ°	-2.635	0.013	-2.646	0.013
κ°	-0.443	0.006	-0.566	0.006
$\Delta X(m)$	-1.696	0.238	-0.035	0.188
$\Delta Y(m)$	2.106	0.267	-5.663	0.195
$\Delta Z(m)$	-0.614	0.401	0.396	0.597
σ_0 α posteriori	0.40 m		0.40 m	

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ του σημειοσυνόλου που προέκυψε από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων με δεσμεύσεις και του σημειοσυνόλου ελέγχου.

Μετά από την εξέταση όλων των παραπάνω αποτελεσμάτων οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα ότι οι πανοραμικές εικόνες που προέκυψαν από την πρώτη προσέγγιση (χωρίς επιβολή δεσμεύσεων στα καρτέ) οδηγούν σε μοντέλο με καλύτερη εσωτερική γεωμετρία, στο οποίο όμως τίθεται ένα ζήτημα αβεβαιότητας ως προς την ορθότητα της γεωαναφοράς και της οριζοντιότητάς του. Αντίθετα, οι πανοραμικές εικόνες που προέκυψαν με δεσμεύση των γεωμετρικών παραμέτρων των καρτέ οδηγούν σε μοντέλο υποδεέστερης εσωτερικής γεωμετρίας χωρίς να βελτιώνουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα της γεωαναφοράς του μοντέλου.

4.4 Μελέτη περίπτωσης: Οδός Λέρου

Σε αυτή την εφαρμογή η περιοχή μελέτης ορίζεται από τις πανοραμικές εικόνες, τα κέντρα λήψης των οποίων βρίσκονται επί της οδού Λέρου στην Περιοχή της Κυψέλης. Με τρόπο αντίστοιχο με την περίπτωση της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου, προσδιορίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των κέντρων λήψης των πανοραμικών εικόνων, ανακτώνται τα καρτέ ανά 36° της γωνίας διεύθυνσης (γ_{aw} - από 0° έως και 360°) κάθε πανοράματος με τις παραμέτρους *pitch* και *roll* ίσες με το μηδέν, και στη συνέχεια εφαρμόζεται η συνάρτηση *CreatePanorama()* για την σύνθεση των πανοραμικών εικόνων από τα καρτέ. Σε αυτή την εφαρμογή δημιουργήθηκαν πανοραμικές εικόνες μόνο με την 1^η προσέγγιση που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή χωρίς την εφαρμογή δεσμεύσεων κατά την διαδικασία γεωμετρικής βελτιστοποίησης των παραμέτρων των καρτέ.

Οι αρχικές συντεταγμένες των σημείων λήψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14, ενώ χάρτες των σημείων σε υπόβαθρο Google Maps παρουσιάζονται στις Εικ. 4.26 και 4.27. Όπως και προηγουμένως, οι χάρτες των σημείων δημιουργήθηκαν με χρήση του λογισμικού *QGIS* και του plugin *OpenLayers*.

Η λήψη των εικόνων, σύμφωνα με τα μεταδεδομένα που ανακτήθηκαν από το Google Service, είχε πραγματοποιηθεί τον Σεπτέμβριο του 2014, δηλαδή οι εικόνες που εξετάζονται σε αυτή την εφαρμογή είναι κατά 3 χρόνια μεταγενέστερες εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου στην Καισαριανή.

Σημείο	$\phi(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$
1	38.00601	23.73809
2	38.006	23.73823
3	38.006	23.73834
4	38.006	23.73845
5	38.00599	23.73859
6	38.00599	23.73874
7	38.00599	23.73884
8	38.00598	23.73896
9	38.00598	23.73908
10	38.00598	23.73921
11	38.00597	23.73931

Πίνακας 4.14: Γεωδαιτικές Συντεταγμένες στο WGS84 των Σημείων Λήψης



Εικόνα 4.26: Χάρτης που παρουσιάζει την θέση των σημείων λήψης σε υπόβαθρο Google Street Maps.



Εικόνα 4.27: Χάρτης που παρουσιάζει την θέση των σημείων λήψης επί της οδού Λέρου σε υπόβαθρο Google Maps.

Οι πανοραμικές εικόνες που προέκυψαν παρουσιάζονται στις Εικ. 4.28 έως και 4.38.



Εικόνα 4.28: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 1.



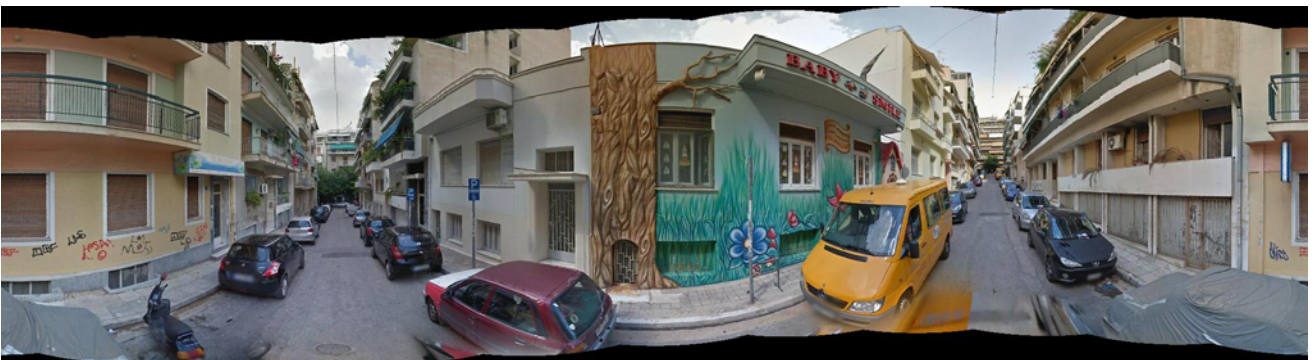
Εικόνα 4.29: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 2.



Εικόνα 4.30: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 3.



Εικόνα 4.31: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 4.



Εικόνα 4.32: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 5.



Εικόνα 4.33: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 6.



Εικόνα 4.34: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 7.



Εικόνα 4.35: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 8.



Εικόνα 4.36: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 9.



Εικόνα 4.37: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 10.



Εικόνα 4.38: Πανοραμική εικόνα από το Σημείο Λήψης 11.

Όπως στην περίπτωση της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου η σκόπευση των σημείων έγινε και εδώ με χρήση του λογισμικού *mpt* (*Matlab Photogrammetric Toolbox*). Έγινε προσπάθεια η κατανομή των σημείων να καλύπτει το εύρος της πανοραμικής εικόνας κατά την οριζόντια διεύθυνση, ενώ δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κοντά στα επάνω και κάτω άκρα της εικόνας. Ενδεικτικά δίνονται τα σκοπευμένα σημεία για τις εικόνες 2, 4, 6, 8 και 10 (Εικ. 4.39 έως και 4.43).



Εικόνα 4.39: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 2.



Εικόνα 4.40: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 3.



Εικόνα 4.41: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 4.



Εικόνα 4.42: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 7.



Εικόνα 4.43: Σημεία σκόπευσης πανοραμικής εικόνας 8.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από διαφορετικές μεθοδολογίες επίλυσης με τις παραπάνω παρατηρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι επιλύσεις:

(α) με τον αλγόριθμο συνόρθωσης δέσμης πολλαπλών (n) εικόνων με άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους τις συντεταγμένες των σημείων σκόπευσης και τις διορθώσεις ΔX , ΔY , ΔZ των εικόνων 2 έως και $n-1$, καθώς και τις B_Y , B_Z της εικόνας n . Αυτός ο τρόπος συνόρθωσης αντιπροσωπεύει και τον βασικό αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας.

