



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΠΑΝΟΡΑΜΑΤΩΝ

Νικόλαος Καμζέλας

Επιβλέπων: **Ανδρέας Γεωργόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα

Οκτώβριος 2015

Περίληψη

Δίκτυα πανοραμικών εικόνων έχουν αξιοποιηθεί με επιτυχία στην απόδοση εσωτερικών κι εξωτερικών χώρων. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυνατότητα και την ακρίβεια εξαγωγής μετρητικής πληροφορίας από ζεύγος κυλινδρικών πανοραμικών εικόνων με κατακόρυφη βάση, δηλαδή κοινή οριζοντιογραφική θέση και διαφορετικό υψόμετρο, με χρήση της εξίσωσης συγγραμμικότητας.

Στα πλαίσια της διερεύνησης της συμπεριφοράς της διάταξης, καταστρώθηκαν γεωμετρικά μοντέλα που περιγράφουν τη σχέση της ακρίβειας με παραμέτρους όπως η βάση λήψης και η απόσταση από το αντικείμενο. Τα μοντέλα αυτά δοκιμάστηκαν σε καθεστώς προσομοίωσης, όπου με χρήση λογισμικού σχεδίασης παρήχθησαν και στη συνέχεια μετρήθηκαν πανοραμικές εικόνες ενός εικονικού πεδίου ελέγχου.

Τελικά, η μέθοδος δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες, με την παραγωγή και μέτρηση δύο πανοραμικών εικόνων εσωτερικού χώρου με σκοπό την απόδοσή του και ένταξη σε γεωδαιτικό σύστημα. Τα αποτελέσματα σχετικά με την ακρίβεια αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με τις προβλέψεις.

Τα συμπεράσματα που συνάγονται από την όλη διαδικασία είναι ότι αν και η μέθοδος, στη μορφή που εξετάστηκε, δεν είναι βιώσιμη, μπορεί με ορισμένες προτεινόμενες παραλλαγές να αποδειχθεί χρήσιμη στην αποτύπωση μικρών χώρων σε τοπικό σύστημα.

Abstract

Networks of panoramic images have been successfully utilized for the mapping of both indoor and outdoor areas. This thesis examines the possibility and accuracy of extracting measurements from a pair of cylindrical panoramic images with vertical baseline, that is, a common horizontal position and different height, by means of the collinearity equation.

The examination of the behavior of the setup prompted the development of geometric models describing the relationships between the accuracy and parameters such as the baseline and distance from object. These models were tested under a simulated environment, wherein panoramic images of a virtual control field were created by means of design software and subsequently measured.

Finally, the method was tested under real circumstances by acquisition and measurement of two indoor panoramic images, with the aim of mapping and incorporating the target area into a geodetic datum. The results regarding accuracy were analyzed and compared to the predictions.

The conclusion reached after the completion of the process is that this method, in the particular form in which it was examined, is not viable. It can, however, with some adjustments, prove useful in the mapping of small areas in a local reference frame.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	II
Abstract	IV
Περιεχόμενα	VI
Κατάλογος πινάκων	VII
Κατάλογος διαγραμμάτων	VII
Κατάλογος εικόνων	VIII
Εισαγωγή	X
Πανοραμική φωτογραφία	XI
Προβολές	XI
Μέθοδοι παραγωγής – εξοπλισμός	XII
1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	2
2. Ανάπτυξη μεθοδολογίας	6
2.1. Μαθηματικό μοντέλο	6
2.2. Προσεγγιστικό μοντέλο ακρίβειας.....	7
2.2.1. Εμπροσθοτομία	7
2.2.2. Οπισθοτομία	9
3. Διερεύνηση μεθοδολογίας μέσω προσομοίωσης	12
3.1. Εικονικό πεδίο ελέγχου – πανοραμικές εικόνες.....	12
3.2. Απόδοση αντικειμένου – εμπροσθοτομία.....	13
3.3. Εξωτερικός προσανατολισμός – οπισθοτομία.....	16
4. Πρακτική εφαρμογή	20
4.1. Αναγνώριση του χώρου	20
4.2. Λήψη.....	20
4.3. Συρραφή – απόδοση	21
4.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	24
4.4.1. Εξωτερικός προσανατολισμός – οπισθοτομία.....	24
4.4.2. Ολοκληρωμένη επίλυση	26
5. Συμπεράσματα – προτάσεις	30
6. Βιβλιογραφία	32
7. Παράρτημα	A

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1: Ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων από σύστημα πανοραμικών εικόνων (Schneider & Maas, 2005)	3
Πίνακας 3-1: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση θέσης	16
Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση στροφών	17
Πίνακας 4-1: Σφάλμα συρραφής πανοραμικών εικόνων	21
Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα οπισθοτομίας εφαρμογής, σφάλμα θέσης και στροφών	24
Πίνακας 4-3: Σφάλμα οπισθοτομίας εφαρμογής συναρτήσει των συνδυασμών φωτοσταθερών	26
Πίνακας 7-1: Συντεταγμένες φωτοσταθερών πρακτικής εφαρμογής	D

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3-1: Κατανομή σφάλματος εμπροσθοτομίας	14
Διάγραμμα 3-2: Μέσο σφάλμα εμπροσθοτομίας προσομοίωσης συναρτήσει βάσης λήψης	15
Διάγραμμα 3-3: Σφάλμα εμπροσθοτομίας προσομοίωσης συναρτήσει αντικειμενικής απόστασης.....	15
Διάγραμμα 3-4: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση θέσης	18
Διάγραμμα 3-5: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση στροφών	18
Διάγραμμα 4-1: Αποτελέσματα οπισθοτομίας εφαρμογής, σφάλμα θέσης	24
Διάγραμμα 4-2: Αποτελέσματα οπισθοτομίας εφαρμογής, σφάλμα στροφών	25
Διάγραμμα 4-3: Κατανομή αναλογικού σφάλματος εμπροσθοτομίας εφαρμογής.....	27
Διάγραμμα 4-4: Σφάλμα εμπροσθοτομίας εφαρμογής συναρτήσει αντικειμενικής απόστασης.....	28

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2-1: Μαθηματικό μοντέλο πανοραμικής εικόνας κυλινδρικής προβολής	6
Εικόνα 2-2: Μοντέλο ακρίβειας φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας	8
Εικόνα 2-3: Μοντέλο ακρίβειας φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας	9
Εικόνα 2-4: Απόσταση των σημείων μιας σφαίρας από κάθε άξονα	11
Εικόνα 3-1: Διάταξη στόχων του εικονικού πεδίου ελέγχου	12
Εικόνα 3-2: Η πανοραμική εικόνα του εικονικού πεδίου ελέγχου με $Z = 1.25 \text{ m}$	13
Εικόνα 4-2: Επίδραση της στροφής στην γ διάσταση της εικόνας	22
Εικόνα 4-1: Κατανομή φωτοσταθερών υπογείου	20
Εικόνα 7-1: Κεντρική προβολή	A
Εικόνα 7-2: Κυλινδρική προβολή	A
Εικόνα 7-3: Κυβική προβολή	B
Εικόνα 7-4: Κυλινδρική ισαπέχουσα προβολή	B
Εικόνα 7-5: Στερεογραφική προβολή	C
Εικόνα 7-6: Διάταξη λήψεων πρακτικής εφαρμογής.....	D

Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι να εξετάσει τη δυνατότητα και την ακρίβεια μετρητικής εκμετάλλευσης πανοραμικών εικόνων, συγκεκριμένα δύο πανοραμικών εικόνων με κοινή οριζόντια θέση και διαφορετικό υψόμετρο. Για την επίτευξη του σκοπού πραγματοποιήθηκαν τρία σκέλη εργασιών: θεωρητική ανάπτυξη μεθοδολογίας, προσομοίωση εφαρμογής με ελεγχόμενα σφάλματα, και πρακτική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των κεφαλαίων της εργασίας:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην ιστορική διαδρομή της πανοραμικής φωτογραμμετρίας, και ανασκόπηση στην πρόσφατη βιβλιογραφία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μοντέλα που περιγράφουν τη γεωμετρία των πανοραμικών εικόνων και την εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας από αυτές. Καταstrώνονται προσεγγιστικά μοντέλα ακρίβειας τα οποία καθορίζουν τους περιορισμούς και τις δυνατότητες των μετέπειτα σταδίων της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται εξέταση των θεωρητικών υποθέσεων εντός ελεγχόμενου περιβάλλοντος προσομοίωσης και εκφέρονται τυχόν καινούρια συμπεράσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η πλήρης διαδικασία που ακολουθήθηκε, από την παραγωγή δύο πανοραμικών εικόνων μέχρι την ανάλυση των αποτελεσμάτων της αποτύπωσης ενός εσωτερικού χώρου, με απώτερο σκοπό την αξιολόγηση της βιωσιμότητας της μεθόδου.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο εκφράζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο των εργασιών, και γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση της μεθόδου και την περαιτέρω έρευνα.

Πανοραμική φωτογραφία

Πανοραμική εικόνα ή πανόραμα έχει επικρατήσει να θεωρείται, χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένος και δεσμευτικός ορισμός, κάθε απεικόνιση που χαρακτηρίζεται από μεγάλο οριζόντιο οπτικό πεδίο (ενδεικτικά μεγαλύτερο από 120°) και επίμηκες φορμά (με λόγο διαστάσεων ενδεικτικά μεγαλύτερο από 2:1). Η τεχνική μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στην κατακόρυφη διεύθυνση, αν και συναντάται λιγότερο συχνά.

Προβολές

Μαθηματικά, το πανόραμα περιγράφεται ως σφαίρα με κέντρο τη θέση του προβολικού κέντρου της μηχανής. Συνηθίζεται, για την ευκολότερη αποθήκευση και διανομή τους, να προβάλλονται σε δύο διαστάσεις, όπως οι χάρτες.

Στην κεντρική προβολή (rectilinear projection), αντίστοιχη της γνωμονικής στη χαρτογραφία, η πανοραμική σφαίρα προβάλλεται σε ένα επίπεδο, με προβολικό κέντρο το κέντρο της σφαίρας. Έχει την ιδιότητα να διατηρεί όλες τις ευθείες γραμμές, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Από τη φύση της, η μέθοδος αδυνατεί να προβάλει πανόραμα με γωνία θέασης πάνω από 180 μοίρες, και οι παραμορφώσεις είναι έντονες ήδη από την περιοχή των 120 μοιρών. Κύρια χρησιμότητα της κεντρικής προβολής είναι η προσομοίωση ευρυγώνιου φωτογραφικού φακού με συρραφή λήψεων από απλό φακό. Με παρόμοιο τρόπο, από συρραφή λήψεων τηλεφακού, μπορεί να παραχθεί μια εικόνα με γωνία θέασης κανονικού φακού αλλά πολύ μεγαλύτερη ανάλυση. Αυτές οι εικόνες αποκαλούνται μερικά πανοράματα (partial panoramas). Μετακινώντας το προβολικό κέντρο πάνω στην επιφάνεια της σφαίρας, τις περισσότερες φορές σε έναν πόλο της, επιτυγχάνεται η στερεογραφική προβολή (stereographic projection), η οποία χρησιμοποιείται σε καλλιτεχνικά πανοράματα λόγω της ενδιαφέρουσας αισθητικής της.

Στην κυλινδρική προβολή (cylindrical projection), η πανοραμική σφαίρα προβάλλεται σε κυλινδρική επιφάνεια. Η κλίμακα της προβολής είναι σταθερή κατά την οριζόντια διεύθυνση λόγω της σταθερής απόστασης από το κέντρο. Στην κατακόρυφη διεύθυνση, η προβολή συμπεριφέρεται ως κεντρική. Αυτό συνεπάγεται ότι διατηρούνται οι κατακόρυφες ευθείες, όπως επίσης ότι υπάρχουν παραμορφώσεις κατά την κατακόρυφη διεύθυνση που γίνονται εμφανείς για γωνία θέασης πάνω από περίπου 90 μοίρες. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζει η μερκατορική προβολή (Mercator projection), η οποία διατηρεί τις γωνίες παραμορφώνοντας τα μήκη στην οριζόντια διεύθυνση όσο και στην κατακόρυφη. Η κυλινδρικές προβολές μπορούν να εφαρμοσθούν και ως εγκάρσιες, θέτοντας κυλινδρική

επιφάνεια κάθετη στον άξονα της σφαίρας. Χρησιμοποιούνται συνήθως για την απεικόνιση πολύ ψηλών αντικειμένων, ή αν απαιτείται ευκρίνεια στις περιοχές κοντά στους πόλους.

