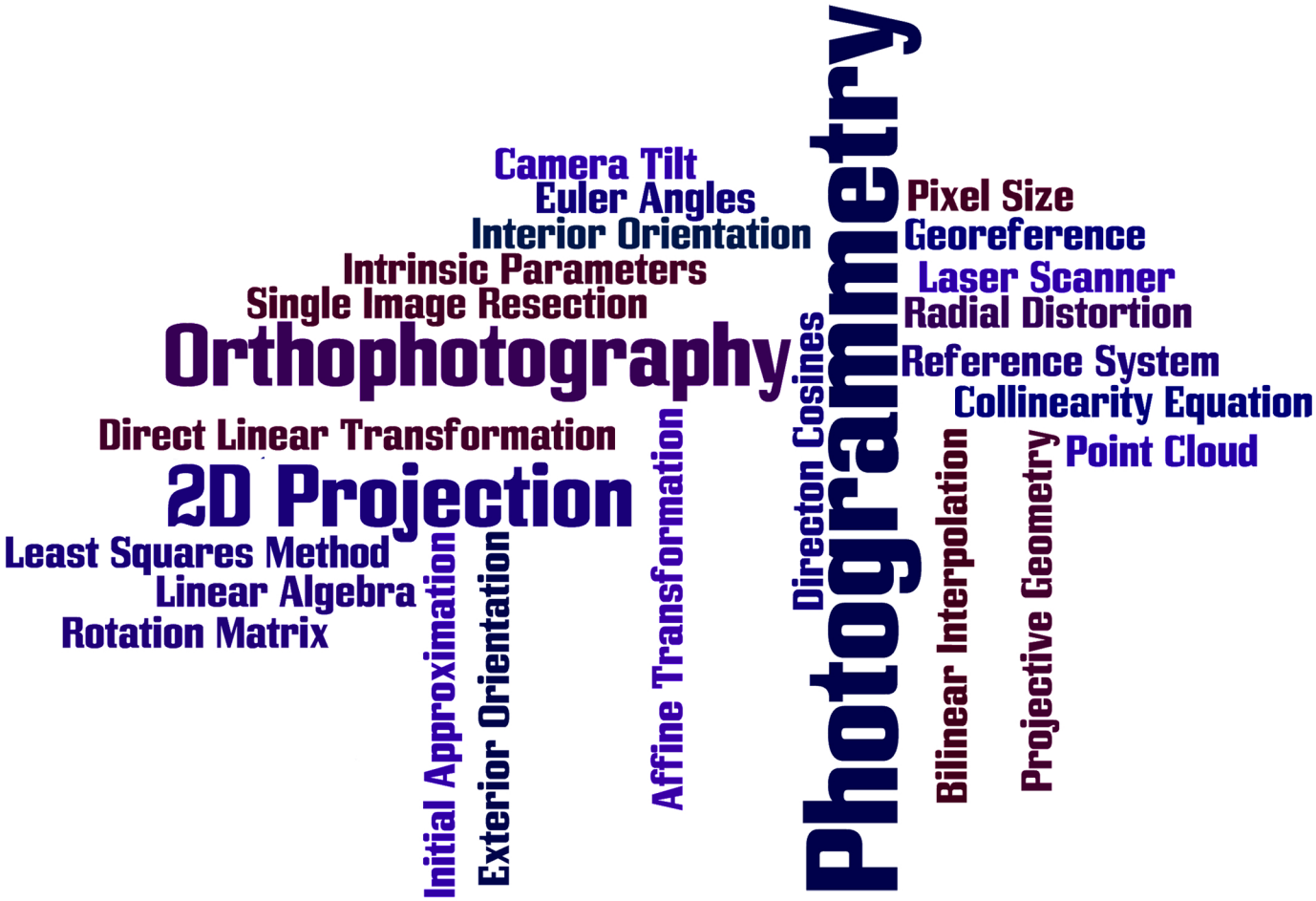
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

"Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις"



Διπλωματική Εργασία

Γεωργία Τζοβλά

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Ανάπτυξη Λογισμικού Φωτογραμμετρικών Μονοεικονικών Δαδικασιών χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Γεωργίας Τζοβλά

Επιβλέπων : Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστώ όλους όσους συνέβαλλαν στην πραγματοποίηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, ο καθένας με τον δικό του τρόπο.

Ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου τον κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο. Η επιρροή του και η καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων ήταν καταλυτικής σημασίας. Παραδίδοντας πρώτα μαθήματα ζωής και ύστερα φωτογραμμετρίας αποτέλεσε έμπνευση για περαιτέρω προσωπική αναζήτηση.