(β) με τον αλγόριθμο συνόρθωσης n εικόνων με άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους τις συντεταγμένες των σημείων σκόπευσης και τις διορθώσεις ΔZ των εικόνων 2 έως και n .

(γ) με τον αλγόριθμο συνόρθωσης των εικόνων ανά 2 και προσδιορισμό των άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων ΔY και ΔZ των εικόνων 2 έως και n .

4.4.1 Αποτελέσματα επίλυσης με ταυτόχρονη συνόρθωση όλων των εικόνων

Στους Πίνακες 4.15 έως και 4.17 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της συνόρθωσης με χρήση του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.8. Το a posteriori τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης προέκυψε ίσο με 1.36 pixel. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανής η μεγαλύτερη ακρίβεια που προκύπτει κατά τον προσδιορισμό των υψομετρικών διαφορών των σημείων λήψης σε σχέση με την ακρίβεια προσδιορισμού των διορθώσεων της τετμημένης X των σημείων λήψης.

Στην Εικ. 4.44 παρουσιάζονται οι αρχικές όσο και οι διορθωμένες συντεταγμένες των σημείων λήψης σε υπόβαθρο Google Maps. Στην Εικ. 4.45 φαίνεται κάτοψη με τα διορθωμένα σημεία λήψης και τα σημεία σκόπευσης μετά από την συνόρθωση στο στραμμένο σύστημα XYZ. Στην Εικ. 4.46, τέλος, παρουσιάζεται η τομή XZ των σημείων σκόπευσης ως μια οπτικοποίηση της υψομετρικής κατανομής τους.

Σημείο Λήψης	$\Delta X(m)$	$\sigma_{\Delta X}(m)$	$\Delta Y(m)$	$\sigma_{\Delta Y}(m)$	$\Delta Z(m)$	$\sigma_{\Delta Z}(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	-0.76	± 0.15	-0.65	± 0.04	-0.75	± 0.02
3	-1.39	± 0.23	-0.74	± 0.04	-1.27	± 0.02
4	-2.08	± 0.30	-0.84	± 0.05	-1.86	± 0.03
5	-2.45	± 0.33	-1.08	± 0.05	-2.54	± 0.03
6	-2.11	± 0.32	-1.23	± 0.05	-3.46	± 0.03
7	-1.57	± 0.28	-1.36	± 0.05	-4.30	± 0.03
8	-1.45	± 0.24	-1.49	± 0.05	-5.38	± 0.03
9	-1.13	± 0.20	-1.47	± 0.05	-6.58	± 0.03
10	-0.82	± 0.13	-1.88	± 0.06	-7.96	± 0.04
11	0.00	± 0.00	-2.05	± 0.07	-8.98	± 0.04

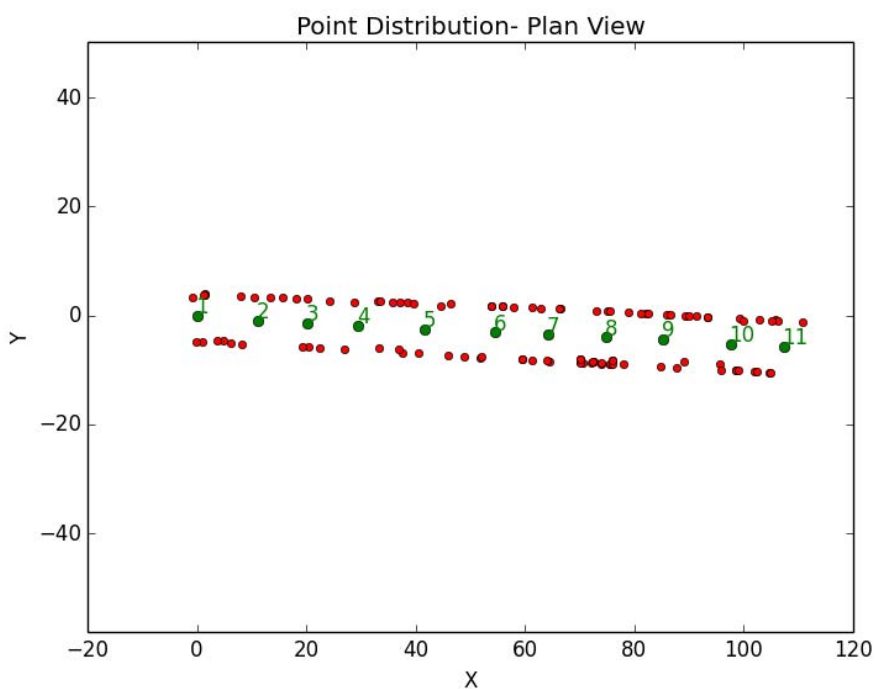
Πίνακας 4.15: Διορθώσεις των συντεταγμένων X,Y,Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Σημείο Λήψης	X(m)	$\sigma_x(m)$	Y(m)	$\sigma_y(m)$	Z(m)	$\sigma_z(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	11.27	± 0.15	-0.98	± 0.04	0.75	± 0.02
3	20.13	± 0.23	-1.40	± 0.04	1.27	± 0.02
4	29.54	± 0.30	-1.84	± 0.05	1.86	± 0.03
5	41.55	± 0.33	-2.52	± 0.05	2.54	± 0.03
6	54.44	± 0.32	-3.12	± 0.05	3.46	± 0.03
7	64.21	± 0.28	-3.58	± 0.05	4.30	± 0.03
8	74.87	± 0.24	-4.04	± 0.05	5.38	± 0.03
9	85.21	± 0.20	-4.36	± 0.05	6.59	± 0.03
10	97.54	± 0.13	-5.21	± 0.06	7.97	± 0.04
11	107.32	± 0.00	-5.71	± 0.07	8.98	± 0.04

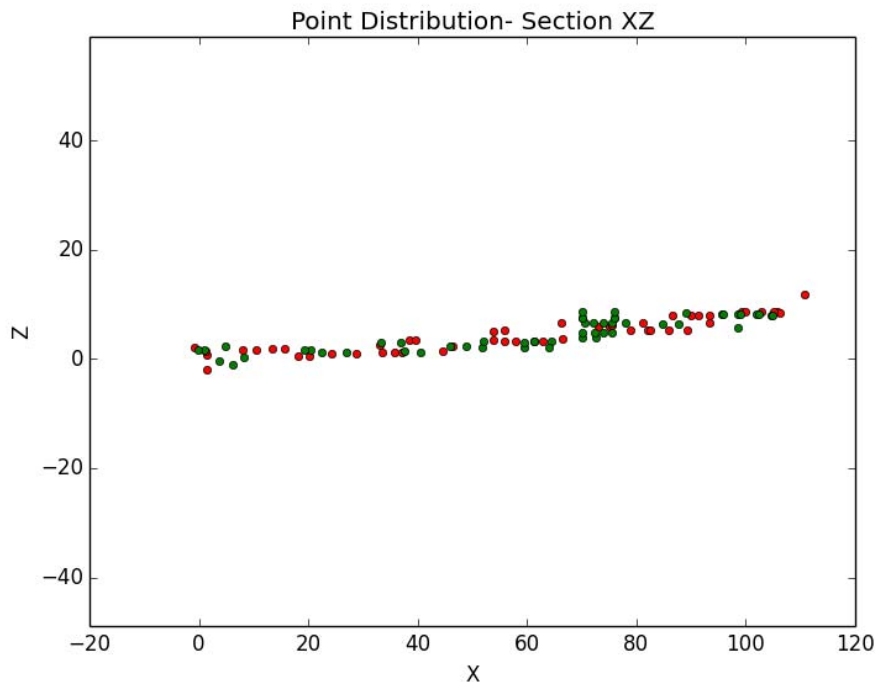
Πίνακας 4.16: Τελικές τιμές των συντεταγμένων X,Y,Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.