Μια ιδιαίτερα αξιοσημείωτη παραλλαγή της κυλινδρικής προβολής είναι η κυλινδρική ισαπέχουσα προβολή (equiarectangular projection). Σε αυτήν την περίπτωση, οι παράλληλοι και μεσημβρινοί απεικονίζονται ως ισαπέχουσες, κάθετες μεταξύ τους ευθείες. Όπως και στην κυλινδρική προβολή, τα αντικείμενα κοντά στους πόλους παραμορφώνονται υπερβολικά, αλλά αυτή τη φορά στην οριζόντια διεύθυνση, σε σημείο όπου οι πόλοι απεικονίζονται ως ευθείες. Η χρησιμότητα της προβολής αυτής είναι ότι, αντίθετα με τις άλλες κυλινδρικές, είναι σε θέση να απεικονίσει ολόκληρη την πανοραμική σφαίρα και μάλιστα σε ένα επίπεδο με σχετικά μικρές διαστάσεις, με λόγο πλευρών 2:1. Για τον λόγο αυτό έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται ως πρότυπο αποθήκευσης για χρήση σε εφαρμογές παρατήρησης πανοραμάτων (viewers), που επιτρέπουν στον χρήστη τη χωρίς παραμορφώσεις παρατήρηση σε κάθε κατεύθυνση. Επειδή οι ακραίες παραμορφώσεις καθιστούν δύσκολη την επεξεργασία των εικόνων, μπορεί γι' αυτόν τον σκοπό να χρησιμοποιηθεί ενδιάμεσα η κυβική προβολή (cubic projection), μια σύνθετη προβολή που αποτελείται από έξι κεντρικές προβολές στις έδρες ενός κύβου. Επειδή διατηρεί τις ευθείες, επιτρέπει την εύκολη επεξεργασία σε κάθε περιοχή της εικόνας. Στη συνέχεια η εικόνα μπορεί να επανέλθει στην ισαπέχουσα προβολή.

Μέθοδοι παραγωγής - εξοπλισμός

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την παραγωγή πανοραμάτων, κατάλληλες για διαφορετικές εφαρμογές.

Η συρραφή απλών λήψεων (image stitching) είναι η μέθοδος κατά την οποία μια πανοραμική εικόνα προκύπτει από μερικές επικαλυπτόμενες λήψεις οι οποίες ενώνονται με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Η ένωση αξιοποιεί σημεία σύνδεσης στα επικαλυπτόμενα μέρη και μπορεί να διορθώσει διαστροφές του φακού με χρήση ελαχιστοτετραγωνικού μοντέλου, καθώς και να εξασφαλίσει ραδιομετρική συνέχεια στο τελικό αποτέλεσμα, ασχέτως από τις διαφορές στην έκθεση των αρχικών λήψεων. Η μέθοδος είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω του χαμηλού κόστους και της μη ανάγκης ειδικού εξοπλισμού, τουλάχιστον για απλές εφαρμογές. Για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όμως, είναι απαραίτητη η χρήση πανοραμικής κεφαλής και τρίποδα, όπως και η προσοχή στη ρύθμιση της διάταξης και στην πραγματοποίηση των λήψεων, καθώς η μετακίνηση του προβολικού κέντρου μεταξύ λήψεων είναι η κύρια πηγή σφάλματος. Υπάρχει πληθώρα λογισμικών συρραφής. Τα πλέον αξιοσημείωτα είναι τα PTGui (γραφικό περιβάλλον του λογισμικού

Panorama Tools) και το Hugin (ελεύθερο λογισμικό βασισμένο επίσης στο Panorama Tools). Το Adobe Photoshop, από την έκδοση CS5, περιλαμβάνει εργαλεία συρραφής και επεξεργασίας πανοραμάτων.

Οι περιστρεφόμενες μηχανές γραμμικού αισθητήρα (rotating line cameras) είναι εξειδικευμένες μηχανές που αποδίδουν πλήρη πανοράματα σε πολύ υψηλή ανάλυση και με βέλτιστη ακρίβεια. Αποτελούνται από μία περιστρεφόμενη κεφαλή με οπτικό σύστημα και κατακόρυφο γραμμικό αισθητήρα. Η εικόνα παράγεται μέσω μιας πλήρους περιστροφής της κεφαλής. Η πλέον αντιπροσωπευτική μηχανή της κατηγορίας είναι η Panoscan MK-3, ο συνολικός χρόνος έκθεσης για την οποία είναι 54 s στη μέγιστη ανάλυση. Χρησιμοποιείται στην τεκμηρίωση τόπων εγκλήματος για τη λεπτομερή καταγραφή της σκηνής και των στοιχείων για μετέπειτα αναφορά. Λόγω της υψηλής ποιότητας κατασκευής και του γνωστού εσωτερικού προσανατολισμού, αποφεύγονται εντελώς τα σφάλματα συρραφής της προηγούμενης μεθόδου.

Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι αναλογικές περιστρεφόμενες πανοραμικές μηχανές. Ένας μηχανισμός επιτρέπει την περιστροφή ολόκληρης της μηχανής γύρω από τον άξονα που διέρχεται του προβολικού κέντρου, ταυτόχρονα με ανάλογη κίνηση του φιλμ στην αντίθετη κατεύθυνση. Η περιστροφή μπορεί να γίνεται με χειροκίνητο ή ηλεκτροκίνητο μηχανισμό. Το αποτέλεσμα της έκθεσης είναι μια πανοραμική εικόνα, σε κυλινδρική προβολή, η οποία καταλαμβάνει συνεχή επιφάνεια πάνω στο φιλμ, με μήκος ανάλογο της γωνίας στροφής. Η τελευταία δεν αποκλείεται να υπερβαίνει τις 360 μοίρες, αν η περιστροφή συνεχιστεί. Αυτή η τεχνική μπορεί να αποτυπώσει αλλαγές στο αντικείμενο ανάμεσα σε διαδοχικά περάσματα.

Ένας ακόμη τύπος αναλογικής πανοραμικής μηχανής είναι οι μηχανές με περιστρεφόμενο φακό (rotating lens cameras), οι οποίες συνήθως περιορίζονται σε οριζόντια γωνία θέασης της τάξης των 120 έως 150 μοιρών. Χρησιμοποιούν περιστρεφόμενο φακό και λεπτή κατακόρυφη σχισμή για να επιτύχουν προοδευτική έκθεση ενός φιλμ που εφάπτεται σε κυλινδρική επιφάνεια. Η σταθερή απόσταση του φιλμ από το προβολικό κέντρο έχει ως αποτέλεσμα μια πανοραμική εικόνα με σταθερή κλίμακα κατά την οριζόντια διεύθυνση, όπως και στην περίπτωση των περιστρεφόμενων μηχανών.

Αντίθετα από τις μεθόδους προοδευτικής έκθεσης, οι ευρυγώνιες μηχανές μεγάλου φορμά (wide angle lens cameras) μπορούν να αποδώσουν ολόκληρη την εικόνα απευθείας. Η παραγόμενη εικόνα μπορεί να χαρακτηριστεί ως πανόραμα επειδή γενικά πληροί τις

προδιαγραφές γωνίας θέασης και αναλογίας φορμά, άλλα διαφέρει ουσιαστικά από τις προηγούμενες μεθόδους στο ότι πρόκειται για κεντρική προβολή.

Απευθείας λήψη πανοραμικής εικόνας 360 μοιρών μπορεί να πραγματοποιηθεί φωτογραφίζοντας ένα κυρτό κάτοπτρο από ένα σημείο πάνω στον άξονα συμμετρίας του. Προσανατολίζοντας το σύστημα στο ζενίθ, με το κάτοπτρο πάνω από την κάμερα, παράγεται μια εικόνα που απεικονίζει τον ορίζοντα ως κύκλο. Με κατάλληλο μετασχηματισμό η εικόνα μπορεί να επαναπροβληθεί ως κυλινδρική ή ισαπέχουσα προβολή. Με παρόμοιο τρόπο, χωρίς ανάγκη κατόπτρου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υπερευρυγώνιος fisheye φακός.

Το μοντέλο V10 της Trimble είναι ένας εξειδικευμένος εικονογεωδαιτικός σταθμός ο οποίος αξιοποιεί τις αρχές της πανοραμικής φωτογραμμετρίας για τη γρήγορη αποτύπωση, σε μορφή πανοραμικών εικόνων υψηλής ανάλυσης, και τη μετέπειτα απόδοση μεγάλων περιοχών. Αποτελείται από ένα κύριο στέλεχος με κεφαλή αποτελούμενη από 12 βαθμονομημένες φωτομηχανές, σύστημα κατακορύφωσης και σύστημα δορυφορικού εντοπισμού θέσης. Η ονομαστική ακρίβεια προσδιορισμού είναι 10 mm οριζοντιογραφικά και 7 mm υψομετρικά, σε απόσταση 25 m.

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι πρώτες επίγειες πανοραμικές φωτογραφικές μηχανές κατασκευάστηκαν ανεξάρτητα, το 1858, από δύο κατασκευαστές, τους Porro και Chevallier. Δεν γνώρισαν επιτυχία σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές λόγω της ελλιπούς κατασκευαστικής ακρίβειας των μηχανισμών περιστροφής τους. Η λύση δόθηκε με τον μετέπειτα συνδυασμό φωτογραφικής μηχανής και θεοδόλιχου από τον Porro, το 1865. Το νέο όργανο, το φωτοθεοδόλιχο, αξιοποίησε την υψηλή γωνιακή ακρίβεια του θεοδόλιχου για να ενισχύσει τις φωτογραμμετρικές μεθόδους. Η συγκεκριμένη μέθοδος, αν και δεν περιλαμβάνει την παραγωγή και απόδοση πανοραμικών εικόνων, συγγενεύει με τη σύγχρονη πανοραμική φωτογραμμετρία στο ότι μία στάση οργάνου προσφέρει μετρήσιμη οπτική πληροφορία σε κάθε κατεύθυνση και ήταν ως εκ τούτου χρήσιμη σε εφαρμογές όπως η αποτύπωση κυρίως εσωτερικών χώρων.

Οι απαρχές τις εναέριας πανοραμικής φωτογραμμετρίας έγιναν τα πρώτα χρόνια του 20^{ου} αιώνα, όταν οι ανάγκες για μεγαλύτερα φορμά και γωνίες θέασης οδήγησε στον σχεδιασμό μηχανών πολλαπλών φακών, διατάσσοντας 7 ή 8 πλάγιους φακούς γύρω από έναν κεντρικό, προσανατολισμένο στο ναδίρ. Η απόδοση των παραγόμενων φωτογραφιών απαιτούσε εξειδικευμένο εξοπλισμό. Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα χρησιμοποιήθηκαν ευρυγώνιες φωτογραφικές μηχανές και μηχανές με περιστρεφόμενο φακό, πρόδρομοι των σύγχρονων δορυφορικών δεκτών.

Οι Schneider και Maas (2005) ανέπτυξαν ένα μοντέλο συνόρθωσης κατά δέσμες το οποίο ενσωματώνει πανοραμικές εικόνες κυλινδρικής προβολής και απλές λήψεις (κεντρικής προβολής) και επιτρέπει έτσι την ενιαία απόδοση μεγάλων χώρων αλλά και σημείων λεπτομερειών ή περιοχών κρυμμένων από τις πανοραμικές εικόνες. Στην πρώτη δοκιμαστική εφαρμογή, ένα σύστημα 4 πανοραμικών εικόνων ενός εξωτερικού πεδίου ελέγχου 125 σημείων επιλύθηκε δύο φορές, με και χωρίς μία επιπλέον βοηθητική λήψη από φορητή ψηφιακή μηχανή. Η ακρίβεια προσδιορισμού των αντικειμενικών σημείων ήταν συγκρίσιμη με αυτή της πρώτης περίπτωσης, με εξαίρεση το σφάλμα στην κατακόρυφη διεύθυνση RMS_z , το οποίο ελαττώθηκε κατά 1 mm. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο και εξηγείται από το γεγονός ότι η επιπλέον λήψη, όντας μικρότερης ανάλυσης από τις πανοραμικές εικόνες και περιέχοντας μόνο 40 σημεία, δεν συνέβαλε τόσο στη γενική ακρίβεια των μετρήσεων όσο στην ενίσχυση της γεωμετρίας του μοντέλου.

Το συγκεκριμένο μοντέλο βελτιώθηκε από τους ίδιους (2006) με σκοπό να περιγράψει και να διορθώσει παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού των περιστρεφόμενων

μηχανών γραμμικού αισθητήρα, όπως απόκλιση του προβολικού κέντρου από τον άξονα περιστροφής, μη παραλληλία του αισθητήρα με τον άξονα περιστροφής, ακτινική διαστρόφη, ανομοιόμορφη κλίμακα και ανομοιόμορφη περιστροφή της μηχανής. Εφαρμόζοντας το βελτιωμένο μοντέλο στο ανωτέρω σύστημα 4 πανοραμικών εικόνων (χωρίς την επιπλέον λήψη), παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	4 πανοράματα	4 πανοράματα + 1 κεντρική προβολή	4 πανοράματα, νέο μοντέλο
$\hat{\sigma}_0$ (px)	0.28	0.27	0.22
RMS_x (mm)	3.4	3.3	0.39
RMS_y (mm)	2.9	2.9	0.28
RMS_z (mm)	3.7	2.7	0.16

Πίνακας 1-1: Ακρίβεια προσδιορισμού συντεταγμένων από σύστημα πανοραμικών εικόνων (Schneider & Maas, 2005)

Η Schwalbe (2005) ανέπτυξε ένα γεωμετρικό μοντέλο βαθμονόμησης fisheye φακών το οποίο περιγράφει επιπλέον παραμέτρους όπως συμμετρική και ασυμμετρική ακτινική διαστρόφη, εφαπτομενική διαστρόφη, ανομοιόμορφη κλίμακα και μη καθετότητα των βασικών αξόνων. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για τη βαθμονόμηση μιας μηχανής Kodak DCS 14N Pro με φακό fisheye Nikkor 8 mm, από μια λήψη ενός εσωτερικού πεδίου ελέγχου 140 σημείων, με μέση απόσταση από τη μηχανή περίπου 3 m. Η βαθμονόμηση έδωσε σφάλμα της μονάδας βάρους $\hat{\sigma}_0 = 0.096$ px, ή 0.3 mm στα 3 m.