Τον κ. Γιώργο Καρρά που μου αφιέρωσε απλόχερα τον χρόνο του, τις γνώσεις του και την βοήθειά του όποτε και αν τα χρειάστηκα, συμβάλλοντας με ουσιαστικό τρόπο στην εκπόνηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

Τον κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη που οι προσωπικές του παρατηρήσεις αποτέλεσαν έναυσμα για περαιτέρω προβληματισμό και βοήθησαν σημαντικά στην έκβαση της Διπλωματικής αυτής εργασίας.

Για την άμεση βοήθειά τους, ευχαριστώ τις Ταπεινάκη Σέβη και Σοϊλέ Σοφία.

Τους φίλους μου Ζαχαρία Κανδυλάκη, Χριστίνα Καρακίζη και Δημήτρη Φίλιππα για την βοήθεια τους μέχρι και την τελευταία στιγμή αλλά κυρίως για την φιλική τους υποστήριξη.

Τον εκτός φωτογραμμετρικού χώρου αλλά πολύ σημαντικό άνθρωπο που επηρέασε θετικά με τον δικό του τρόπο όχι μόνο την έκβαση αυτού του εγχειρήματος αλλά και την πορεία της ζωής μου, Νίκο Διαμαντόπουλο.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει ανιδιοτελώς όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θέλω να δώσω τις μεγαλύτερες μου ευχαριστίες στην φίλη μου και συμφοιτήτριά μου Τζίνα Σταυροπούλου που μαζί περάσαμε τα φοιτητικά μας χρόνια. Χάρη σε εκείνη έκλεισε με τον καλύτερο τρόπο αυτός ο κύκλος της ζωής μου, αλλά κυρίως την ευχαριστώ γιατί ένα μεγάλο κομμάτι της προσωπικής μου εξέλιξης μέσα σε αυτά τα χρόνια που πέρασαν το χρωστάω σε εκείνη.

Περίληψη

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, τα φωτογραμμετρικά προϊόντα μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται ευρέως για την γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων, και όχι μόνο, δεδομένου ότι συνδυάζουν μετρητική και εικονιστική πληροφορία. Επιπρόσθετα, η αναπτυσσόμενη τεχνολογία των σαρωτών laser δίνει πλέον την δυνατότητα της άμεσης και εύκολης παραγωγής ψηφιακών μοντέλων επιφανείας, διευκολύνοντας την γεωμετρική αποτύπωση μνημείων ή και άλλων αντικειμένων με έντονο ανάγλυφο. Ωστόσο, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε ακρίβεια, μέχρι τώρα οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις απαραίτητες γεωδαιτικές μετρήσεις.

Με αφορμή το παραπάνω σκεπτικό αποφασίστηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα περιορισμού των γεωδαιτικών μετρήσεων και γενικότερα των απαιτούμενων εργασιών στο πεδίο κατά την διαδικασία συλλογής δεδομένων για την παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων μεγάλης κλίμακας. Συγκεκριμένα προτείνεται μία διαφορετική μέθοδος βάσει της οποίας τα απαραίτητα φωτοσταθερά, αντί να μετρηθούν γεωδαιτικώς, επιλέγονται από ένα πυκνό και ακριβές νέφος σημείων. Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο νέφος και ως μοντέλο επιφανείας, οι μοναδικές απαιτούμενες εργασίες πεδίου είναι η σάρωση του αντικειμένου και οι φωτογραφικές λήψεις, οι οποίες δεν χρειάζονται αυστηρό προγραμματισμό. Προϊόν της συγκεκριμένης συνεργασίας είναι ένας αλγόριθμος και το συνοδευτικό του διαδραστικό παράθυρο μέσω του οποίου πραγματοποιούνται οι διαδικασίες της φωτογραμμετρικής αναγωγής και της ορθοαναγωγής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται ο προσδιορισμός του εξωτερικού προσανατολισμού μιας εικόνας με την διαδικασία της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας καθώς επίσης και η διαδικασία της αναγωγής. Με την ελαχιστοτετραγωνική επίλυση των εξισώσεων της Συνθήκης Συγγραμμικότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως εξισώσεις παρατήρησης για την επίλυση της οπισθοτομίας, προσδιορίζονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας. Ο μετασχηματισμός DLT χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο για την εύρεση των αναγκαίων για την συνόρθωση προσεγγιστικών τιμών των στοιχείων αυτών. Την μονοεικονική απόδοση επίπεδων αντικειμένων -κατακόρυφων ή κεκλιμένων- πραγματοποιεί η φωτογραμμετρική αναγωγή μέσω του προβολικού μετασχηματισμού, χρησιμοποιώντας και σε αυτήν την περίπτωση ως δεδομένα εισόδου φωτοσταθερά επιλεγμένα από νέφος σημείων. Σε επόμενο στάδιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικά δεδομένα, αναλύονται οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν και γίνεται μία σύντομη αναφορά σε πιθανές βελτιώσεις του αλγορίθμου.