Εικόνα 4.44: : Χάρτης με τις θέσεις των αρχικών και των διορθωμένων σημείων λήψης σε υπόβαθρο Google Maps.



Εικόνα 4.45: Κατανομή των σημείων σκόπευσης σε κάτοψη. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία σκόπευσης και με πράσινο τα σημεία λήψης των πανοραμικών εικόνων. Σύστημα αναφοράς: Στραμμένο ΕΝΥ.



Εικόνα 4.46: Κατανομή του υψομέτρου των σημείων σκόπευσης (με κόκκινο και πράσινο τα σημεία στις δύο πλευρές του δρόμου). Τομή XZ.

Συγκρίνοντας τα εν λόγω αποτελέσματα με εκείνα της εφαρμογής του ίδιου αλγορίθμου στα δεδομένα της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου (βλ. 4.3.3) βλέπει κανείς ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της οδού Λέρου είναι ανώτερη σε σχέση με την ακρίβεια εκείνων της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου. Αυτό αποδίδεται κατά κύριο λόγο στην αλλαγή του συστήματος λήψης των εικόνων, από το R5 που είχε χρησιμοποιηθεί για την συλλογή πανοραμικών εικόνων το 2011 στο R7 που χρησιμοποιήθηκε για τις λήψεις του 2014 (βλ. και ενότητα 1.1.2).

Stats	$\sigma_x(m)$	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$
RMS	± 0.23	± 0.07	± 0.04
Max – Min	$\pm 0.35 - \pm 0.02$	$\pm 0.16 - \pm 0.05$	$\pm 0.08 - \pm 0.02$

Πίνακας 4.17: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης των συντεταγμένων των σημείων σκόπευσης κατά X, Y και Z.

Τα μεγαλύτερα σφάλματα που προκύπτουν για τις μεταθέσεις των κέντρων λήψης κατά την διεύθυνση του άξονα X αποδίδονται, όπως και προηγουμένως, στην ιδιαίτερα υψηλή συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων και την δέσμευση της τετμημένης της βάσης λήψης μεταξύ των σημείων λήψης της πρώτης και της τελευταίας πανοραμικής. Εδώ ο μέσος συντελεστής συσχέτισης κατά X είναι ίσος με 0.81.

4.4.2 Αποτελέσματα επίλυσης με ταυτόχρονη συνόρθωση όλων των εικόνων και προσδιορισμό μόνο του ΔZ

Στην ενότητα 3.2.9 έχει προταθεί ως εναλλακτικό μοντέλο συνόρθωσης των παρατηρήσεων μια απλοποιημένη εκδοχή του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε ως τώρα, στην οποία ως άγνωστες καθοριστικές παράμετροι του μοντέλου εισάγονται, πέρα από τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των παρατηρούμενων ομόλογων σημείων, οι

υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων λήψης των εικόνων. Δηλαδή εξαιρούνται οι όροι που αφορούν τις διορθώσεις B_X και B_Y για κάθε σημείο λήψης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου συνόρθωσης στα δεδομένα της οδού Λέρου συνοψίζονται στους Πίνακες 4.18–4.20. Το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους προέκυψε ίσο με 2.44 pixel, σχεδόν διπλάσιο σε σχέση με το αντίστοιχο $\widehat{\sigma}_0$ της λύσης του πλήρους συστήματος. Αυτό αποδίδεται στον εξαναγκασμό της γεωμετρίας του συστήματος από την συνόρθωση λόγω της δέσμωσης των συντεταγμένων X και Y κάθε εικόνας.

Σημείο Λήψης	$\Delta Z(m)$	$\sigma_{\Delta z}(m)$
1	0.00	± 0.00
2	-0.95	± 0.03
3	-1.51	± 0.04
4	-2.13	± 0.05
5	-2.82	± 0.05
6	-3.75	± 0.06
7	-4.57	± 0.06
8	-5.61	± 0.06
9	-6.80	± 0.06
10	-8.12	± 0.07
11	-9.05	± 0.07

Πίνακας 4.18: Διορθώσεις της συντεταγμένης Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Σημείο Λήψης	$X(m)$	$Y(m)$	$Z(m)$	$\sigma_z(m)$
1	0.00	0.00	0.00	± 0.00
2	12.03	-0.33	0.95	± 0.03
3	21.52	-0.67	1.51	± 0.04
4	31.62	-1.00	2.13	± 0.05
5	44.00	-1.44	2.82	± 0.05
6	56.56	-1.89	3.75	± 0.06
7	65.78	-2.22	4.57	± 0.06
8	76.32	-2.55	5.62	± 0.06
9	86.33	-2.89	6.80	± 0.06
10	98.36	-3.33	8.12	± 0.07
11	107.32	-3.66	9.05	± 0.07

Πίνακας 4.19: Τελικές τιμές της συντεταγμένης Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από την συνόρθωση των πανοραμικών εικόνων.

Stats	$\sigma_x(m)$	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$
RMS	± 0.23	± 0.25	± 0.26
Max – Min	$\pm 0.18 - \pm 0.03$	$\pm 0.17 - \pm 0.04$	$\pm 0.11 - \pm 0.04$

Πίνακας 4.20: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης των συντεταγμένων των σημείων σκόπευσης κατά X , Y και Z .

4.4.3 Αποτελέσματα επίλυσης με συνόρθωση των εικόνων ανά δύο

Τέλος, υλοποιήθηκε και μια επιπλέον παραλλαγή, κατά την οποία οι εικόνες συνορθώνονται ανά δύο με άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων σκόπευσης και τις διορθώσεις ΔY και ΔZ της δεύτερης κάθε φορά εικόνας του μοντέλου. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στους Πίνακες 4.21, 4.22 και 4.23. Ο Πίνακας 4.21 παρουσιάζει τις τιμές των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων ΔY , ΔZ και τις τυπικές αποκλίσεις τους, όπως αυτές προέκυψαν από τις διαδοχικές συνορθώσεις των εικόνων ανά δύο. Στον Πίνακα 4.22 παρουσιάζονται οι τελικές συντεταγμένες των σημείων μετά από την εφαρμογή των διορθωτικών όρων που προσδιορίστηκαν από την συνόρθωση. Η τιμή της τετμημένης X για κάθε σημείο θεωρείται γνωστή χωρίς σφάλμα (από τις συντεταγμένες που ανακτήθηκαν από το Google Street View). Τέλος, στον Πίνακα 4.23 παρατίθενται τα a posteriori τυπικά σφάλματα για κάθε ζεύγος εικόνων που συνορθώθηκε. Παρατηρείται πως λόγω της σύνδεσης μεταξύ μόνο δύο εικόνων τα σφάλματα των υψομετρικών διαφορών εμφανίζονται να είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα της λύσης της ενότητας 4.4.1, με τα σφάλματα των μεταθέσεων ΔY να είναι μεγαλύτερα και τα a posteriori τυπικά σφάλματα να κυμαίνονται μεταξύ 1 και 2 pixel.

Σημείο Λήψης	$\Delta Y(m)$	$\sigma_{\Delta Y}(m)$	$\Delta Z(m)$	$\sigma_{\Delta Z}(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	-0.70	± 0.03	-0.79	± 0.01
3	-0.10	± 0.11	-1.36	± 0.02
4	-0.20	± 0.15	-2.00	± 0.02
5	-0.34	± 0.09	-2.71	± 0.02
6	-0.11	± 0.06	-3.60	± 0.01
7	-0.22	± 0.05	-4.40	± 0.02
8	-0.15	± 0.02	-5.46	± 0.01
9	0.07	± 0.03	-6.63	± 0.01
10	-0.32	± 0.04	-7.97	± 0.01
11	-0.11	± 0.12	-8.90	± 0.02

Πίνακας 4.21: Διορθώσεις των συντεταγμένων Y, Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από τις συνορθώσεις των πανοραμικών εικόνων ανά δύο.