Οι Fangi και Nardinocchi (2013) αξιοποίησαν με επιτυχία σφαιρικές πανοραμικές εικόνες, κατασκευασμένες από περίπου 50 απλές λήψεις έκαστη, για να αποτυπώσουν το παρεκκλήσι Notre Dame du Haut στο Ronchamp. Παρήχθησαν 37 εικόνες του εξωτερικού και 9 του εσωτερικού χώρου. Το σύστημα λύθηκε μια φορά με 89 φωτοσταθερά και μια φορά με 3 φωτοσταθερά και 86 σημεία σύνδεσης. Οι δύο περιπτώσεις έδωσαν παραπλήσια ακρίβεια, ίση με 8 px. Στη δεύτερη περίπτωση, τα 86 σημεία σύνδεσης παρουσίασαν μέση απόκλιση από τις γνωστές θέσεις τους ίση με 0.015 m.

Οι Richardt et al. (2013) ανέπτυξαν αλγόριθμο για την αψευγάδιαστη συρραφή στερεοσκοπικών πανοραμικών εικόνων (στερεοπανοράματα). Ένα στερεοπανόγραμμα αποτελείται, στην απλούστερη μορφή του, από μια αλληλουχία λεπτών κατακόρυφων στερεοζευγών και επιτρέπει έτσι τη στερεοσκοπική παρατήρηση σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η απλή μέθοδος συρραφής παρουσιάζει ασυνέχειες στα όρια των λωρίδων, οι οποίες

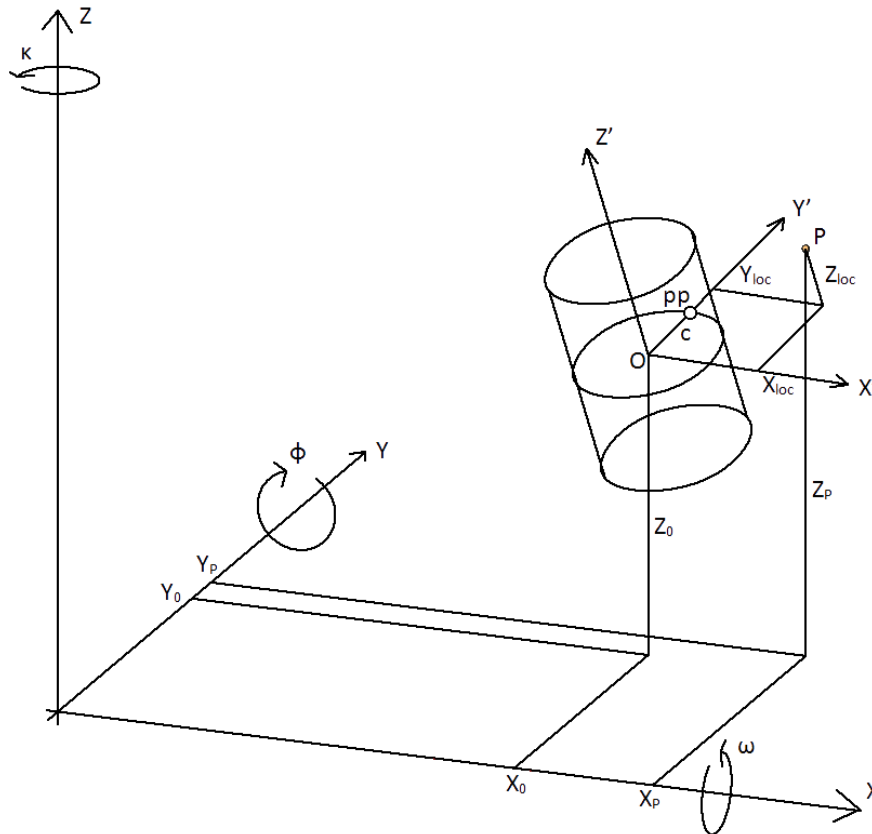
μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο εμφανείς, ανάλογα με το βήμα περιστροφής του οπτικού συστήματος (και συνεπώς το πλάτος της λωρίδας του στερεοζεύγους). Αντίθετα, η προτεινόμενη από τους συγγραφείς τεχνική χρησιμοποιεί μεθόδους δειγματοληψίας των αρχικών εικόνων ώστε να συνθέσει δύο συνεχείς πανοραμικές εικόνες, μία για την αριστερή και μία για τη δεξιά άποψη της σκηνής. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται μάλλον στην εύκολη παραγωγή στερεοσκοπικών εικόνων για παρατήρηση παρά στην εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας.

2. Ανάπτυξη μεθοδολογίας

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι μαθηματικές αρχές που διέπουν την πανοραμική φωτογραμμετρία και καταστρώνονται μοντέλα για την ακρίβεια της εξεταζόμενης μεθόδου.

2.1. Μαθηματικό μοντέλο

Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια πανοραμική λήψη αποτελείται από παράπλευρη επιφάνεια κυλίνδρου με ακτίνα c (σταθερά της μηχανής) και ύψος που ορίζεται από την κατακόρυφη γωνία θέασης. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της λήψης αποτελείται από άξονα Z' ταυτόσημο με τον άξονα της κυλινδρικής επιφάνειας, άξονα Y' κάθετο στην κυλινδρική επιφάνεια και διερχόμενο από το πρωτεύον σημείο pp , και άξονα X' κάθετο στους άλλους δύο με τέτοιο τρόπο ώστε να ορίζεται δεξιόστροφο σύστημα. Σε μια πανοραμική εικόνα με πλήρη οριζόντια γωνία θέασης, η στροφή κ γύρω από τον Z άξονα δεν ορίζεται μονοσήμαντα, αλλά εξαρτάται από τον τρόπο αποθήκευσης του ψηφιακού αρχείου, επειδή η συνέχεια της οπτικής πληροφορίας επιτρέπει τον ορισμό οποιουδήποτε μέρους του αντικειμένου ως πρωτεύοντος σημείου. Στην ανεπτυγμένη κυλινδρική επιφάνεια μετρώνται οι εικονοσυντεταγμένες x, y με αρχή το κάτω αριστερά pixel.



Εικόνα 2-1: Μαθηματικό μοντέλο πανοραμικής εικόνας κυλινδρικής προβολής

Οι συντεταγμένες του αντικειμένου στο τοπικό σύστημα της μηχανής $P_{loc}(X_{loc}, Y_{loc}, Z_{loc})$ συνδέονται με τις εικονοσυντεταγμένες της πανοραμικής εικόνας (x, y) με τις εξής σχέσεις:

$$x = x_0 + c \operatorname{atan2}(X_{loc}, Y_{loc})$$

$$y = y_0 + c \frac{Z_{loc}}{\sqrt{X_{loc}^2 + Y_{loc}^2}}$$

Όπου x_0, y_0 οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, c η σταθερά της μηχανής, $\operatorname{atan2}$ η συνάρτηση του 2^{ου} θεμελιώδους προβλήματος της γεωδαισίας. Για υπολογιστικούς σκοπούς αντικαθίσταται με την ισοδύναμη συνάρτηση:

$$\operatorname{atan2}(X_{loc}, Y_{loc}) = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{X_{loc}}{\sqrt{X_{loc}^2 + Y_{loc}^2} + Y_{loc}} \right)$$

Οι συντεταγμένες του αντικειμένου στο γεωδαιτικό σύστημα συνδέονται με αυτές στο τοπικό σύστημα με τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} X_{loc} \\ Y_{loc} \\ Z_{loc} \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

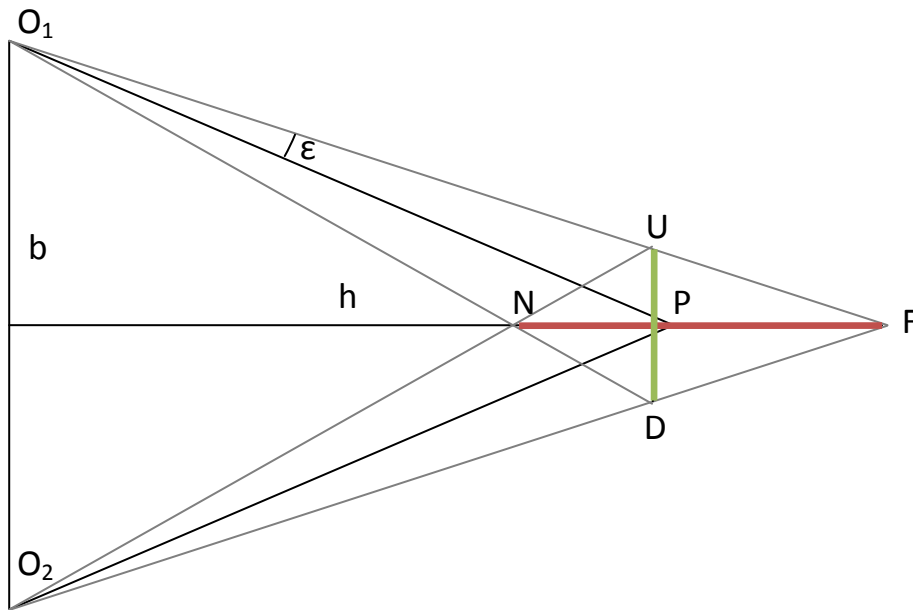
Όπου $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου, $P(X, Y, Z)$ οι συντεταγμένες του αντικειμένου και R ο πίνακας στροφής της πανοραμικής εικόνας στο γεωδαιτικό σύστημα.

Το παραπάνω μοντέλο εισήχθη στο υπολογιστικό λογισμικό Matlab, όπου έγιναν όλοι οι υπολογισμοί με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

2.2. Προσεγγιστικό μοντέλο ακρίβειας

2.2.1. Εμπροσθοτομία

Η φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία μπορεί να περιγραφεί, σε απλή μορφή, από το εξής μοντέλο: Ένα αντικείμενο P σε απόσταση h σκοπεύεται από δύο προβολικά κέντρα O_1, O_2 , με βάση λήψης b , η θέση των οποίων θεωρείται χωρίς σφάλμα. Η αβεβαιότητα της σκόπευσης αναπαρίσταται από την απόκλιση των δεσμών (ε). Η τομή των δύο δεσμών ορίζει το τετράπλευρο $NUFD$. Η τρίτη διάσταση εκδηλώνεται από την περιστροφή της παραπάνω διάταξης γύρω από τον άξονα της βάσης λήψης, κατά γωνία ε .



Εικόνα 2-2: Μοντέλο ακρίβειας φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας

Ως δείκτης του σφάλματος προσδιορισμού θέσης ορίζεται το μέγεθος $\sigma = \sqrt{\left(\frac{NF}{2}\right)^2 + \left(\frac{UD}{2}\right)^2 + \left(OP \frac{\epsilon}{2}\right)^2}$. Αναλύοντας τη σχέση του με τα μεγέθη b, h, ϵ μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της διάταξης. Για τον σκοπό αυτό, η διάταξη σχεδιάστηκε στο μαθηματικό λογισμικό Geogebra και εξετάστηκε με αριθμητικό τρόπο, δεδομένης της περιπλοκότητας των αναλυτικών σχέσεων. Εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα: Το σφάλμα σ της θέσης του αντικειμένου αυξάνεται γραμμικά με την αβεβαιότητα σκόπευσης ϵ . Για σταθερό λόγο b/h , το σ αυξάνεται γραμμικά με τα μεγέθη b και h . Με σταθερή βάση λήψης, το σφάλμα ελαχιστοποιείται για λόγο $b/h = 2.98$, που αντιστοιχεί σε γωνία τομής των ακτίνων ίση με 112 μοίρες, ενώ με σταθερή αντικειμενική απόσταση για λόγο $b/h = 1.35$, με αντίστοιχη γωνία τομής 68 μοίρες. Σε κάθε περίπτωση, απόκλιση της γωνίας τομής έως 15 μοίρες προς κάθε κατεύθυνση από τη βέλτιστη γωνία προκαλεί αύξηση του σφάλματος κατά 5%.

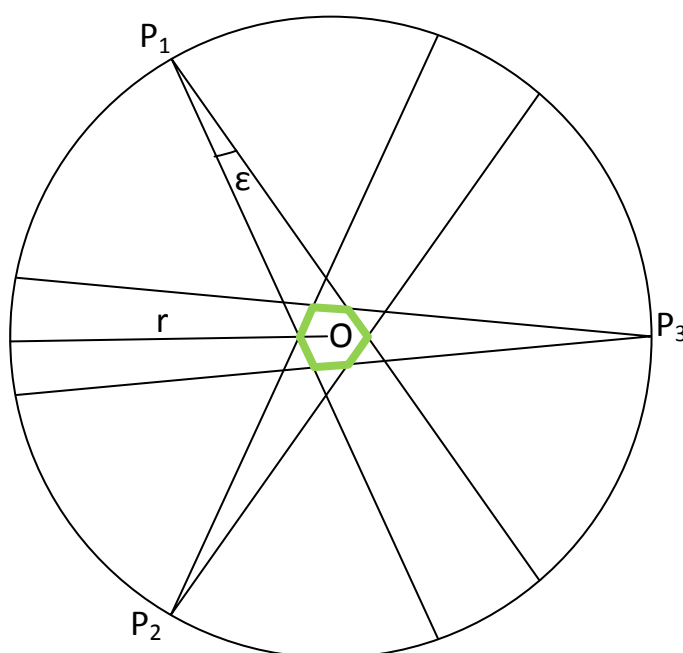
Στη γενική τους μορφή, οι σχέσεις $\sigma(b)$ και $\sigma(h)$ μπορούν να εκφραστούν με καμπύλες της μορφής $y = \frac{c_1}{x} + c_2x^2 + c_3$. Περιορίζοντας το πεδίο ορισμού τους σε εύρη πιο χαρακτηριστικά της πρακτικής εφαρμογής, μπορούν να απλοποιηθούν στη μορφή $\sigma(b) = \frac{c_1}{x} + c_2, b \in (0, 1.35 h]$ και $\sigma(h) = c_1x^2 + c_2, h \in [0.34b, \infty)$. Αναμένεται λοιπόν η

ακρίβεια προσδιορισμού θέσης να είναι ανάλογη του τετραγώνου της αντικειμενικής απόστασης.