Abstract

Over the past decade, large scale photogrammetric products have been extensively used for many applications but mainly for the geometric documentation of cultural heritage monuments, as they combine metric information with the qualities of an image document. Additionaly, the rising technology of terrestrial laser scanners has enabled the easier and faster production of accurate digital surface models (DSM), which have in turn contributed in the documentation of heavily textured monuments. However, due to the required accuracy of control points, the photogrammetric methods are always applied in combination and, hence, dependent on surveying measurements.

Along this line of thought, we explored the possibility of limiting the surveying measurements and the field work necessary for the production of large scale photogrammetric output. To this effect a different method is proposed, on the basis of which, the necessary control points, instead of being measured with surveying procedures, are chosen from a dense and accurate point cloud. Using this point cloud also as a surface model, the only field work necessary is the scanning of the object and image acquisition, which need not be subject to strict planning. The product of this collaboration is an algorithm and the complementary interface through which 2D projective transformation and orthophoto generation take place.

This diploma thesis focuses on the Single-image Resection for the determination of the Exterior Orientation Parameters (EOPs), as well as on the 2D projective tranformation. The solution to the Single-Image resection is based on the Collinearity equations through the least squares method. Due to the fact that Collinearity equations are not linear, Direct Linear Transformation (DLT) is used to calculate initial approximations of EOPs. The implementation of the described process has been made in Matlab.

In addition, the results from applying this method are presented; we discuss the difficulties faced and briefly mention potential improvements of the algorithm, to be explored. Finally we briefly describe the conclusions reached and we present the specific standards required for achieving the optimal accuracy through this technique.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 1

1 Νέφη Σημείων στον χώρο και συστήματα αναφοράς..... 3

1.1 Σαρωτές Laser – 3D νέφος σημείων..... 3

1.2 Συστήματα αναφοράς..... 4

2 Αλγόριθμος..... 7

2.1 Βασικές παράμετροι εισόδου στον αλγόριθμο..... 7

2.1.1 Ψηφιακή εικόνα..... 7

2.1.2 Τρισδιάστατο νέφος σημείων..... 9

2.2 Γλώσσα Προγραμματισμού..... 9

3 Αλγόριθμος Εύρεσης Στοιχείων Εξωτερικού Προσανατολισμού..... 11

3.1 Μετρήσεις σημείων στην εικόνα..... 12

3.2 Μετρήσεις σημείων στο νέφος..... 12

3.3 Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού..... 12

3.3.1 Αφινικός μετασχηματισμός..... 13

3.3.2 Ακτινική Διαστροφή..... 15

3.4 Στροφές- Συστήματα αναφοράς..... 16

3.4.1 Στροφή I..... 18

3.4.2 Στροφή II..... 21

3.5 Εξωτερικός Προσανατολισμός..... 21

3.5.1 Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (Direct Linear Transformation)..... 22