Σημείο Λήψης	X(m)	$\sigma_x(m)$	Y(m)	$\sigma_y(m)$	Z(m)	$\sigma_z(m)$
1	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00	0.00	± 0.00
2	12.03	± 0.00	-1.03	± 0.03	0.79	± 0.01
3	21.52	± 0.00	-0.77	± 0.11	1.35	± 0.02
4	31.62	± 0.00	-1.19	± 0.15	2.00	± 0.02
5	44.00	± 0.00	-1.78	± 0.09	2.71	± 0.02
6	56.56	± 0.00	-2.00	± 0.06	3.60	± 0.01
7	65.78	± 0.00	-2.44	± 0.05	4.40	± 0.02
8	76.32	± 0.00	-2.70	± 0.02	5.46	± 0.01
9	86.33	± 0.00	-2.82	± 0.03	6.63	± 0.01
10	98.36	± 0.00	-3.65	± 0.04	7.97	± 0.01
11	107.32	± 0.00	-3.77	± 0.12	8.89	± 0.02

Πίνακας 4.22: Καλύτερες τιμές των συντεταγμένων X, Y, Z των σημείων λήψης και τα τυπικά σφάλματά τους, όπως προέκυψαν από τις συνορθώσεις των πανοραμικών εικόνων ανά δύο.

Σημεία Λήψης	(1-2)	(2-3)	(3-4)	(4-5)	(5-6)	(6-7)	(7-8)	(8-9)	(9-10)	(10-11)
$\widehat{\sigma}_o$ (pixel)	0.98	1.97	1.84	1.76	0.96	1.89	0.79	0.93	1.01	1.88

Πίνακας 4.23: Α posteriori τυπικά σφάλματα που προέκυψαν από την συνόρθωση κάθε ζεύγους πανοραμικών εικόνων.

4.4.4 Έλεγχος των αποτελεσμάτων με εφαρμογή τρισδιάστατου μετασχηματισμού ομοιότητας

Για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε τρισδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας μεταξύ των αποτελεσμάτων από κάθε μια από τις τρεις παραπάνω λύσεις και ενός σημειοσυνόλου ελέγχου, το οποίο προσδιορίστηκε με μετρήσεις πεδίου.

Για την δημιουργία του σημειοσυνόλου ελέγχου μετρήθηκαν σημεία της πρόσοψης ενός κτιρίου επί της οδού Λέρου με μετροταινία. Η κατανομή των σημείων στο κτίριο απεικονίζεται στην Εικ. 4.47. Οι αντιστοιχίες μεταξύ των σημείων ελέγχου και των σημείων που προσδιορίστηκαν με την συνόρθωση δέσμης, καθώς και οι συντεταγμένες των σημείων στο σύστημα ελέγχου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.24.

Κωδικός Σημείου	Κωδικός στην Συνόρθωση	Συντεταγμένες των Σημείων στο Σύστημα Ελέγχου		
		X(m)	Y(m)	Z(m)
1	60	0.42	0	2.49
2	61	2.06	0	2.49
3	99	2.06	0	0.87
4	100	0.42	0	0.87
5	46	3.76	0	2.49
6	47	5.34	0	2.49
7	101	3.47	-0.27	0
8	102	3.47	-0.27	0.87
9	103	5.61	-0.27	0
10	104	5.61	-0.27	0.87
11	105	0	0	3.43
12	54	0	-0.68	3.43
13	106	5.7	0	3.43
14	55	5.7	-0.68	3.43
15	107	0	-0.68	4.4
16	108	5.7	-0.68	4.4

Πίνακας 4.24: Αντιστοίχιση των κωδικών των σημείων ελέγχου με τους κωδικούς των σημείων του μοντέλου. Συντεταγμένες των σημείων στο σύστημα ελέγχου.



Εικόνα 4.47: Σημειοσύνολο ελέγχου στην Οδό Λέρου.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή μετασχηματισμού ομοιότητας σε κάθε μια από τις προαναλυθείσες επιλύσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.25. Καθότι το σύστημα αναφοράς των δεδομένων ελέγχου είναι αυθαίρετα ορισμένο στον χώρο, οι τιμές των παραμέτρων μετάθεσης μεταξύ των σημειοσυνόλων μπορούν να αγνοηθούν. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν και για τις τρεις επιλύσεις είναι παρόμοια, με το $\hat{\sigma}_0$ να είναι 0.04 m για τις λύσεις που προέκυψαν με χρήση όλων των πανοραμικών εικόνων και 0.05 m για την λύση που προέκυψε από την συνόρθωση του ζεύγους των πανοραμάτων 7 και 8. Τα δύο βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εν λόγω διαδικασία είναι ότι: (α) η κλίμακα του μοντέλου προσεγγίζει σε ικανοποιητικό για την ποιότητα των εικόνων ποσοστό την κλίμακα του αντικειμένου, με τον συντελεστή κλίμακας να διαμορφώνεται στο 1.04 για το πλήρες μοντέλο, και (β) οι σχέσεις μεταξύ των μοντέλων που προέκυψαν από τους διαφορετικούς τρόπους συνόρθωσης και του μοντέλου ελέγχου περιγράφονται με ικανοποιητική ακρίβεια (σε σχέση με την ποιότητα της πληροφορίας των εικόνων της Google) από τον μετασχηματισμό ομοιότητας, και οι γωνίες στροφής περί τους άξονες X και Y είναι μικρές (η γωνία περί τον άξονα Z δεν αποτελεί προφανώς κριτήριο, αν και εδώ το σύστημα ελέγχου είναι χονδρικά προσανατολισμένο ως προς τον Βορρά).

Παράμετροι	Λύση με ν εικόνες		Λύση ΔZ με ν εικόνες		Λύση από εικόνες 7 και 8	
	x	σ_x	x	σ_x	x	σ_x
λ	1.041	± 0.004	1.037	± 0.004	1.025	± 0.004
ω°	0.622	± 0.421	0.667	± 0.417	0.636	± 0.455
ϕ°	0.154	± 0.222	0.124	± 0.222	0.093	± 0.243
κ°	1.893	± 0.269	1.618	± 0.263	1.395	± 0.286
$\Delta X(m)$	76.013	± 0.019	77.434	± 0.019	77.435	± 0.020
$\Delta Y(m)$	-8.917	± 0.027	-7.408	± 0.026	-7.476	± 0.028
$\Delta Z(m)$	3.980	± 0.019	4.215	± 0.019	-0.306	± 0.020
σ_0 a posteriori	0.04 m		0.04 m		0.05 m	

Πίνακας 4.25: Αποτελέσματα μετασχηματισμού ομοιότητας μεταξύ των δεδομένων ελέγχου και των αποτελεσμάτων των τριών εναλλακτικών επιλύσεων.

4.4.5 Έλεγχος των κλίσεων

Σε αυτή την τελευταία ενότητα διερευνώνται η ακρίβεια και η ορθότητα των κλίσεων που προκύπτουν για την οδό Λέρου από τις διορθωμένες συντεταγμένες των σημείων λήψης των εικόνων που έχουν προκύψει από την συνόρθωση με κάθε μια από τις ανωτέρω μεθόδους. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ακόμη μια επίλυση με συνόρθωση των εικόνων ανά δύο και παρατήρηση μόνο δύο ομόλογων σημείων ανά ζεύγος εικόνων, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα προσδιορισμού των κλίσεων οδών από πολύ λίγα σημεία παρατήρησης.