Εξετάστηκε το ενδεχόμενο ως μέτρο του σφάλματος να θεωρηθεί η ρίζα κάποιου εμβαδού, π.χ. του αυτού του τετραπλεύρου $NUFD$ ή ενός ορθογωνίου τριγώνου με πλευρές $\frac{NF}{2}$, $\frac{UD}{2}$. Δεν προτιμήθηκε, όμως, γιατί το εμβαδό ενός τριγώνου, σε αντίθεση με την υποτείνουσα, αδιαφορεί για την ομοιόμορφη ακρίβεια κατά τις δύο διευθύνσεις, εφόσον για την ελαχιστοποίηση του εμβαδού αρκεί απλώς η ελαχιστοποίηση της μιας πλευράς εις βάρος της άλλης. Επιπλέον, η βέλτιστη περίπτωση ως προς την ομοιόμορφη ακρίβεια, δηλαδή η ισότητα των δύο πλευρών, είναι η δυσμενέστερη ως προς το εμβαδό, το οποίο και μεγιστοποιείται.

2.2.2. Οπισθοτομία

Η φωτογραμμετρική οπισθοτομία προσδιορίζει τον εξωτερικό προσανατολισμό της εικόνας, δηλαδή τη θέση και τις στροφές του προβολικού κέντρου. Όσον αφορά στις θέσεις, η οπισθοτομία μπορεί να περιγραφεί με παρόμοιο με τον ανωτέρω τρόπο. Αυτή τη φορά θεωρούνται τρία φωτοσταθερά, P_1, P_2, P_3 με αβεβαιότητα σ_P και ένα προβολικό κέντρο O , στην εξής απλοποιημένη διάταξη: Τα φωτοσταθερά κείνται επί κύκλου με ακτίνα r , κέντρο του οποίου αποτελεί το προβολικό κέντρο. Τα φωτοσταθερά είναι κατανομημένα ομοιόμορφα κατά μήκος του κύκλου, ορίζοντας τρεις επίκεντρες γωνίες των 120° .



Εικόνα 2-3: Μοντέλο ακρίβειας φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας

Η απόκλιση ε των δεσμών έχει αυτή τη φορά δύο συνιστώσες: την αβεβαιότητα της σκόπευσης και την αβεβαιότητα της θέσης των φωτοσταθερών. Η τελευταία εκφράζεται ως το γωνιακό μέγεθος $\frac{\sigma_P}{r}$. Η τομή των τριών δεσμών ορίζει ένα εξαγώνο, το οποίο λειτουργεί ως δείκτης σφάλματος. Όπως και στην περίπτωση της εμπροσθοτομίας, το μέγεθος που θα επιλεγεί θα πρέπει να μεριμνά τόσο για το μέσο μέγεθος όσο και για την ομοιόμορφη κατανομή του σφάλματος. Για τον σκοπό αυτό επινοήθηκε ένα ενδιάμεσο αδιάστατο μέγεθος «κανονικότητας» του εξαγώνου, n , ως συνάρτηση του εμβαδού και της περιμέτρου:

$$n \equiv \frac{24A}{\sqrt{3}P^2}$$

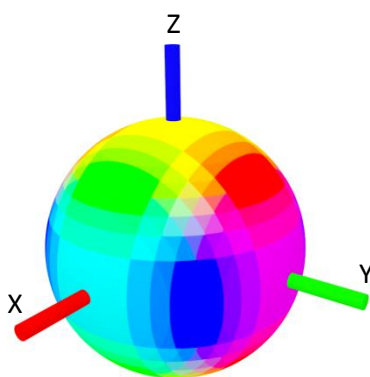
Όπου A το εμβαδό και P η περίμετρος του εξαγώνου. Για ένα κανονικό εξαγώνο, ανεξαρτήτου ακτίνας, θα ισχύει $n = 1$, και κάθε απόκλιση από αυτό το σχήμα μειώνει την κανονικότητα. Το τελικό μέγεθος σφάλματος, που ενσωματώνει και την απόσταση και την ομοιόμορφη κατανομή των φωτοσταθερών, είναι:

$$\sigma = \frac{P}{6n}$$

Ο όρος $\frac{P}{6}$ αντιστοιχεί στη μέση ακτίνα του εξαγώνου. Εξυπακούεται ότι θα ισούται με την ακτίνα στην ειδική περίπτωση του κανονικού εξαγώνου. Μετά από ανάλυση της σχέσης συμπεραίνεται ότι σε συνθήκες πρακτικής εφαρμογής (μικρή αβεβαιότητα σκόπευσης, μικρή αβεβαιότητα φωτοσταθερών) αναμένεται το σφάλμα της θέσης του προβολικού κέντρου να αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση από τα φωτοσταθερά και γραμμικά τόσο με την αβεβαιότητα σκόπευσης όσο και με την αβεβαιότητα των φωτοσταθερών.

Το σκέλος της οπισθοτομίας που αφορά στον προσδιορισμό των στροφών της εικόνας μπορεί να θεωρηθεί ότι εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες: Την αβεβαιότητα της θέσης των φωτοσταθερών, την απόστασή τους από τους άξονες περιστροφής της εικόνας και την αβεβαιότητα σκόπευσης. Συγκεκριμένα, η επίδραση της αβεβαιότητας s ενός φωτοσταθερού στη γωνία στροφής κ γύρω από τον άξονα Z είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής του από τον άξονα Z , από τη χαρακτηριστική σχέση $\kappa = \frac{s}{r}$ του κυκλικού τόξου. Πιο απλά, όσο ελαττώνεται η απόσταση του φωτοσταθερού από τον άξονα Z , τόσο η γωνία κ γίνεται ευαίσθητη στη θέση του φωτοσταθερού. Τέλος, η αβεβαιότητα σκόπευσης επηρεάζει κάθε γωνία και εξαρτάται από το γωνιακό μέγεθος του pixel, δηλαδή από την κλίμακα της εικόνας. Σε ένα σύνολο φωτοσταθερών που ισαπέχουν από το προβολικό

κέντρο, η καταλληλότητα καθενός στον προσδιορισμό κάθε στροφής μπορεί να περιγραφεί από το παρακάτω διάγραμμα: Οι άξονες X, Y, Z και οι αντίστοιχες στροφές τους, ω, φ, κ απεικονίζονται αντίστοιχα με κόκκινο, πράσινο και μπλε χρώμα. Η σφαίρα που ορίζεται χρωματίζεται ανάλογα με την απόσταση κάθε σημείου από κάθε άξονα άρα και, ισοδύναμα, την καταλληλότητα κάθε σημείου για τον προσδιορισμό κάθε στροφής.



Εικόνα 2-4: Απόσταση των σημείων μιας σφαίρας από κάθε άξονα

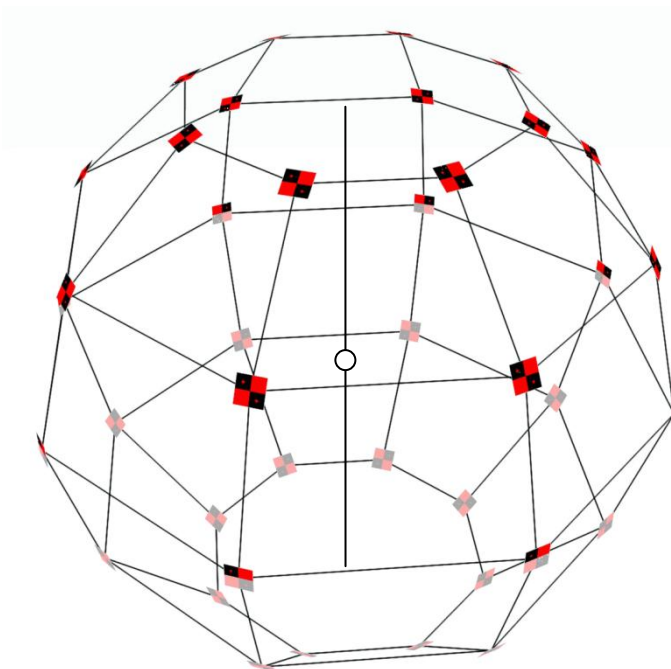
Όσον αφορά στις πρακτικές εφαρμογές, από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι, δεδομένης της κατακόρυφης γωνίας θέασης των πανοραμικών εικόνων αλλά και της φύσης του προς αποτύπωση χώρου, η βέλτιστη διάταξη φωτοσταθερών περιλαμβάνει σημεία ομοιόμορφα κατανεμημένα γύρω από το προβολικό κέντρο, στο οριζόντιο επίπεδο που διέρχεται από αυτό. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικής εφαρμογής, η αβεβαιότητα της θέσης των φωτοσταθερών αναμένεται να έχει μικρότερη επίδραση από αυτή της αβεβαιότητας σκόπευσης/γωνιακού μεγέθους ρixel. Ενδεικτικά, σε μια πανοραμική εικόνα με x διάσταση 20000 px και για φωτοσταθερά με μέση αβεβαιότητα θέσης 0.3 mm, το γωνιακό μέγεθος του ρixel είναι $\frac{2\pi}{20000} \cong 200^{cc}$. Για να έχει ένα φωτοσταθερό αισθητή συμβολή στο σφάλμα, θα πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση $r < 0.3 \frac{20000}{2\pi} \cong 0.95 \text{ m}$.

3. Διερεύνηση μεθοδολογίας μέσω προσομοίωσης

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε για την εκτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου.

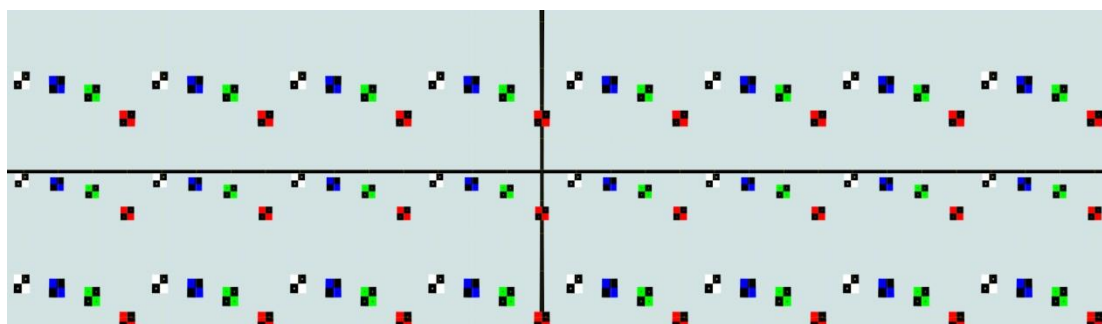
3.1. Εικονικό πεδίο ελέγχου – πανοραμικές εικόνες

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης έγιναν μετρήσεις σε πανοραμικές εικόνες ενός εικονικού πεδίου ελέγχου που σχεδιάστηκε στο λογισμικό σχεδίασης Blender. Το εν λόγω πεδίο αποτελείται από τέσσερις ομάδες (κόκκινη, πράσινη, μπλε, λευκή) των 40 στόχων. Οι στόχοι της κόκκινης ομάδας είναι τοποθετημένοι στις κορυφές (εκτός των πόλων) ενός σφαιρικού πολυέδρου με 8 μεσημβρινούς, 5 παραλλήλους και ακτίνα 5 m, προσανατολισμένοι προς το κέντρο του. Ομοίως ορίζονται οι υπόλοιπες ομάδες με ίδιο κέντρο και ακτίνα 10, 15 και 20 m αντίστοιχα. Κάθε ομάδα είναι ελαφρώς στραμμένη γύρω από τον Z άξονα σε σχέση με την προηγούμενη, ώστε οι στόχοι, παρατηρούμενοι από το κέντρο, να μην αλληλοαποκρύπτονται. Ένας οριζόντιος κύκλος και ένα κατακόρυφο ημικύκλιο, ακτίνας 100 m, λειτουργούν ως οπτικό σημείο αναφοράς για την παρατήρηση των εικόνων.