3.5.2 Συνθήκη Συγγραμμικότητας..... 23

3.5.3 Οπισθοτομία..... 24

3.6 Έλεγχος..... 27

3.6.1 Προσομοίωση..... 27

3.6.2 Έλεγχος οπισθοτομίας με δεδομένα από 3D νέφος σημείων..... 27

3.6.2.1 Εφαρμογή 1..... 27

3.6.2.2 Εφαρμογή 2..... 30

3.6.2.3 Εφαρμογή 3..... 31

3.6.2.4 Εφαρμογή 4..... 32

3.6.2.5 Ορθοφωτογραφίες του αντικειμένου..... 33

3.6.3 Έλεγχος οπισθοτομίας με δεδομένα από γεωδαιτικές μετρήσεις..... 36

3.7 Προβλήματα- Συμπεράσματα....38
3.7.1 Επιλογή σημείων στο τρισδιάστατο νέφος....38
3.7.1.1 Επιλογή Λογισμικού....38
3.7.1.2 Ακρίβεια επιλογής σημείων στο νέφος....39
3.7.2 Επιλογή σημείων στην εικόνα....39
3.7.3 Στροφή γεωδαιτικού συστήματος....40
3.7.4 Προσεγγιστικές τιμές....41
3.7.4.1 Εύρεση προσεγγιστικών τιμών με τον DLT....42
4 Φωτογραμμετρική Αναγωγή....45
4.1 Στροφές Συστήματος....46
4.2 Υπολογισμός Παραμέτρων Προβολικού Μετασχηματισμού....46
4.3 Επανασύσταση Εικόνας....47
4.4 Γεωαναφορά....50
4.5 Έλεγχος αναγωγής....51
4.5.1 Έλεγχος με δεδομένα από 3D νέφος....51
4.5.1.1 Έλεγχος με προσημασμένα φωτοσταθερά....54
4.5.1.2 Έλεγχος γεωαναφερμένης εικόνας....55
4.5.2 Επίπεδο αντικείμενο υπό κλίση....56
4.5.2.1 Σύγκριση τελικής ανηγμένης εικόνας και ορθοφωτογραφίας....59
4.5.3 Έλεγχος με δεδομένα από γεωδαιτικές μετρήσεις....61
4.5.3.1 Έλεγχος γεωαναφερμένης εικόνας....64
4.5.3.2 Έλεγχος μέσω του Λογισμικού MPT....65
4.6 Αξιολόγηση -Προβλήματα....65
5 Συμπεράσματα....67
5.1 Σχόλια....67
5.2 Προτάσεις για το μέλλον....68
6 Εγχειρίδιο χρήσης....69
6.1 Βασικές προϋποθέσεις λειτουργίας....70
6.2 Εισαγωγή Δεδομένων....71
6.2.1 Εισαγωγή εικόνας....71
6.2.2 Εισαγωγή συντεταγμένων pixel....72
6.2.3 Εισαγωγή 3D συντεταγμένων....73

6.2.4 Εισαγωγή νέφους σημείων..... 73
6.2.5 Εισαγωγή στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού..... 75
6.3 Λειτουργίες και αποθήκευση.....75
6.4 Κατάλογος συνοδευτικών συναρτήσεων.....77
Βιβλιογραφία..... 79

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως φωτογραμμετρία ορίζεται η τέχνη, επιστήμη και τεχνολογία απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών σχετικά με φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας οπτικών εικόνων και προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πατιάς, 1994). Η επιστήμη αυτή χωρίζεται ανεπίσημα, ανάλογα με την απόσταση από το αντικείμενο, σε 2 κλάδους: στην εναέρια (Aerial) και στην επίγεια (Close-range) φωτογραμμετρία. Ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι απόλυτος καθότι οι μέθοδοι της εναέριας φωτογραμμετρίας μπορούν να εφαρμοστούν και σε μικρές αποστάσεις. Ο όρος, ωστόσο, "εναέρια φωτογραμμετρία" συνήθως αναφέρεται σε εικόνες που έχουν ληφθεί από αρκετά μεγάλη απόσταση από το αντικείμενο (π.χ. από ένα αεροπλάνο) και οι μέθοδοι της εφαρμόζονται κυρίως για την εξαγωγή χαρτογραφικών δεδομένων (π.χ. ορθοφωτοχάρτες). Αντίθετα η επίγεια φωτογραμμετρία έχει μία πληθώρα εφαρμογών σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους. Συγκεκριμένα στις διαδικασίες γεωμετρικής τεκμηρίωσης και αποτύπωσης μνημείων, οι μέθοδοι της επίγειας φωτογραμμετρίας έχουν ευρεία χρήση.

Η συμβολή της φωτογραμμετρίας στην γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων έγκειται στην παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων μεγάλης κλίμακας τα οποία είναι ικανά να περιγράψουν την υφιστάμενη κατάσταση του προς μελέτη αντικειμένου. Τα προϊόντα αυτά μπορεί να είναι εικονιστικά ή διανυσματικά, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα, και χρησιμεύουν αφενός σε μελέτες αναστήλωσης, προστασίας, στατικότητας και παρακολούθησης ρωγμών και αφετέρου στην απλή καταγραφή και αρχειοθέτηση. Η απαιτούμενη δουλειά γραφείου για την παραγωγή αυτών των προϊόντων έχει μειωθεί αρκετά λόγω της ανάπτυξης πολυάριθμων λογισμικών τα οποία οδεύουν σταδιακά προς την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Αντίθετα, αφού η γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων έχει μεγάλες απαιτήσεις σε ακρίβεια, οι εργασίες πεδίου για την συλλογή δεδομένων αποτελούν μία διαδικασία χρονοβόρα και με αυστηρές προδιαγραφές. Για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας, οι γεωδαιτικές μετρήσεις θεωρούνται αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων συμβάλλοντας επιβαρυντικά στον απαιτούμενο χρόνο.