Η ακρίβεια προσδιορισμού των κλίσεων υπολογίζεται με νόμο μετάδοσης μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας με βάση τις ήδη προσδιορισμένες αβεβαιότητες των συντεταγμένων των σημείων λήψης που έχουν προκύψει από την συνόρθωση (βλ. ενότητα 4.2). Η ακρίβεια προσδιορίζεται μόνο για την περίπτωση συνόρθωσης πολλαπλών πανοραμάτων με προσδιορισμό των διορθώσεων $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ για κάθε εικόνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.26 και 4.27.

	K12	K23	K34	K45	K56	K67	K78	K89	K910	K1011
K12	5.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	0.00E+00	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	-2.00E-06	-2.00E-06	-2.00E-06
K23	1.00E-06	4.00E-06	1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	-2.00E-06	-2.00E-06
K34	1.00E-06	1.00E-06	4.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	-2.00E-06
K45	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06
K56	-1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
K67	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	0.00E+00
K78	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-06	2.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
K89	-2.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	0.00E+00	1.00E-06	1.00E-06	3.00E-06	2.00E-06	1.00E-06
K910	-2.00E-06	-2.00E-06	-1.00E-06	-1.00E-06	0.00E+00	1.00E-06	1.00E-06	2.00E-06	5.00E-06	2.00E-06
K1011	-2.00E-06	-2.00E-06	-2.00E-06	-1.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-06	1.00E-06	2.00E-06	9.00E-06

Πίνακας 4.26: Πίνακας Μεταβλητότητας-Συμμεταβλητότητας των Κλίσεων.

Κλίση	$\sigma(\%)$
K12	± 0.2
K23	± 0.2
K34	± 0.2
K45	± 0.1
K56	± 0.1
K67	± 0.1
K78	± 0.1
K89	± 0.2
K910	± 0.2
K1011	± 0.3

Πίνακας 4.27: Τυπικό σφάλμα των κλίσεων όπως προέκυψε από Νόμο Μετάδοσης Μεταβλητοτήτων των αποτελεσμάτων της συνόρθωσης πολλαπλών πανοραμικών εικόνων.

Για τον έλεγχο της ορθότητας των κλίσεων που προκύπτουν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου με χρήση οπτικού κλισιμέτρου και σταδίας. Το κλισίμετρο που χρησιμοποιήθηκε είχε διαγράμμιση ανά μισό βαθμό (grad) και η θεωρητική ακρίβεια της παρατήρησης εκτιμάται ίση με 0.25 grad. Ο έλεγχος εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα και των τεσσάρων μοντέλων που αναφέρονται προηγουμένως. Οι κλίσεις που προέκυψαν από κάθε συ-

νόρθωση και από τις μετρήσεις πεδίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.28 και την Εικ. 4.48. Η στήλη με τον χαρακτηρισμό “Πλήρης” αναφέρεται στα αποτελέσματα της συνόρθωσης όλων των πανοραμικών εικόνων με ταυτόχρονο προσδιορισμό των $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ κάθε εικόνας. Αντίστοιχα, η στήλη “Ανά δύο” αναφέρεται στην συνόρθωση των εικόνων ανά δύο, η στήλη “Λίγα” στην συνόρθωση των εικόνων ανά δύο με χρήση μόνο 2 ομόλογων σημείων ανά ζεύγος και η στήλη “ΔΖ” στην συνόρθωση όλων των εικόνων με παράλληλο προσδιορισμό του ΔZ για την κάθε εικόνα. Το τελευταίο πεδίο αφορά τα δεδομένα ελέγχου που προέκυψαν από την μετατροπή των γωνιομετρήσεων σε κλίσεις ($\text{Κλίση} = \tan(\gamma\omega\nu\iota\alpha\varsigma)$).

Για την αξιολόγηση της ορθότητας μπορεί να προσδιοριστεί και η μέση τετραγωνική διαφορά (RMSD) μεταξύ των κλίσεων κάθε προσέγγισης και των δεδομένων ελέγχου. Το RMSD προκύπτει ως:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\tilde{x}_i - x_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

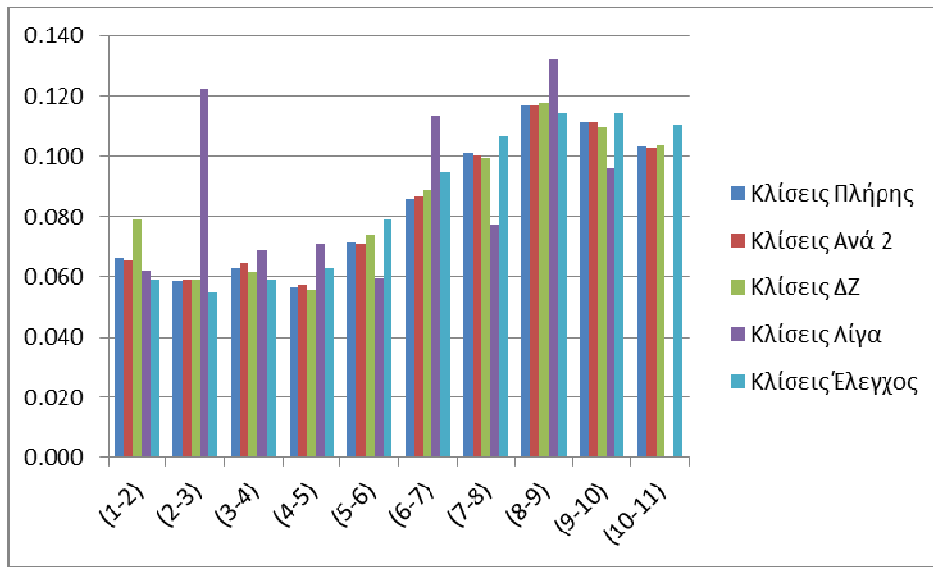
όπου \tilde{x}_i η εκτιμώμενη τιμή της κλίσης από το μοντέλο που προέκυψε από την συνόρθωση και x_i η τιμή της κλίσης από το μοντέλο ελέγχου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.29.

Ευθύγραμμα τμήματα	Κλίσεις (%)				
	Πλήρης	Ανά 2	ΔΖ	Λίγα	Έλεγχος
(1-2)	6.6	6.5	7.9	6.2	5.9
(2-3)	5.9	5.9	5.9	12.2	5.5
(3-4)	6.3	6.4	6.1	6.9	5.9
(4-5)	5.7	5.7	5.6	7.1	6.3
(5-6)	7.1	7.1	7.4	5.9	7.9
(6-7)	8.6	8.7	8.9	11.4	9.5
(7-8)	10.1	10.1	10.0	7.7	10.6
(8-9)	11.7	11.7	11.8	13.2	11.4
(9-10)	11.2	11.1	11.0	9.6	11.4
(10-11)	10.3	10.3	10.4	-	11.0