Εικόνα 3-1: Διάταξη στόχων του εικονικού πεδίου ελέγχου

Για τους σκοπούς των μετρήσεων παρήχθησαν έξι πανοραμικές εικόνες του πεδίου ελέγχου, αριθμημένες 1 έως 6. Τα προβολικά τους κέντρα βρίσκονται στον Z άξονα του συστήματος του πεδίου ελέγχου, με υψόμετρα ± 0.25 m, ± 0.75 m και ± 1.25 m. Η αρίθμηση αρχίζει από την κατώτατη εικόνα ($Z = -1.25$ m). Με εξαίρεση το υψόμετρο, οι εικόνες είναι απολύτως ίδιες ως προς τον εξωτερικό και εσωτερικό προσανατολισμό. Οι εικόνες αποδόθηκαν στο λογισμικό Blender σε διαστάσεις 6500 x 1875 px. Οι δυνατότητες του λογισμικού δεν επιτρέπουν την παραγωγή εικόνων αυστηρά κυλινδρικής προβολής, με την έννοια ότι η κυλινδρική προβολή προσεγγίζεται από αλληλουχία κατακόρυφων λωρίδων κεντρικής προβολής πλάτους 8 px (η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή), που για την οριζόντια διάσταση των 6500 px αντιστοιχεί σε γωνιακό βήμα 0.44° . Ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων και οι θέσεις των στόχων είναι χωρίς σφάλμα. Η μόνη πηγή σφαλμάτων είναι η αβεβαιότητα σκόπευσης των στόχων. Σε όλες τις εικόνες είναι ορατοί οι ίδιοι 24 στόχοι από κάθε ομάδα (οι άνω και κάτω παράλληλοι βρίσκονται έξω από την κατακόρυφη γωνία θέασης).

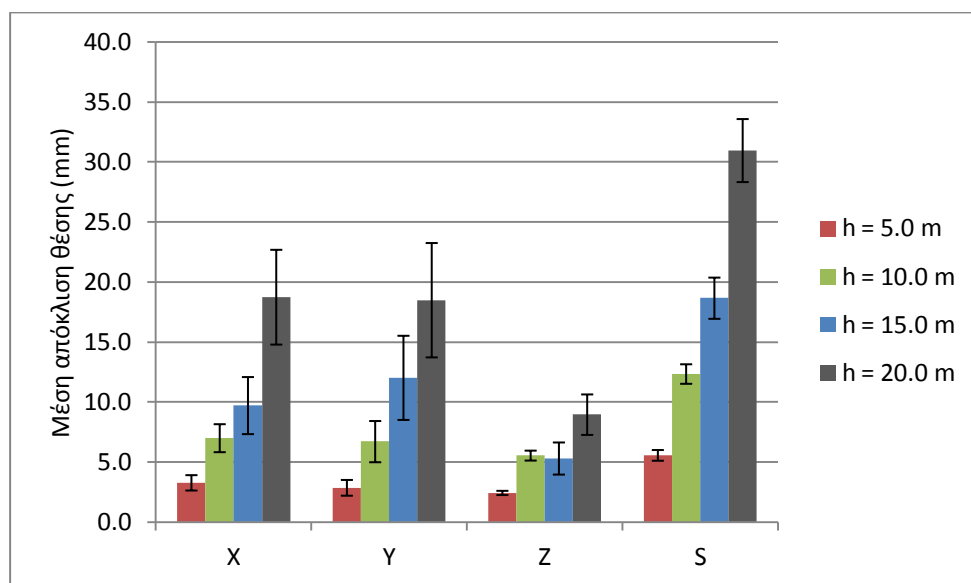


Εικόνα 3-2: Η πανοραμική εικόνα του εικονικού πεδίου ελέγχου με $Z = 1.25$ m

3.2. Απόδοση αντικειμένου – εμπροσθοτομία

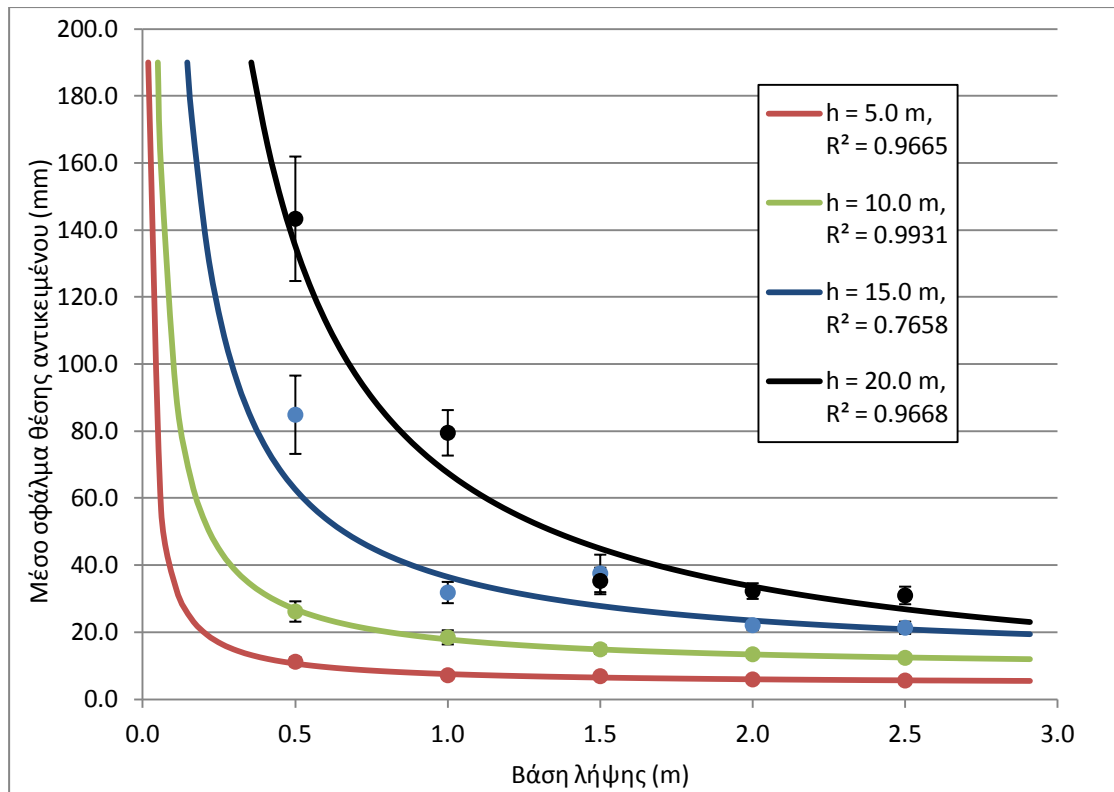
Για την πειραματική εκτίμηση της ακρίβειας της μεθόδου στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των αντικειμενικών σημείων, έγινε επίλυση του συστήματος από διάφορους συνδυασμούς των δύο εικόνων με αγνώστους τις θέσεις όλων των στόχων και γνωστό τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν τα στερεοζεύγη, 3-4, 2-4, 2-5, 2-6, 1-6 με βάση λήψης 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 και 2.5 μέτρα αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις γνωστές συντεταγμένες των φωτοσταθερών. Παρατηρείται ότι το σφάλμα κατά την Z διεύθυνση είναι γενικά μικρότερο από αυτό κατά τις X και Y διευθύνσεις. Αυτή η διαφορά επαληθεύει το μοντέλο της εμπροσθοτομίας που

περιγράφηκε παραπάνω, όπου για τις συνήθεις τιμές της γωνίας τομής το σφάλμα μοιράζεται ανομοιόμορφα, με μεγαλύτερο βάρος κατά μήκος του άξονα βάσης - αντικειμένου. Το σφάλμα σε αυτή τη διεύθυνση μπορεί να επηρεάσει μόνο τους οριζόντιους άξονες X, Y (εφόσον η βάση λήψης είναι κατακόρυφη), ενώ ο Z άξονας δέχεται τη μικρότερη συνιστώσα του σφάλματος.

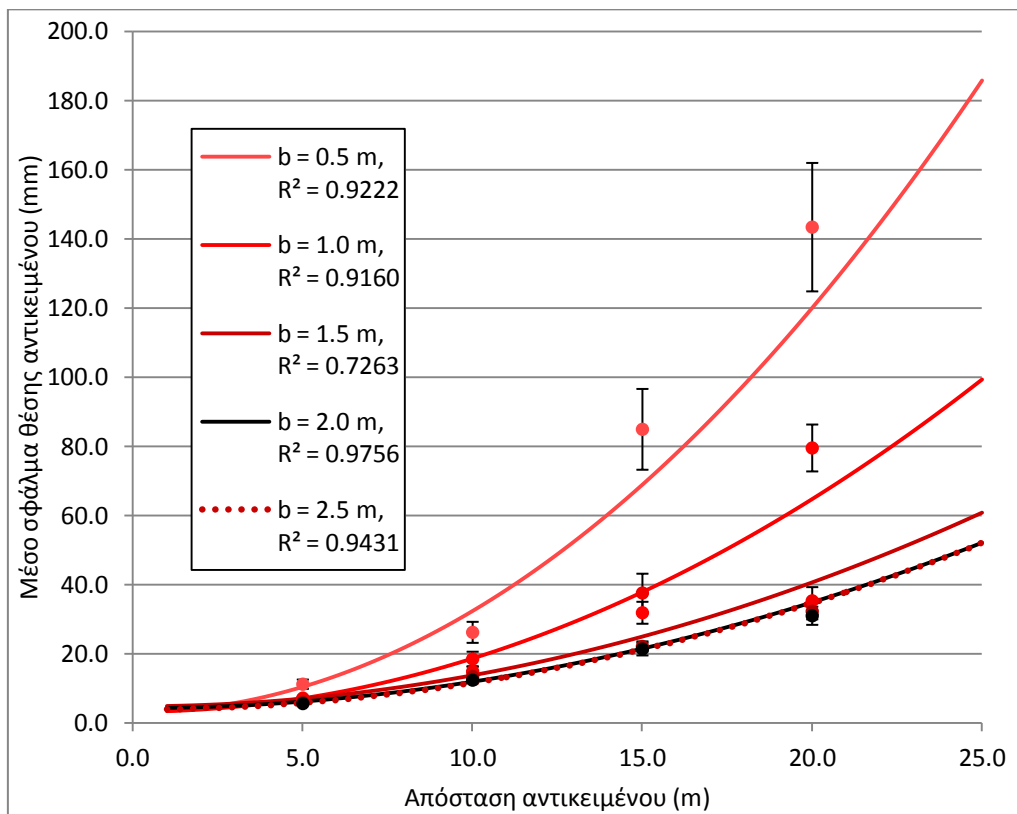


Διάγραμμα 3-1: Κατανομή σφάλματος εμπροσθοτομίας

Εξετάστηκε επίσης η συμπεριφορά του σφάλματος ως προς τη βάση λήψης και την αντικειμενική απόσταση. Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα φαίνεται να επιβεβαιώνουν τις προβλέψεις της θεωρίας. Οι μετρήσεις που αφορούν στο ζεύγος 2-5 χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα σφάλματα. Επειδή η εικόνα 5 συμμετείχε μόνο στο συγκεκριμένο ζεύγος, μπορεί αυτή η διαφορά να αποτελεί ένδειξη χονδροειδούς σφάλματος μόνο σε αυτή την εικόνα. Προβληματικές είναι επίσης όλες οι μετρήσεις στην ομάδα στόχων των 15 m, ακόμα και για τις μεγαλύτερες βάσεις λήψης. Η διασπορά των μεμονωμένων μετρήσεων είναι τόσο μικρή ώστε να μη δικαιολογεί την απόκλιση από τις προβλεπόμενες τιμές, δεδομένης και της καλύτερης ακρίβειας της ομάδας των 20 m.



Διάγραμμα 3-2: Μέσο σφάλμα εμπροσθοτομίας προσομοίωσης συναρτήσει βάσης λήψης



Διάγραμμα 3-3: Σφάλμα εμπροσθοτομίας προσομοίωσης συναρτήσει αντικειμενικής απόστασης

3.3. Εξωτερικός προσανατολισμός – οπισθοτομία

Προσδιορίστηκε ο εξωτερικός προσανατολισμός κάθε εικόνας χρησιμοποιώντας πρώτα την κόκκινη ομάδα φωτοσταθερών των 5 m και τη λευκή ομάδα των 20 m, προκειμένου τα αποτελέσματα να συγκριθούν με τις γνωστές τιμές θέσης και προσανατολισμού. Τα μεν αποτελέσματα των θέσεων δείχνουν να επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις που έγιναν στη θεωρητική ανάλυση. Η απόκλιση της θέσης του προβολικού κέντρου και στις έξι εικόνες είναι κατά μέσο όρο 4 φορές μεγαλύτερη στη μέτρηση που βασίστηκε σε φωτοσταθερά 4 φορές μακρύτερα από το προβολικό κέντρο, το δε σφάλμα επίσης αυξάνεται αναλόγως. Αντίθετα, ο υπολογισμός των στροφών των εικόνων ήταν ανεπιτυχής, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα τα οποία δεν ακολουθούν το προβλεπόμενο μοτίβο και χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλά σφάλματα. Αιτία φαίνεται να είναι η μικρή κλίμακα της εικόνας και συνεπώς το μεγάλο γωνιακό μέγεθος του pixel, 615 cc.