Στο πλαίσιο συνεργασίας με τη Γεωργία Σταυροπούλου αποφασίστηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα απαλλαγής από γεωδαιτικές μετρήσεις με σκοπό την απλοποίηση των εργασιών υπαίθρου. Με εφαλτήριο την σκέψη πως τα απαραίτητα φωτοσταθερά για τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες μπορούν να επιλεγούν από ένα πυκνό και ακριβές νέφος σημείων, πραγματοποιήθηκαν οι διαδικασίες της αναγωγής και της ορθοαναγωγής ώστε να προκύψουν τα αντίστοιχα φωτογραμμετρικά προϊόντα. Η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί κανενός είδους γεωδαιτικές μετρήσεις, παρά μόνο την σάρωση του αντικειμένου μέσω ενός σαρωτή laser και φυσικά τις απαραίτητες φωτογραφικές λήψεις, ώστε να καλύπτεται το αντικείμενο μελέτης. Συγκεκριμένα στην περίπτωση της ορθοφωτογραφίας, ο υπολογισμός του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων πραγματοποιείται μονοεικονικά με την μέθοδο της οπισθοτομίας (Single image resection), ενώ το τρισδιάστατο νέφος σημείων χρησιμοποιείται ως μοντέλο επιφανείας. Η απαλλαγή από τις διαδικασίες του σχετικού και του απόλυτου προσανατολισμού, μειώνει ακόμα περισσότερο τις εργασίες πεδίου, καθώς δεν είναι πλέον απαραίτητος ο ενδελεχής προγραμματισμός λήψεων. Έτσι οι εικόνες λαμβάνονται ελεύθερα με ορισμένους μόνο περιορισμούς που θα αναπτυχθούν αργότερα.

Φιλοδοξία, ωστόσο, αυτής της κοινής εργασίας δεν ήταν μόνο ο περιορισμός των εργασιών υπαίθρου αλλά και η προσωπική εξοικείωση με τον προγραμματισμό. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γνωστική ανομοιογένεια που επικρατεί ανάμεσα σε τοπογράφους μηχανικούς και μηχανικούς ηλεκτρονικών υπολογιστών, με τους μεν να μην έχουν προγραμματιστική εξειδίκευση και τους δε να υπολείπονται τοπογραφικών και ειδικότερα φωτογραμμετρικών γνώσεων, γίνεται αντιληπτό ότι η παραγωγή και διακίνηση ελεύθερων λογισμικών για τις φωτογραμμετρικές μεθόδους βρίσκεται ακόμα στο πλαίσιο ανάπτυξης. Με σκοπό την συμβολή στη γενικότερη τάση προς τα ελεύθερα λογισμικά, αποφασίστηκε ολόκληρη η μέθοδος να αυτοματοποιηθεί με την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου και του αντίστοιχου διαδραστικού παράθυρου.

Το λογισμικό συντάχθηκε για λόγους ευκολίας στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab η οποία είναι σχεδιασμένη για την επεξεργασία πινάκων και εκτελείται μέσω παραθυρικού περιβάλλοντος κάνοντας το λογισμικό φιλικό προς τον χρήστη. Ο τρόπος σύνταξης του, οι δυνατότητες του αλλά και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει θα αναλυθούν εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια με απώτερο σκοπό την μελλοντική χρήση, επέκταση και βελτίωση του προγράμματος από κάθε ενδιαφερόμενο.

Το πρώτο μέρος του αλγορίθμου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της φωτογραφίας και την παραγωγή ορθοφωτογραφίας, ενώ το δεύτερο μέρος υλοποιεί φωτογραμμετρική αναγωγή. Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων που πραγματοποιείται μονοεικονικά με την μέθοδο της οπισθοτομίας (Single image resection) καθώς επίσης και την διαδικασία της μονοεικονικής απόδοσης επίπεδων αντικειμένων μέσω της φωτογραμμετρικής αναγωγής. Η διαδικασία για την παραγωγής ορθοφωτογραφίας περιγράφεται αναλυτικά στην Διπλωματική Εργασία της Γεωργίας Σταυροπούλου *“Ανάπτυξη Λογισμικού για την Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις”* (2013).