Πίνακας 4.28: Κλίσεις- Αποτελέσματα

RMSD (%)	
Λύση ‘Πλήρης’	0.58
Λύση ‘ΔΖ’	0.81
Λύση ‘ανά 2’	0.59
Λύση ‘Λίγα’	4.37

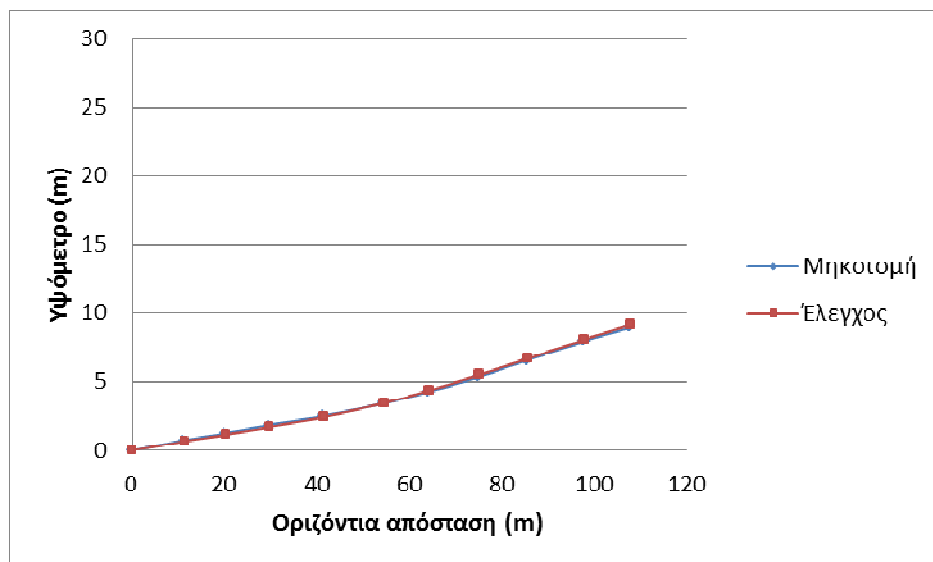
Πίνακας 4.29: RMSD των λύσεων.



Εικόνα 4.48: Διάγραμμα με τις κλίσεις μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων που σχηματίζονται από διαδοχικά σημεία λήψης.

Από τον Πίνακα 4.29 παρατηρεί κανείς ότι οι μικρότερες τιμές του RMSD προκύπτουν από την λύση όλων των εικόνων με παράλληλο προσδιορισμό των του σημείου λήψης κάθε εικόνας αλλά και από την συνόρθωση των εικόνων ανά δύο, αλλά με χρήση όλων των ομολογιών που παρατηρήθηκαν. Το σφάλμα στην κλίση είναι της τάξης του 0.5%, γεγονός από το οποίο και τεκμαίρεται η δυνατότητα αξιοποίησης σε διάφορες εφαρμογές των κλίσεων που προέκυψαν.

Τέλος, στην Εικ. 4.49 παρουσιάζονται (σε διαφορετική οριζοντιογραφική και υψομετρική κλίμακα) οι μηκοτομές της οδού Λέρου, όπως αυτές προέκυψαν από τα αποτελέσματα της συνόρθωσης του πλήρους μοντέλου και την άμεση μέτρηση με το κλισίμετρο.



Εικόνα 4.49: Μηκοτομές της οδού Λέρου όπως προέκυψαν από την συνόρθωση (μπλε) και τις μετρήσεις πεδίου.

Συμπεράσματα- Προτάσεις

Συνοψίζοντας, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία για την αξιοποίηση της γεωμετρικής πληροφορίας των πανοραμάτων του Google Street View. Επίσης διερευνήθηκαν ζητήματα που αφορούν την ποιότητα των πανοραμικών εικόνων καθώς και την ακρίβεια και ορθότητα των προς αξιοποίηση δεδομένων. Ένα πρόσθετο αντικείμενο της διπλωματικής ερασίας αφορούσε την περιγραφή της διαδικασίας σύνθεσης πανοραμικών εικόνων από επικαλυπτόμενα καρέ και στην ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας.

Βασικό προϊόν της εργασίας είναι η διαδικασία που προτάθηκε και εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων, με ταυτόχρονο προσδιορισμό των διορθώσεων των συντεταγμένων των σημείων λήψης μέσω πολυ-πανοραμικής συνόρθωσης δέσμης. Με την εφαρμογή της εν λόγω διαδικασίας σε δύο μελέτες περίπτωσης προέκυψαν ορισμένα βασικά συμπεράσματα που αφορούν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και, κατ'επέκταση, την αξιολόγηση της ποιότητας της γεωμετρικής πληροφορίας που μπορεί κανείς να εξάγει από δεδομένα του Google Street View.

Η αξιοπιστία γεωαναφοράς των μοντέλων που προέκυψαν από την συνόρθωση δέσμης είναι της τάξης των λίγων μέτρων (1-2 m) όσον αφορά την θέση τους και της τάξης της 1° όσον αφορά τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τον Βορρά. Η κλίμακα των μοντέλων που προέκυψαν δεν διαφέρει περισσότερο από 5% από την πραγματική κλίμακα των αντικειμένων. Επιπλέον, ένα βασικό συμπέρασμα που συνάγεται από τα αποτελέσματα αφορά την βελτίωση της παρεχόμενης πληροφορίας στις νέες λήψεις του Google Street View. Από τις εφαρμογές προέκυψε ότι οι πανοραμικές εικόνες με έτος λήψης το 2011, οι οποίες έκαναν χρήση του παλαιότερου συστήματος συλλογής των εικόνων R5, είναι μειωμένης εσωτερικής ακρίβειας σε σχέση με τις εικόνες που συλλέχθηκαν στην πρόσφατη ανανέωση των δεδομένων του Street View το 2014 και χρησιμοποιούν σύστημα λήψης R7.

Ο προσδιορισμός των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των σημείων λήψης είναι κατά μια τάξη μεγέθους ακριβέστερος σε σχέση με τις οριζόντιες συντεταγμένες X και Y. Με αξιοποίηση της υψομετρικής πληροφορίας που υπολογίζεται από την εφαρμογή της συνόρθωσης δέσμης στα πανοράματα προκύπτει ένα επιπλέον παράγωγο του αλγορίθμου, το οποίο αφορά την εκτίμηση των κλίσεων των οδών που εξετάζονται κατά την συνόρθωση. Οι κλίσεις προσδιορίστηκαν εδώ με ακρίβεια της τάξης του 0.5%.

Τα δεδομένα του Google Street View, παρότι δεν είναι υψηλής ακρίβειας, μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές όπως η ανίχνευση μεταβολών σε αστικό περιβάλλον (change detection), η γεωαναφορά εικόνων (image localization) και η πλοήγηση σε αστικό περιβάλλον με χρήση εικόνων.

Ένα ανοιχτό ερευνητικό θέμα αποτελεί η περαιτέρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας που αναπτύχθηκε, μέσω του αυτόματου προσδιορισμού ομολογιών μεταξύ των εικόνων. Οι συμβατικοί τελεστές συνταύτισης, όπως οι τελεστές SIFT και SURF, δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις που θέτουν οι πολύ μεγάλες βάσεις λήψης των εικόνων του Street View. Θα μπορούσαν να εξεταστούν ειδικά προσαρμοσμένες μέθοδοι, όπως η "αποσύνθεση" των πανοραμικών σε συμβατικά καρέ και η διερεύνηση της δυνατότητας συνταύτισής τους με τελεστές ανθεκτικούς στις αφινικές παραμορφώσεις, όπως ο MSER και ο Affine SIFT. Εναλλακτικά, το πρόβλημα θα μπορούσε βέβαια να λυθεί με την πυκνότερη χωρική κάλυψη σε μελλοντικές εκδόσεις της υπηρεσίας.

Επίσης, μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή που θα μπορούσε να αναπτυχθεί αφορά τον προσανατολισμό των

πανοραμικών εικόνων μέσω της συνθήκης συνεπιπεδότητας και την εφαρμογή της συνόρθωσης δέσμης σε ένα μπλοκ πανοραμικών εικόνων σε αυθαίρετη κλίμακα και χωρίς την χρήση των παρεχόμενων μεταδεδομένων για την εκ των υστέρων σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν με τα δεδομένα θέσης και προσανατολισμού της Google.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Agarwal P., Burgard W., and Luciano S., 2015. *Metric localization using Google Street View*. arXiv preprint arXiv:1503.04287v1, 14 March 2015

Agarwala A., Dontcheva M., Agarwala M., Drucker S., Colburn A., Curless B., Salesin D., Cohen M., 2004. Interactive digital photomontage. *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 292-300

Aguerreberre C., Delon J., Gousseau Y., Musé P., 2012. *Best algorithms for HDR image generation. A study of performance bounds*. HAL archives-ouvertes.fr <hal-00733853v1>

Aly M., and Bouguet J.-Y., 2012. Street View goes indoors: automatic pose estimation from uncalibrated unordered spherical panoramas. *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, pp. 1-8

Anguelov D., Dulong C., Filip D., Frueh C., Lafon S., Lyon R., Ogale A., Vincent L., Weaver J., 2010. Google Street View: capturing the world at street level. *Computer*, vol.43, no. 6, pp. 32-38.