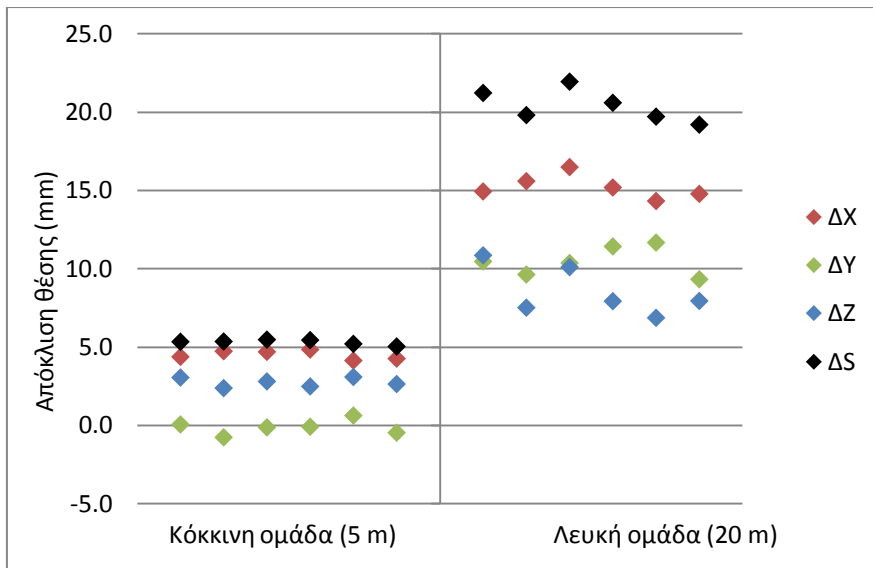
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Κόκκινη ομάδα (5 m)				
Εικόνα	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	ΔS (mm)
1	4.4	0.1	3.1	5.3
2	4.7	-0.8	2.4	5.4
3	4.7	-0.1	2.8	5.5
4	4.8	-0.1	2.5	5.4
5	4.1	0.6	3.1	5.2
6	4.3	-0.5	2.6	5.0
Μέση τιμή	4.5 ± 0.1	-0.1 ± 0.2	2.7 ± 0.1	5.3 ± 0.1
Λευκή ομάδα (20 m)				
Εικόνα	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	ΔS (mm)
1	14.9	10.5	10.9	21.2
2	15.6	9.6	7.5	19.8
3	16.5	10.4	10.1	21.9
4	15.2	11.4	7.9	20.6
5	14.3	11.7	6.9	19.7
6	14.8	9.3	7.9	19.2
Μέση τιμή	15.2 ± 0.3	10.5 ± 0.4	8.5 ± 0.6	20.4 ± 0.4

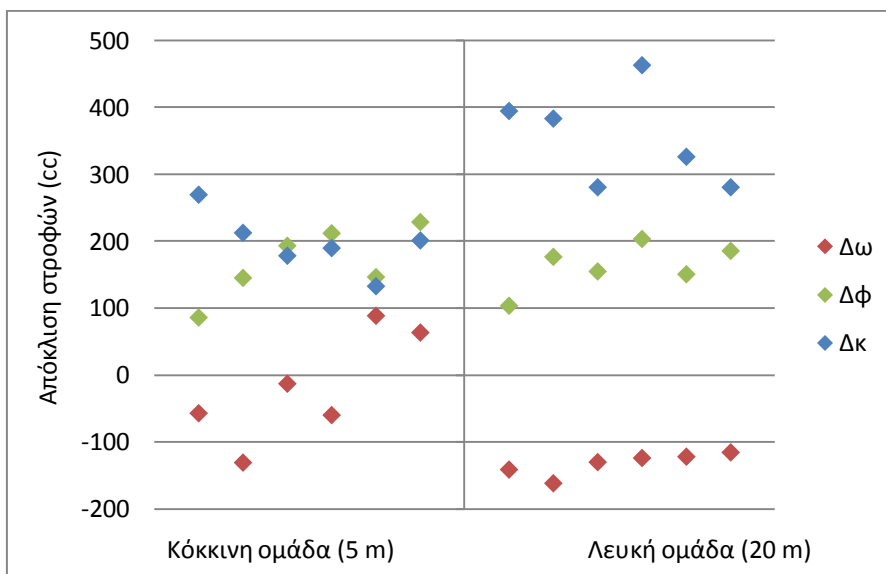
Πίνακας 3-1: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση θέσης

Εικόνα	Κόκκινη ομάδα (5 m)			Λευκή ομάδα (20 m)		
	Δω (cc)	ΔΦ (cc)	Δκ (cc)	Δω (cc)	ΔΦ (cc)	Δκ (cc)
1	-57	86	270	-141	104	395
2	-130	145	213	-161	177	383
3	-13	193	178	-130	155	281
4	-60	212	190	-124	203	463
5	89	147	133	-122	151	326
6	64	229	201	-115	186	281
Μέση τιμή	-18 ± 34	169 ± 22	197 ± 18	-132 ± 34	163 ± 14	355 ± 29

Πίνακας 3-2: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση στροφών



Διάγραμμα 3-4: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση θέσης



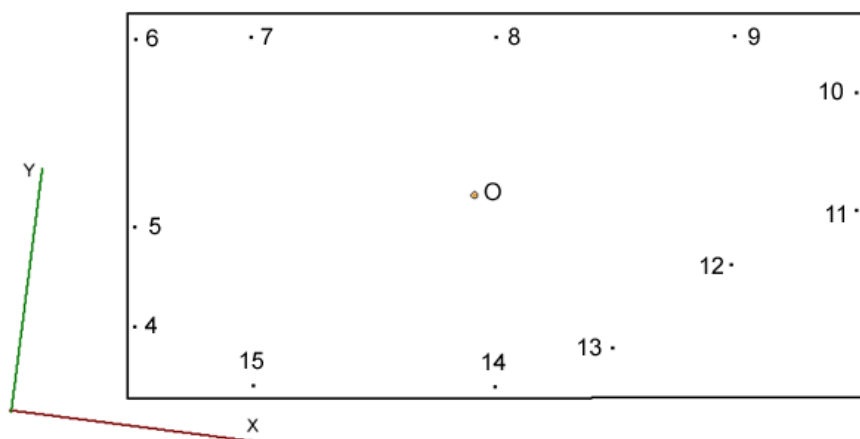
Διάγραμμα 3-5: Αποτελέσματα οπισθοτομίας προσομοίωσης, απόκλιση στροφών

4. Πρακτική εφαρμογή

Για την τελική αξιολόγηση της βιωσιμότητας της μεθόδου πραγματοποιήθηκε πειραματική εφαρμογή της σε πραγματικές συνθήκες. Η ροή των εργασιών περιλαμβάνει αναγνώριση του χώρου, λήψη και συρραφή των πανοραμικών εικόνων, μέτρηση εικονοσυντεταγμένων, επίλυση του συστήματος και απόδοση τμήματος του χώρου.

4.1. Αναγνώριση του χώρου

Αντικείμενο της αποτύπωσης είναι το υπόγειο πεδίο ελέγχου της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Ο χώρος προτιμήθηκε για τη διαθεσιμότητα καλά ορισμένων σταθερών σημείων σε κάθε κατεύθυνση και τις σχετικά μικρές αποστάσεις. Για τις ανάγκες των μετρήσεων είναι διαθέσιμα 12 φωτοσταθερά, αριθμημένα 4 έως 15, ομοιόμορφα κατανεμημένα στον χώρο, με αβεβαιότητα 0.2 mm.



Εικόνα 4-1: Κατανομή φωτοσταθερών υπογείου

4.2. Λήψη

Οι δύο πανοραμικές εικόνες που μετρήθηκαν παρήχθησαν από συρραφή απλών λήψεων, οι οποίες έγιναν με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon EOS-1D Mark II και χρήση τρίποδα και πανοραμικής κεφαλής. Ο τρίποδας τοποθετήθηκε σε τυχαία θέση κοντά στο κέντρο του χώρου και οριζοντιώθηκε κατά προσέγγιση χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη σφαιρική αεροστάθμη. Η κεφαλή ρυθμίστηκε στις 15 λήψεις ανά κύκλο (βήμα 24°). Η φωτογραφική μηχανή προσαρμόστηκε σε κατακόρυφο κάδρο, για μεγαλύτερη γωνία θέασης στην κατακόρυφη διεύθυνση, και ρυθμίστηκε αναλόγως για εξάλειψη της παράλλαξης σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης της κεφαλής. Χρησιμοποιήθηκε τηλεχειριστήριο ώστε να αποκλειστεί το ενδεχόμενο μετακίνησης της μηχανής από τον χειριστή τη στιγμή της λήψης. Μετά το

πέρας των πρώτων 15 λήψεων, προεκτείνοντας την κεντρική στήλη του τρίποδα και τοποθετώντας ολόκληρη τη διάταξη πάνω σε τρεις καρέκλες, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με σκοπό να ληφθεί άλλο ένα σύνολο εικόνων όσο το δυνατόν ψηλότερα, κοντά στην οροφή της αίθουσας. Σε αυτήν την περίπτωση οι επιμέρους λήψεις έγιναν με στροφή προς το δάπεδο, ώστε να περιέχουν λιγότερη άχρηστη πληροφορία της οροφής και περισσότερη από την υπόλοιπη αίθουσα. Οριζοντιογραφικά, επιδιώχθηκε να ταυτίζονται κατά προσέγγιση τα ίχνη των προβολικών κέντρων των δύο εικόνων. Για τον σκοπό αυτό έγινε έλεγχος των θέσεων χρησιμοποιώντας νήμα της στάθμης και σημειώνοντας το ίχνος του προβολικού κέντρου στο δάπεδο της αίθουσας. Η συγκεκριμένη διάταξη των πανοραμικών εικόνων επιλέχθηκε αποσκοπώντας στην ομοιόμορφη ακρίβεια απόδοσης σε κάθε κατεύθυνση και το ενδεχόμενο στερεοσκοπικής παρατήρησης.

4.3. Συρραφή - απόδοση

Η συρραφή των εικόνων έγινε στο λογισμικό Hugin. Σε πρώτο στάδιο σκοπεύονται τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των εικόνων που χρειάζεται το λογισμικό για να συνθέσει την πανοραμική εικόνα. Δόθηκε προσοχή στην κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή των σημείων μέσα στο επικαλυπτόμενο τμήμα κάθε ζεύγους εικόνων. Η επικάλυψη και η υφή των εικόνων δεν επέτρεψαν να σκοπευθούν πάνω από 4 ή 5 αξιόπιστα σημεία ανά ζεύγος (το ελάχιστο απαιτούμενο πλήθος είναι 3 σημεία ανά ζεύγος). Το λογισμικό διορθώνει αυτόματα για τις παραμέτρους εσωτερικού προσανατολισμού βάσει ενός μοντέλου διαστροφών.

Το Hugin εκφράζει το σφάλμα συρραφής ως την απόσταση, σε pixel, μεταξύ της αναμενόμενης και της προκύπτουσας θέσης ενός σημείου. Οι παράγοντες που συνεισφέρουν σε αυτό το σφάλμα είναι η παράλλαξη (μετατόπιση του προβολικού κέντρου μεταξύ λήψεων), η κίνηση (μετατόπιση του αντικειμένου μεταξύ λήψεων) και η λάθος αποκατάσταση των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού.

Η εκτίμηση της ακρίβειας συρραφής των δύο εικόνων από το λογισμικό έχει ως εξής:

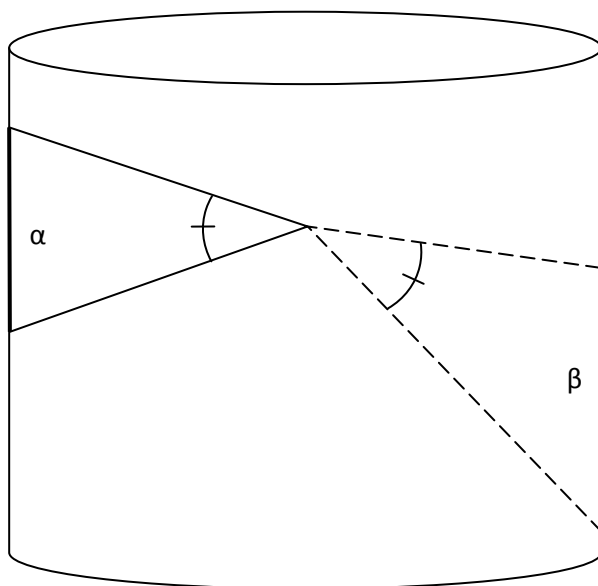
Εικόνα	Σημεία σύνδεσης	Μέσο σφάλμα (px)	Μέγιστο σφάλμα (px)
Άνω	59	0.9	2.5
Κάτω	63	0.2	0.8

Πίνακας 4-1: Σφάλμα συρραφής πανοραμικών εικόνων

Η άνω εικόνα παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερα σφάλματα. Πιθανότερη αιτία είναι η μετακίνηση της μηχανής λόγω της εκτεταμένης στήλης του τρίποδα και της σχετικά μεγαλύτερης αστάθειας της διάταξης σε σχέση με την κάτω εικόνα.

Σημειώνεται ότι η παραγωγή πανοραμικών εικόνων από συρραφή εισάγει σφάλματα που η χρήση κάμερας με γραμμικό αισθητήρα θα απέφευγε. Επίσης, ο σχετικά μικρός αριθμός σημείων σύνδεσης πιθανόν να οδήγησε το λογισμικό σε υποτίμηση του πραγματικού σφάλματος συρραφής. Δεδομένου όμως του διαθέσιμου εξοπλισμού και της έμφασης της εργασίας στο μετέπειτα στάδιο της φωτογραμμετρικής απόδοσης, η ποιότητα των πανοραμικών εικόνων κρίνεται ικανοποιητική, αν και με επιφύλαξη ως προς την επίδραση που θα έχουν στην ακρίβεια των μετρήσεων αργότερα.