1 Νέφη Σημείων στον χώρο και συστήματα αναφοράς

1.1 Σαρωτές Laser – 3D νέφος σημείων

Ένα από τα προβλήματα στην παραγωγή ορθοφωτογραφιών μεγάλης κλίμακας σε μνημεία, είναι το έντονο ανάγλυφο του αντικειμένου σε σύγκριση με την απόσταση λήψης, κάτι που δεν συμβαίνει στην περίπτωση των εναέριων λήψεων. Μεταξύ των επίγειων και των εναέριων λήψεων εντοπίζονται επίσης σημαντικές διαφορές στην κλίμακα φωτογράφησης. Η απόσταση της μηχανής στις επίγειες λήψεις είναι μερικά μέτρα από το αντικείμενο σε αντίθεση με τα εκατοντάδες μέτρα απόστασης στην περίπτωση των αεροφωτογραφιών, με αποτέλεσμα οι στροφές του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας να επηρεάζουν πολύ περισσότερο την ποιότητα της ορθοφωτογραφίας.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός πυκνού και κατ' επέκταση αξιόπιστου Ψηφιακού Μοντέλου που θα οδηγήσει στην παραγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Η εμφάνιση των επίγειων σαρωτών laser δίνει λύση στα προβλήματα αυτά. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος σαρωτών στην αγορά σήμερα, που παρέχει την δυνατότητα επιλογής σαρωτή με διαφορετική ακρίβεια, βάρος, μέγεθος ή κόστος ανάλογα με τον σκοπό και τις προδιαγραφές της εργασίας.

Πρόκειται για μία μέθοδο συλλογής χωρικών μετρητικών δεδομένων εξ αποστάσεως (μη επαφή με το αντικείμενο) και βασίζεται στην τεχνολογία LIDAR ή Laser Radar όπου προσδιορίζεται η θέση του αντικειμένου με την αποστολή και λήψη δέσμης laser. Μέσω ενός μηχανισμού κατόπτρων που εκτρέπουν την ακτίνα ώστε να σαρωθεί συνολικά το αντικείμενο, παράγεται ταχύτατα ένα νέφος μετρητικών σημείων (3D pointcloud) με πληροφορίες τις συντεταγμένες X, Y, Z του σημείου στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή και επιπλέον πληροφορία την ένταση του ανακλώμενου σήματος (i) ή το χρώμα (r, g, b) ανά σημείο. Αποτέλεσμα είναι η σάρωση μεγάλου αριθμού σημείων που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο, προσφέροντας χωρική πληροφορία μεγάλης πυκνότητας. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες στην χρήση αυτή της τεχνολογίας σε εφαρμογές που απαιτούν πυκνά Ψηφιακά Μοντέλα όπως σε αρχαιολογικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Στις περισσότερες επίγειες εφαρμογές η συλλογή των δεδομένων για την δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων είναι σχεδόν αδύνατη με τοπογραφικές μεθόδους, λόγω του μεγέθους και του αναγλύφου των αντικειμένων. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η φωτογραμμετρική στερεοαπόδοση, δηλαδή η εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας από προσανατολισμένα ζεύγη φωτογραφιών του αντικειμένου. Ωστόσο, η διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες που υπάρχουν δεν παρέχουν σε όλες τις περιπτώσεις το επιθυμητό αποτέλεσμα, όπως για παράδειγμα στις περιπτώσεις έντονου αναγλύφου. Η συλλογή πυκνών Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας μεγάλης ακρίβειας και πυκνότητας σε λίγα μόλις λεπτά με την χρήση σαρωτών laser λύνουν τα προβλήματα αυτά.

Κάθε σαρωτής διαθέτει ένα λογισμικό επεξεργασίας των νεφών που παράγονται από αυτόν κάνοντας εύκολη την διαχείριση του μεγάλου όγκου αρχείων. Παρέχεται η δυνατότητα μεταφοράς των 3D δεδομένων σε άλλα λογισμικά για επιπλέον επεξεργασία των δεδομένων

και παραγωγή άλλων προϊόντων. Λόγω της αυξημένης χρήσης και ζήτησης έχουν αναπτυχθεί πολλά εμπορικά λογισμικά που επιτρέπουν την εύκολη διαχείριση και επεξεργασία των 3D νεφών, ανεξάρτητα από το είδος σαρωτή που χρησιμοποιείται.

Τα τρισδιάστατα νέφη, όπως ειπώθηκε παραπάνω, αποτελούν Ψηφιακά μοντέλα η ακρίβεια κι η πυκνότητα των οποίων καθορίζεται από την ακρίβεια των σαρωτών και τις απαιτήσεις των εκάστοτε εργασιών. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης γνωρίζει και καθορίζει την ακρίβεια των πρωτογενών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία παραγωγής των τελικών προϊόντων.