Bader M.D., Mooney S.J., Lee Y.J., Sheehan D., Neckerman K.M., Rundle A.G., Teitler J.O., 2015. Development and deployment of the Computer Assisted Neighborhood Visual Assessment System (CANVAS) to measure health-related neighborhood conditions. *Health Place*, Jan 31, pp. 163-72

Baker S. and Matthews I., 2004. Lucas-Kanade 20 years on: a unifying framework. *International Journal of Computer Vision*, Volume 56 Issue 3, pp. 221 – 255.

Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L., 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. 9th *European Conference on Computer Vision*, Graz, Austria, pp. 404-417

Blackman J., 2009. *Omniveillance, Google, Privacy in Public, and the Right to Your Digital Identity: A Tort for Recording and Disseminating an Individual's Image over the Internet*. 49 Santa Clara L. Rev. 313 (2009).

Brown M., and Lowe D. G., 2007. Automatic panoramic image stitching using invariant features. *International Journal of Computer Vision* Vol. 74(1), pp. 59–73

Burt P. J., and Anderson E. H., 1983. A multiresolution spline with application to image mosaics. *ACM Transactions on Graphics*, vol. 2, no. 4, pp. 217-236

Canny J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. PAMI-8, Issue: 6, pp. 679 – 698

Cruz-Mota J., Bogdanova I., Paquier B., Bierlaire M., Thiran J.-P., 2012. Scale invariant feature transform on the sphere: theory and applications. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 98, Issue 2, pp. 217-241

Davis J., 1998. Mosaics of scenes with moving objects. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'98)*, pp. 354-360

Fangi G., Nardinocchi C., 2013. Photogrammetric processing of spherical Panoramas. *The Photogrammetric Record*, Vol. 28, Issue 143, pp. 293–311

- Fangi G., 2015. Towards an easier orientation for spherical photogrammetry. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W4, 2015, pp.279-283
- Fischler, M., Bolles, R., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 24(6), pp. 381-395
- Förstner, W., 1986. A feature-based correspondence algorithm for image matching and least squares matching. In *International Archives of Photogrammetry*, 26(3/3), pp. 150-166
- Frome A., Cheung G., Abdulkader A., Zennaro M., Wu B., Bissacco A., Hartwig A., Neven H., and Vincent L., 2009. Large-scale privacy protection in Google. *Proc. 12th IEEE International Conference of Computer Vision (ICCV 09)*, IEEE Press, Available at http://research.google.com/archive/papers/cbprivacy_iccv09.pdf
- Gade K. , 2010. A non-singular horizontal position representation. *The Journal of Navigation*, Vol. 63, no. 3, pp.395 -417 2010: http://www.navlab.net/Publications/A_Nonsingular_Horizontal_Position_Representation.pdf
- Geissler Roger C., 2012. Private eyes watching you: Google Street View and the right to an inviolate personality. *Hastings Law Journal*, 63 Hastings L.J. 897
- Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. *Proc. 4th Alvey Vision Conference*, pp. 147-151
- Hartley R. I., 1994. Self-calibration from multiple views of a rotating camera. *Third European Conference on Computer Vision (ECCV'94)*, volume 1, pages 471–478, Stockholm, Sweden. Springer-Verlag. Διαθέσιμο στο URL: <http://users.cecs.anu.edu.au/~hartley/Papers/calibration/eccv94/calib.pdf>
- Hartley, R. and Zisserman, A., 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edition, Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.
- Havlena M., 2012. *Incremental Structure from Motion for Large Ordered and Unordered Sets of Images*. PhD Dissertation, Center for Machine Perception, Department of Cybernetics, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague.
- Kang S. B. and Szeliski, R. 1996. 3-D scene data recovery using omnidirectional multibaseline stereo. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'96)*, pp. 364–370
- Ke Y. and Sukthankar R., 2004. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors. *Proc. of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Washington, USA, pp. 511–517
- Klingner B., Martin D., and Roseborough J., 2013. Street View Motion-from-Structure-from-Motion. *Proc. International Conference on Computer Vision*, pp. 953- 960, IEEE
- Kosecka J., Zhang W., 2002. Video compass. *Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision (ECCV '02)-Part IV*, pp.476–490. Springer-Verlag, London, UK
- Longuet-Higgins, H.C., 1981. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293,

pp. 133-135.

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

Lucas, B. and Kanade T., 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674–679.

Luhmann, T. and Tecklenburg, W., 2004. 3D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/W16). 8 pages (on CDROM). Link: http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/5-W16/papers/PanoWS_Dresden2004_Luhmann_b.pdf

Majdik A., Albers-Schoenberg Y., and Scaramuzza D., 2013. MAV urban localization from google street view data. *Intelligent Robots and Systems (IROS) 2013*, pp. 3979- 3986, IEEE

Mann S. and Picard R. W., 1995. On being ‘undigital’ with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures. *Proc. Information Systems and Technology*, 48th annual conference, Cambridge, Massachusetts, pp. 442–448

Mikolajczyk K., Schmid C., 2005. A performance evaluation of local descriptors. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Vol. 27, Issue 10, pp.1615–1630

Moravec, H.P., 1979. Visual mapping by robot rover. *Proc. 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 598-600

Morel J.-M., Yu G., 2009. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 438–469

Muja M. and Lowe D. G., 2014. Scalable nearest neighbor algorithms for high dimensional data. *Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI 2014)*, Vol. 36, pp. 2227 - 2240

NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY, 2014. *The Universal Grids and the Transverse Mercator and Polar Stereographic Map Projections*. 2014-03-25, STANDARDIZATION DOCUMENT Implementation Practice, Version2, Available at: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_SIG_0012_2_0_0_UTMUPS/NGA.SIG.0012_2.0.0_UTMUPS.pdf

Nister D. , 2004. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, Vol. 26, Issue 6, pp.756–770

Pagani A., and Stricker D., 2011. Structure from motion using full spherical panoramic cameras. *International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, pp. 375-382, IEEE

Pylvänäinen T., Roimela K., Vedantham R., Itaranta J., Wang R., and Radek Grzeszczuk, 2010. Automatic alignment and multi-view segmentation of street view data using 3D shape priors. *Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT 2010)*, Vol. 737, pp. 738-739