Οι τελικές πανοραμικές εικόνες αποδίδονται ως αρχεία JPEG κυλινδρικής προβολής με διαστάσεις 19005 x 4615 px για την άνω εικόνα και 19005 x 3780 px για την κάτω εικόνα. Οι δύο εικόνες έχουν ίδια οριζόντια γωνία θέασης και παραπλήσιες κατακόρυφες γωνίες θέασης. Η μεγάλη διαφορά όμως στην y διάσταση οφείλεται στο ότι η α είναι στραμμένη προς το δάπεδο ενώ η β είναι οριζοντίως προσανατολισμένη. Η φύση της κατακόρυφης κλίμακας στην κυλινδρική προβολή είναι αυτή που δίνει μεγαλύτερη y διάσταση στην άνω εικόνα, εφόσον ένα αντικείμενο σταθερού γωνιακού μεγέθους, όσο απομακρύνεται από τον ορίζοντα, απεικονίζεται σε περισσότερες σειρές της ψηφιακής εικόνας.



Εικόνα 4-2: Επίδραση της στροφής στην y διάσταση της εικόνας

Ως προεπιλογή, το Hugin αποδίδει τις πανοραμικές εικόνες με τον ορίζοντα στο μέσο της y διάστασης. Ενώ στην κάτω εικόνα ο ορίζοντας είναι στο μέσο της y διάστασης, δεν ισχύει το ίδιο και για την άνω εικόνα, όπου ο ορίζοντας είναι κοντά στην άνω πλευρά. Στην αρχική της μορφή εντός του λογισμικού, η άνω εικόνα, έχοντας τον ορίζοντα στο μέσο, είχε αναγκαστικά και διπλάσια y διάσταση (8640 px), οπότε ήταν κατά το ήμισυ χωρίς πληροφορία. Στη συνέχεια αφαιρέθηκε από την αρχική εικόνα η κενή περιοχή από το άνω άκρο έως ένα αυθαίρετο σημείο. Επειδή το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς προϋποθέτει ο ορίζοντας να αντιστοιχεί στο μέσο της y διάστασης της εικόνας, αξιοποιείται το εξής τέχνασμα: Οι εικονοσυντεταγμένες μετρώνται κανονικά στην κομμένη εικόνα, με αφετηρία του y άξονα την κατώτατη σειρά, και κατά τη διαδικασία των υπολογισμών εισάγεται ως y διάσταση το αρχικό μέγεθος των 8640 px. Σαν αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος θεωρεί τον ορίζοντα στη σειρά $y = 8640/2 = 4320$ px, κοντά στην άνω πλευρά της κομμένης εικόνας, και όχι στα 2308 px, που είναι η μισή y διάσταση της κομμένης εικόνας.

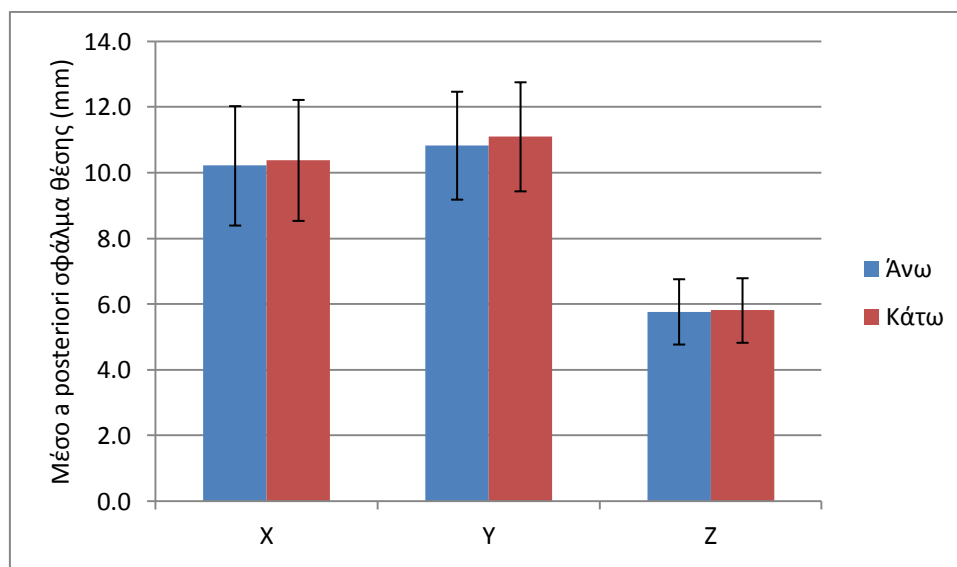
4.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων

4.4.1. Εξωτερικός προσανατολισμός – οπισθοτομία

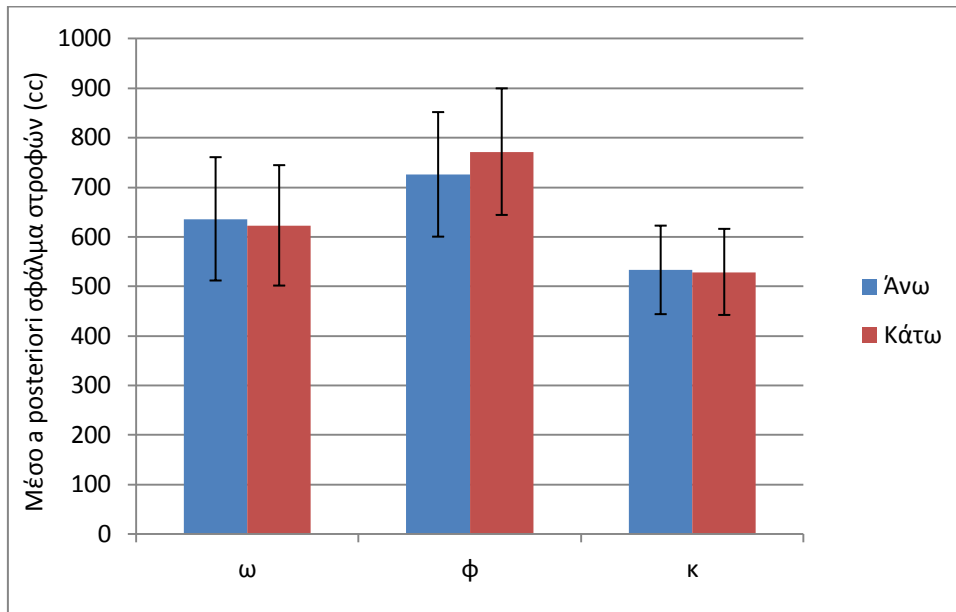
Σε πρώτο στάδιο έγιναν μερικές επιλύσεις του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, από 11 συνδυασμούς διαφορετικού αριθμού φωτοσταθερών. Επειδή οι θέσεις των προβολικών κέντρων είναι άγνωστες, το μόνο κριτήριο αξιολόγησης είναι το a posteriori σφάλμα της συνόρθωσης για κάθε έναν από τους 6 παράγοντες του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι το σφάλμα της επίλυσης είναι γενικά μεγάλο, όμοιο για τις δύο εικόνες και επηρεάζεται σημαντικά από την επιλογή των φωτοσταθερών. Παρ' όλα αυτά, το μέσο υψομετρικό σφάλμα των προβολικών κέντρων, $\overline{\delta Z_0} = 5.8 \text{ mm}$, είναι σημαντικά μικρότερο από τα οριζοντιογραφικά $\overline{\delta X_0} = 10.2 \text{ mm}$ και $\overline{\delta Y_0} = 10.8 \text{ mm}$ αντίστοιχα. Παρά τη μεγαλύτερη κλίμακα των εικόνων σε σχέση με την προσομοίωση, η ακρίβεια προσδιορισμού των στροφών εξακολουθεί να είναι χαμηλή.

Εικόνα	$\overline{\delta X_0}$ (mm)	$\overline{\delta Y_0}$ (mm)	$\overline{\delta Z_0}$ (mm)	$\overline{\delta \omega}$ (cc)	$\overline{\delta \varphi}$ (cc)	$\overline{\delta \kappa}$ (cc)
Άνω	10.2 ± 1.8	10.8 ± 1.6	5.8 ± 1.0	636 ± 124	726 ± 126	533 ± 89
Κάτω	10.4 ± 1.8	11.1 ± 1.7	5.8 ± 1.0	623 ± 122	771 ± 128	529 ± 87

Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα οπισθοτομίας εφαρμογής, σφάλμα θέσης και στροφών



Διάγραμμα 4-1: Αποτελέσματα οπισθοτομίας εφαρμογής, σφάλμα θέσης



Διάγραμμα 4-2: Αποτελέσματα οπισθοτομίας εφαρμογής, σφάλμα στροφών

Τα σφάλματα αναλύθηκαν και ως προς ορισμένα χαρακτηριστικά κάθε επίλυσης, συγκεκριμένα το πλήθος των φωτοσταθερών, τη μέση κατά προσέγγιση απόσταση των φωτοσταθερών από τα προβολικά κέντρα, και την οριζόντια απόσταση του βαρύκεντρου των φωτοσταθερών από τα προβολικά κέντρα (ως μέτρο της ομοιομορφίας της κατανομής τους γύρω από αυτά). Σε καμία από αυτές τις περιπτώσεις δεν παρατηρήθηκε κάποια συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών με τα σφάλματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι συνιστώσες του σφάλματος θέσης και στροφών συνοψίζονται σε ένα μέγεθος, $\hat{\sigma}P_0 = \sqrt{\hat{\sigma}X_0^2 + \hat{\sigma}Y_0^2 + \hat{\sigma}Z_0^2}$ για τη θέση και $\hat{\sigma}R = \frac{\hat{\sigma}_\omega + \hat{\sigma}_\varphi + \hat{\sigma}_\kappa}{3}$ για τις στροφές.

Φωτοσταθερά (πλήθος)	Μέση απόσταση (m)	Απόσταση βαρύ- κεντρου (m)	δP_0 , άνω (mm)	δR , άνω (cc)	δP_0 , κάτω (mm)	δR , κάτω (cc)
Όλα (12)	9.71	0.16	11.6	510	11.9	514
4 5 7 8 10 11 13 14 (8)	9.49	0.48	16.9	744	17.3	753
5 7 9 11 13 15 (6)	9.84	0.42	14.0	560	14.2	560
4 6 8 10 12 14 (6)	9.57	0.11	23.2	1010	23.9	1026
8 9 10 11 12 13 (6)	9.34	7.93	20.7	563	20.3	592
4 5 6 7 14 15 (6)	10.05	2.69	8.8	274	9.0	281
7 8 9 12 13 14 (6)	7.66	2.60	15.2	714	15.6	726
4 5 6 10 11 15 (6)	11.75	2.69	7.5	223	7.6	223
4 7 10 13 (4)	10.16	0.43	34.6	1248	35.2	1252
7 8 13 14 (4)	6.81	0.44	15.7	797	16.3	823
4 5 10 11 (4)	12.17	0.94	13.4	303	13.5	302

Πίνακας 4-3: Σφάλμα οπισθοτομίας εφαρμογής συναρτήσεων των συνδυασμών φωτοσταθερών

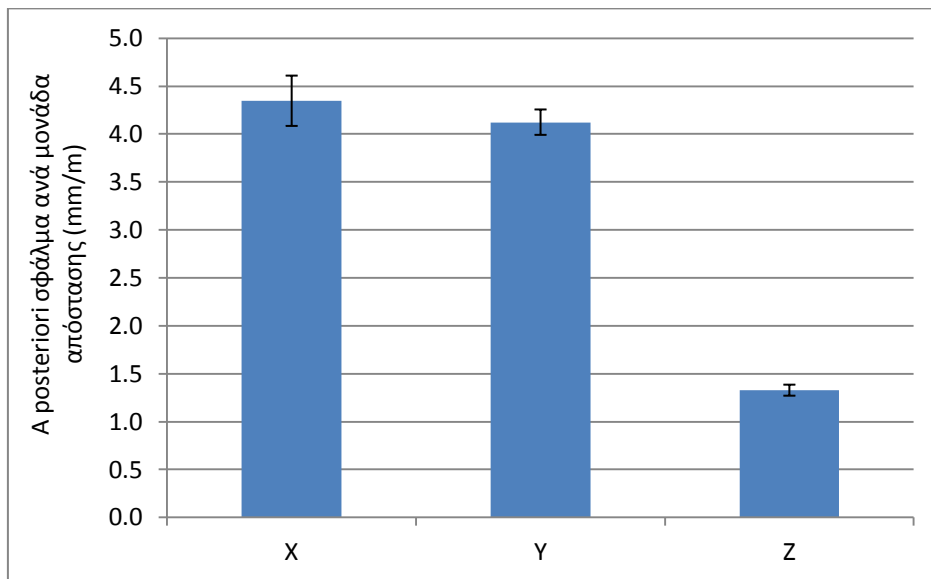
4.4.2. Ολοκληρωμένη επίλυση

Αφού σκοπεύθηκαν 100 αντικειμενικά σημεία στις δύο εικόνες, επιλέχθηκε ο συνδυασμός φωτοσταθερών που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα στις δοκιμές οπισθοτομίας (4 5 6 10 11 15), προκειμένου να πραγματοποιηθεί επίλυση ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Τα υπόλοιπα σημεία (7 8 9 12 13 14) συμμετείχαν ως σημεία ελέγχου. Στα αντικειμενικά σημεία δόθηκαν αρχικές τιμές προσεγγιστικά, ενώ στις 12 παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων δόθηκαν ως αρχικές τιμές τα αποτελέσματα του προηγούμενου πειράματος. Το σύστημα αποτελείται από 448 παρατηρήσεις και 330 αγνώστους.