Δεν μπορεί να παραβλεφθεί το υψηλό κόστος ενός σαρωτή laser για την απόκτηση ενός 3D νέφους. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί η ύπαρξη ελεύθερων λογισμικών που παρέχουν τρισδιάστατα νέφη, ζητώντας από τον χρήστη μόνο, ως δεδομένα, επικαλυπτόμενες φωτογραφικές λήψεις του ζητούμενου αντικειμένου. Αξιοποιώντας τις ιδιότητες των στερεοσκοπικών μοντέλων, εξάγεται αυτόματα η τρισδιάστατη πληροφορία και ως εκ τούτου η δημιουργία νέφους σημείων. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης όμως δεν γνωρίζει την ακρίβεια παραγωγής του νέφους όπως επίσης δεν μπορεί να καθορίσει την πυκνότητα του. Παρ'όλα αυτά είναι πολύ σημαντική αυτή η δυνατότητα που δίνεται, καθώς ανοίγει έναν καινούργιο δρόμο για την παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων. Η διαδικασία για την απόκτηση των απαιτούμενων δεδομένων απλοποιείται, καθώς αφαιρείται από την διαδικασία η χρήση ειδικών οργάνων όπως Total Station και σαρωτών laser.

Σε κάθε περίπτωση η διαχείριση των νεφών απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ εξαιτίας του μεγέθους αυτών των αρχείων. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κατά την διαδικασία της σάρωσης του αντικειμένου, σαρώνεται όλη η ευρύτερη περιοχή γύρω από το αντικείμενο με αποτέλεσμα να περιλαμβάνεται στο νέφος ένα πλήθος περιττής πληροφορίας που πρέπει να αφαιρεθεί.

1.2 Συστήματα αναφοράς

Προτού αναλυθεί η εφαρμογή θα γίνει μια αναφορά στα διάφορα συστήματα συντεταγμένων που συμμετέχουν στην φωτογραμμετρική επεξεργασία και στη σχέση μεταξύ τους.

Σύστημα συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου. Πρόκειται για ένα 2D (x,y) σύστημα συντεταγμένων που έχει ως αρχή την προβολή του κέντρου xo, yo των φακών της φωτομηχανής στο επίπεδο του αρνητικού. Οι άξονες είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους και οι μονάδες μέτρησης των συντεταγμένων είναι σε χιλιοστά (mm). Το κέντρο των φακών αποτελεί και το κέντρο προβολής από το οποίο διέρχονται όλες οι οπτικές γραμμές που αποτυπώνουν τα αντικείμενα του 3D χώρου στον 2D χώρο του φωτογραφικού επιπέδου.

Σύστημα συντεταγμένων ψηφιακής εικόνας. Μια εικόνα παριστάνεται από έναν πίνακα που κάθε στοιχείο του ονομάζεται εικονοστοιχείο - pixel. Η ανάλυση της εικόνας είναι η διάσταση του πίνακα σε pixel. Οι συντεταγμένες των pixel είναι στο επίπεδο xy ενώ οι διαβαθμίσεις το γκρίζου θεωρούνται ως τιμές στον άξονα z (βάθος εικόνας). Η αρχή του συστήματος θεωρείται το κέντρο της πάνω αριστερής ψηφίδας της εικόνας και έχει συντεταγμένες i = 0, j = 0. Οι συντεταγμένες i, j αναφέρονται στα κέντρα των εικονοψηφίδων και έχουν ακέραιες τιμές.

Σύστημα συντεταγμένων του 3D χώρου- Επίγειο σύστημα αναφοράς. Πρόκειται για ένα τοπικό δεξιόστροφο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z με αυθαίρετη αρχή. Ο άξονας Z είναι κατά την διεύθυνση της τοπικής καθέτου στο ελλειψοειδές. Η σύνδεση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων και του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής προκύπτει αν υποτεθεί ότι για τη μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο αρκεί να γίνουν τρεις μεταθέσεις, παράλληλα προς τους τρεις άξονες Xo, Yo, Zo που ορίζουν στο επίγειο σύστημα τις συντεταγμένες του κέντρου των φακών και τρεις στροφές ω, φ, κ γύρω από κάθε άξονα, καθώς επίσης μία μεταβολή της κλίμακας των μετρήσεων (Σπάρταλης, 2007).

2 Αλγόριθμος

Το πρόγραμμα που θα παρουσιαστεί στη παρούσα διπλωματική αποτελείται από δύο ανεξάρτητους αλγόριθμους. Ο πρώτος υπολογίζει τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού μιας εικόνας ενώ ο δεύτερος πραγματοποιεί φωτογραμμετρική αναγωγή. Οι δύο αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται στην περίπτωση επίγειων λήψεων για την παραγωγή εικονιστικών φωτογραμμετρικών προϊόντων μεγάλης κλίμακας.

Τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού του πρώτου αλγορίθμου χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για την δημιουργία ορθοφωτογραφίας, τα στάδια της οποίας περιγράφονται στην διπλωματική εργασία *"Ανάπτυξη Λογισμικού Παραγωγής Ορθοφωτογραφίας Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις"* της Γεωργίας Σταυροπούλου (2013).