- Rundle A. G., Bader M. D., Richards M., Catherine A., Neckerman K. M. and Teitler J. O., 2011, Using Google Street View to audit neighborhood environments. *American Journal of Preventive Medicine*, Vol. 40, Issue 1, pp. 94–100, doi: 10.1016/j.amepre.2010.09.034
- Salmen J., Houben S., Schlipising M., 2012. Google street view images support the development of vision-based driver assistance systems. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, pp. 891-895
- Sato T., Pajdla T., Yokoya N., 2011. Epipolar geometry estimation for wide-baseline omnidirectional street view images. *International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops 2011)*, pp. 56 – 63, IEEE
- Schmid C., Mohr R., and Bauckhage C., 2000. Evaluation of interest point detectors. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 37, Issue 2, pp. 151–172
- Schneider D., Maas H.-G., 2004. Development and application of an extended geometric model for high resolution panoramic cameras. *XXth ISPRS Congress*, Technical Commission V, pp. 366-371
- Schneider D., Maas H.-G., 2007. Integrated bundle adjustment with variance component estimation: Fusion of terrestrial laser scanner data, panoramic and central perspective image data. *Proc. ISPRS Workshop Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, pp. 373-378
- Seeber G., 2003. *Satellite Geodesy*. Berlin New York: Walter de Gruyter
- Shum H.-Y., Han M., Szeliski R., 1998. Interactive construction of 3D models from panoramic mosaics. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '98)*, pp. 427-433
- Stallkamp J., Schlipising M., Salmen J., and Igel C., 2011. The german traffic sign recognition benchmark: A multi-class classification competition. *Proc. IEEE International Joint Conference on Neural Networks 2011*, pp. 1453–1460
- Stegmann M. B., 2001. *Image Warping*. Notes, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark. Διαθέσιμο στο σύνδεσμο: <https://cs.brown.edu/courses/csci1950-g/asgn/proj6/resources/ImageWarping.pdf>
- Szeliski R., 2006. Image alignment and stitching: a tutorial. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-104. <http://dx.doi.org/10.1561/0600000009>
- Szeliski R., and Shum H.-Y., 1997. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. *SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 251-258. <http://research.microsoft.com/pubs/75673/Szeliski-SG97.pdf>
- Taneja A., Ballan L. and Pollefeys M., 2011. Image based detection of geometric changes in urban environments. *International Conference in Computer Vision (ICCV 2011)*, pp. 2336-2343, IEEE, Barcelona, Spain
- Taneja A., Ballan L. and Pollefeys M., 2012. Registration of spherical panoramic images with cadastral 3D models. *Proc. Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission (3DIMPVT '12)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp 479-486

- Taneja A., Ballan L. and Pollefeys M., 2013. City-scale change detection in cadastral 3D models using Images. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2013)*, pp. 113-120
- Taneja A., Ballan L. and Pollefeys M., 2015. Never get lost again: vision based navigation using StreetView Images. *ACCV 2014, Lecture Notes in Computer Science*, Volume 9007, pp 99-114
- Torii A., Havlena M., Padjla T., 2009. From Google Street View to 3D city models. *IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, pp. 2188-2195
- Torii A., Imiya A., and Ohnishi, N., 2005. Two- and three-view geometry for spherical cameras. *6th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Network and Non-classical Cameras*, Beijing, China (on CD-ROM)
- Triggs B., Mclauchlan P., Hartley R., and Fitzgibbon ., 2000. Bundle adjustment –a modern synthesis. *Lecture Notes in Computer Science; Vision Algorithms: Theory and Practice*, Springer-Verlag, pp.298–372. Available at: <http://hal.univ-grenoble-alpes.fr/file/index/docid/548290/filename/Triggs-va99.pdf>
- Tsai V. J. D., Chun-Ting C., 2012a. Feature positioning on Google Street View panoramas. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-4, 2012 XXII ISPRS Congress, pp. 305-309
- Tsai Victor J. D., Chun-Ting Chang, 2012b. Three-dimensional positioning from Google street view panoramas. *Image Processing, IET*, Vol. 7 , Issue 3 ,pp. 229 - 239
- Uyttendaele M., Eden A., and Szeliski R., 2001. Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2001)*, vol. II, pp. 509-514
- Ventura J., Höllerer T., 2013. Structure and motion in urban environments using upright panoramas. *Virtual Reality*, Volume 17, Issue 2, pp 147-156, Springer-Verlag
- Wells S., Gross B., Gross M., Frischer B., 2007. *IATH Best Practices Guide to Digital Panoramic Photography*. University of Virginia.
- Xiong Y., Turkowski K., 1998. Registration, calibration and blending in creating high quality panoramas. *Proc. 4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, WACV '98*.
- Yu G., Morel J.-M., 2011. ASIFT: An algorithm for fully affine invariant comparison. *Image Processing On Line*. <http://dx.doi.org/10.5201/ipol.2011.my-asift>
- Zamir A. R., and Shah M., 2011. Accurate image localization based on Google Maps Street View. *11th European Conference on Computer Vision (ECCV 2010)*, Part IV, pp. 255-268
- Αδάμ Κ., 2011. *Γεωμετρία του Στερεοζεύγους από Βαθμονομημένες και από Μη Βαθμονομημένες Μηχανές*. Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ
- Βεης Γ., Μπιλλίρης Χ., Παπαζήση Κ., 2009. *Κεφάλαια Ανώτερης Γεωδαισίας*. Σημειώσεις Σ.Α.Τ.Μ Ε.Μ.Π.
- Καλησπεράκης Η., 2010. *Η Επιπολική Γεωμετρία στον Ευκλείδειο και τον Προβολικό Χώρο*. Διδακτορική

Διατριβή, ΣΑΤΜ ΕΜΠ

Μπούσιας- Αλεξάκης, Ευάγγελος, 2013. *Προσομοίωση Προηγμένων Τεχνικών Εκτίμησης και Βελτίωσης Σχεδιασμού και Μελέτης Δορυφορικών Γεωδαιτικών Συστημάτων Επόμενης Γενιάς*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Available at: <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/8766>

Πέτσα, Ε., 2000. *Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*. Σπουδαστικές σημειώσεις, Τμήμα Τοπογραφίας ΤΕΙ Αθήνας.

Φωτίου, Α., Πικρίδας, Χ., 2006. *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*. Εκδόσεις Ζήτη

Βιβλιογραφικές Αναφορές από Ιστοσελίδες

Farber D., 2012. *Google takes Street View off-road with backpack rig*. Retrieved August 12, 2015, Available at: <http://www.cnet.com/news/google-takes-street-view-off-road-with-backpack-rig/>

Gershgorin Dave, 30 July 2015. Google Will Start Mapping Pollution The Same Way They Map Streets. *Popular Science*. Retrieved 12 August 2015, Available at: <http://www.popsoci.com/google-will-start-mapping-pollution-same-way-they-map-streets>

Google Developers, 2015a. *Street View Service*. Τελευταία ενημέρωση: 1η Σεπτεμβρίου, 2015, Διεύθυνση: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/streetview> Ανάκτηση: 8 Σεπτεμβρίου 2015

Google Developers, 2015b. *Google Maps JavaScript API V3 Reference*. Τελευταία ενημέρωση: 4 Αυγούστου, 2015, Διεύθυνση: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/reference> Ανάκτηση: 8 Σεπτεμβρίου 2015

Google, 2015a, *Παρασκήνιο Street View*, <https://www.google.com/intl/el/maps/about/behind-the-scenes/streetview/> Retrieved August 13, 2015

Google, 2015b. *Google Street View Image API*. Available at: https://developers.google.com/maps/documentation/streetview/intro#api_key , Retrieved: 6-9-2015

Levoy M., 2004. *The Stanford CityBlock Project: multi-perspective panoramas of city blocks*. Retrieved August 12, 2015, Available at: <http://graphics.stanford.edu/projects/cityblock/>

Sanz Subirana J. S., Zornoza J.M. J., and Hernández-Pajares M., 2011. *Transformations between ECEF and ENU coordinates*. ESA, Available at: http://www.navidia.net/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates

Wikipedia, *Google Street View* (4 August, 2015), Retrieved August 11, 2015 Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Street_View#cite_note-computer-17

Zach Miners, 2015, The vanishing: What happened to Google Street View's missing streets. *PCworld*, Jul 9, 2015, Ανακτήθηκε στις 8-9-2015, διεύθυνση: <http://www.pcworld.com/article/2946372/the-curious-case-of-google-street-views-missing-streets.html>