Η επίλυση διεκόπη μετά από τέσσερις επαναλήψεις, με την τυπική απόκλιση της μονάδας βάρους να έχει συγκλίνει στην τιμή $\hat{\sigma}_0 = 1.85$ px. Εκτός από τις τιμές και τα σφάλματα των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού, υπολογίστηκαν για κάθε άγνωστο σημείο οι τιμές του a posteriori σφάλματος ανά μονάδα οριζόντιας απόστασης από τα προβολικά κέντρα, ως $\hat{\sigma}'X = \frac{\hat{\sigma}^X}{D}$, $\hat{\sigma}'Y = \frac{\hat{\sigma}^Y}{D}$, $\hat{\sigma}'Z = \frac{\hat{\sigma}^Z}{D}$, όπου $D = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}$.

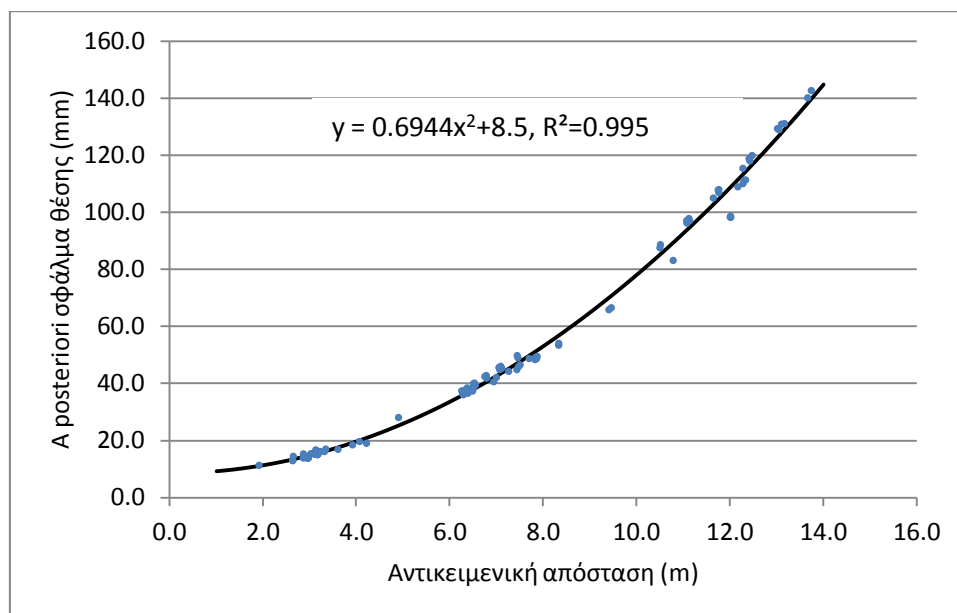
Για τα έξι σημεία ελέγχου, υπολογίστηκε επιπλέον η απόκλιση της θέσης τους από τις γνωστές τιμές. Η μέση απόκλισή τους από τις γνωστές θέσεις είναι υψηλή, αλλά συμβαδίζει απόλυτα με το μέσο σφάλμα τους, που σημαίνει ότι η επίλυση, παρά τη χαμηλή ακρίβεια, έγινε χωρίς συστηματικά ή χονδροειδή σφάλματα.

Παρατηρείται ότι το σφάλμα της εμπροσθοτομίας κατανέμεται μεν κυρίως στις οριζόντιες διευθύνσεις, αλλά σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι προβλεπόταν στην προσομοίωση. Αυτό εξηγείται από την ανομοιόμορφη κατανομή του σφάλματος της θέσης των προβολικών κέντρων, όπου πάλι η οριζόντια θέση υστερεί σε ακρίβεια έναντι του υψομέτρου.



Διάγραμμα 4-3: Κατανομή αναλογικού σφάλματος εμπροσθοτομίας εφαρμογής

Η σχέση του σφάλματος με την αντικειμενική απόσταση επιβεβαιώνει τις προβλέψεις της θεωρίας και της προσομοίωσης, είναι δηλαδή ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης.



Διάγραμμα 4-4: Σφάλμα εμπροσθοτομίας εφαρμογής συναρτήσεϊ αντικειμενικής απόστασης

Ο σταθερός όρος στην παραπάνω συνάρτηση αντιστοιχεί στο μέρος του σφάλματος που μεταδίδεται στα αντικειμενικά σημεία από εξωτερικές πηγές, με κυριότερη την αβεβαιότητα των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού. Η τιμή του $\hat{\sigma}_0$ σηματοδοτεί καλή εσωτερική ακρίβεια της μορφής του αντικειμένου εις βάρος της ακρίβειας της κλίμακας.

5. Συμπεράσματα – προτάσεις

Κρίνοντας από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της πρακτικής εφαρμογής, συμπεραίνεται ότι η εξεταζόμενη μέθοδος υστερεί σε ορθότητα/εξωτερική ακρίβεια αλλά έχει αξιόλογες δυνατότητες εσωτερικής ακρίβειας, που σημαίνει ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην αποτύπωση εσωτερικών χώρων σε ανεξάρτητο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η χρήση συμπληρωματικών μετρήσεων μηκών διαμετρικά του χώρου θα συγκρατούσε τα σχετικά υψηλά σφάλματα κατά τη διαμήκη διεύθυνση με αποτέλεσμα καλύτερη ακρίβεια κλίμακας του αντικειμένου.

Επιπροσθέτως στα ζητήματα που εξετάστηκαν παραπάνω, αδυναμίες που παρουσιάστηκαν στη συγκεκριμένη εφαρμογή και χρήζουν μέριμνας είναι επίσης ο εσωτερικός προσανατολισμός (στην προκειμένη περίπτωση το σφάλμα συρραφής) και η κλίμακα των εικόνων. Ένας σημαντικός παράγοντας, που είναι όμως πιο δύσκολο να βελτιστοποιηθεί, είναι η βάση λήψης. Αξίζει να εξετασθεί κατά πόσο οι συμπληρωματικές μετρήσεις μηκών που προτάθηκαν παραπάνω μπορούν να μετριάσουν τις δύσκολα ικανοποιήσιμες απαιτήσεις σε βάση λήψης.

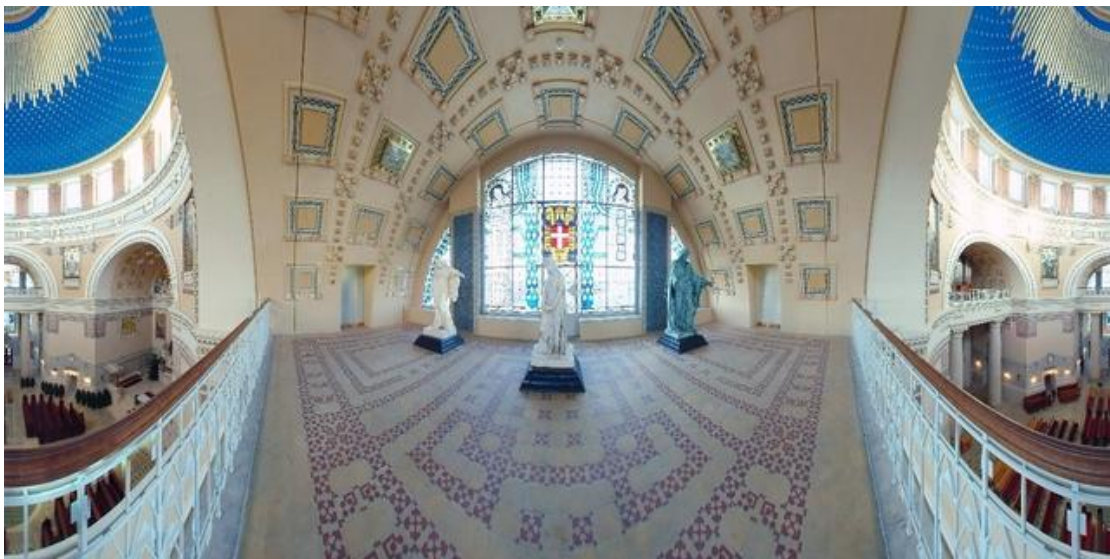
6. Βιβλιογραφία

- Fangi, G., & Nardinocchi, C. (2013). Photogrammetric processing of spherical panoramas. *The photogrammetric record*, 28(143), 293-311.
- Luhmann, T. (2004, February). A historical review on panorama photogrammetry. In *Proceedings of panoramic Photogrammetry workshop. Dresden, Germany*.
- Richardt, C., Pritch, Y., Zimmer, H., & Sorkine-Hornung, A. (2013, June). Megastereo: Constructing high-resolution stereo panoramas. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on* (pp. 1256-1263). IEEE.
- Schneider, D., & Maas, H. G. (2005). Combined bundle adjustment of panoramic and central perspective images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5/W8), 4.
- Schneider, D., & Maas, H. G. (2006). A geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 198-210.
- Schwalbe, E. (2005, February). Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems. In *Proc. 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 36, No. Part 5, p. W8).
- Panorama formats - PanoTools.org Wiki (2015, June)
http://wiki.panotools.org/Panorama_formats
- Projections - PTGui Stitching Software (2015, June)
<http://www.ptgui.com/man/projections.html>
- Computer vision laboratory, Columbia University (2015, June). Catadioptric Cameras for 360 Degree Imaging
http://www.cs.columbia.edu/CAVE/projects/cat_cam_360/
- MK-3 Panoramic Digital Camera Information(2015, June)
<http://www.panoscan.com/MK3/index.html>
- Panoramic cameras (2015, June)
http://www.berk-edu.com/HYB_subsite/pano.html
- Trimble V10 Imaging Rover (2015, June)
<http://www.trimble.com/Survey/Trimble-V10-Imaging-Rover.aspx>

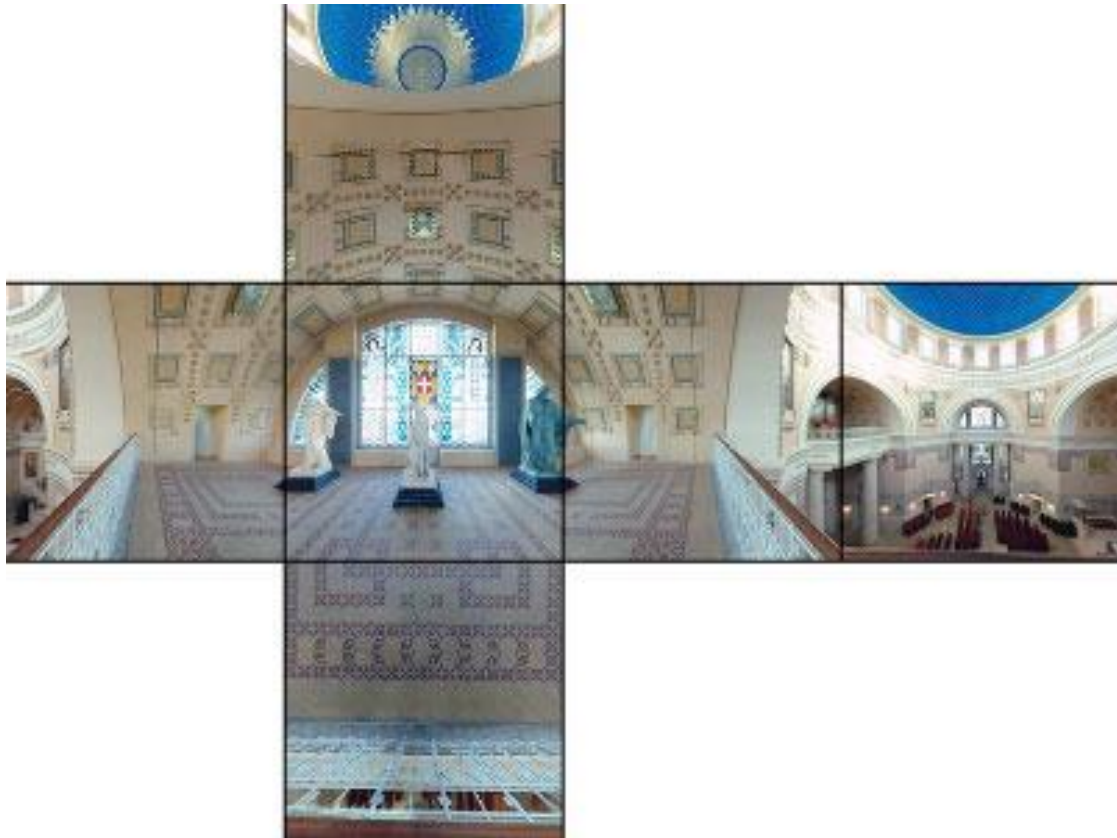
7. Παράρτημα



Εικόνα 7-1: Κεντρική προβολή



Εικόνα 7-2: Κυλινδρική προβολή



Εικόνα 7-3: Κυβική προβολή



Εικόνα 7-4: Κυλινδρική ισαπέχουσα προβολή



Εικόνα 7-5: Στερεογραφική προβολή

Pt	X (m)	Y (m)	H (m)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_H (mm)
4	3.5036	7.8727	10.9660	0.1	0.2	0.1
5	3.1132	11.1129	11.1623			
6	2.3425	17.2082	11.2606			
7	6.1123	17.7523	10.9728			
8	14.0798	18.7884	10.9763			
9	21.8368	19.8259	10.6780			
10	26.0371	18.4794	10.7927			
11	26.5301	14.6196	10.5894			
12	22.6685	12.3641	10.8829			
13	19.1463	9.1798	10.6365			
14	15.4992	7.4201	10.9307			
15	7.6132	6.4373	10.9367			

Πίνακας 7-1: Συντεταγμένες φωτοσταθερών πρακτικής εφαρμογής



Εικόνα 7-6: Διάταξη λήψεων πρακτικής εφαρμογής