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιώντας έναν αριθμό σημείων με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες και εικονοσυντεταγμένες, υπολογίζει τα έξι στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού μέσω της διαδικασίας την φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας. Η διαφορά του από τις συνήθεις μεθόδους έγκειται στο γεγονός ότι τα χρησιμοποιούμενα φωτοσταθερά δεν προέρχονται από γεωδαιτικές μετρήσεις αλλά από ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων.

Ο δεύτερος αλγόριθμος πραγματοποιεί αναγωγή εικόνας ενός επίπεδου αντικειμένου. Όπως και στην πρώτη περίπτωση τα φωτοσταθερά προέρχονται από επιλογή των απαραίτητων σημείων σε ένα 3D νέφος.

2.1 Βασικές παράμετροι εισόδου στον αλγόριθμο

Για την υλοποίηση των αλγορίθμων είναι απαραίτητα τα παρακάτω δεδομένα εισόδου τα οποία πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις για την σωστή λειτουργία των διαδικασιών.

2.1.1 Ψηφιακή εικόνα

Για την λειτουργία του αλγορίθμου απαραίτητη είναι μία ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου. Η εικόνα αυτή πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις ώστε η εισαγωγή της στο πρόγραμμα να μην δημιουργήσει προβλήματα και επηρεάσει αρνητικά την λειτουργία του αλγορίθμου ή την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

- Το πρότυπο αποθήκευσης (format) των εικόνων που θα εισαχθούν είναι επιθυμητό να διατηρεί τα αρχεία των εικόνων ασυμπίεστα, να διατηρεί δηλαδή όλη την αρχική πληροφορία και ποιότητα των αρχικών εικόνων. Οι εικόνες TIFF διαθέτουν την ζητούμενη ποιότητα καθώς διατηρούν την ακρίβεια των πρωτογενών μη επεξεργασμένων αρχικών δεδομένων της φωτογραφικής μηχανής

- Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να έχει γνωστή σταθερά c σε κάθε λήψη. Σύμφωνα με έναν εμπειρικό κανόνα η κλίμακα της αρχικής εικόνας μπορεί να είναι έως 3-8 φορές μικρότερη από την τελική ορθοφωτογραφία. Για παράδειγμα , για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας σε κλίμακα 1:50 η κλίμακα των αρχικών εικόνων θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1:150-1:400. Με δεδομένη την σταθερά c της μηχανής (έστω $c=24\text{mm}$) η απόσταση λήψης κυμαίνεται περίπου μεταξύ 3.5 – 9.5 m, εφόσον ισχύει ότι $H=c\cdot k$.Αυτός ο εμπειρικός κανόνας βοηθάει τον χρήστη -ιδιαίτερα αν προέρχεται από διαφορετικό επιστημονικό πεδίο- να υπολογίσει τη μέση απόσταση του αντικειμένου από το φωτογραφικό φακό, καθορίζοντας την μέση κλίμακα της φωτογράφησης που συνδέεται άμεσα με την ανάλυση της φωτογραφικής εικόνας σε μονάδες εδάφους.

Εικόνα 2.1: Αριστερά :Εικόνα με φυσικό φωτισμό- Δεξιά: Εικόνα HDR

- Αξίζει να σημειωθεί ότι όλο και περισσότερο, σε μεγάλο φάσμα εργασιών, χρησιμοποιούνται οι εικόνες HDR (High Dynamic Range). Πρόκειται για μία ειδική τεχνική όπου συγχωνεύονται λήψεις της ίδιας σκηνής με διαφορετικές εκθέσεις και δημιουργείται μία τελική εικόνα με μεγαλύτερο δυναμικό εύρος από τις πρωτογενείς. Με τον τρόπο αυτό σε μία λήψη περιλαμβάνονται όλες οι πιθανές εκθέσεις του αντικειμένου σε διάφορους φωτισμούς. Με την χρήση των εικόνων HDR επιτυγχάνεται το βέλτιστο αποτέλεσμα, ιδιαίτερα σε δυσμενής συνθήκες φωτισμού. Είναι προφανές πως όσο καλύτερη είναι η χωρική και η ραδιομετρική ανάλυση της αρχικής εικόνας τόσο καλύτερο θα είναι το αποτέλεσμα του παραγόμενου προϊόντος (ορθοφωτογραφία ή αναγωγή).

2.1.2 Τρισδιάστατο νέφος σημείων

Το τρισδιάστατο νέφος σημείων είναι απαραίτητο για δύο βασικές λειτουργίες του προγράμματος. Αρχικά χρησιμοποιείται για την επιλογή των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων που επιλέγονται ως φωτοσταθερά και έπειτα ως Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας. Το νέφος σημείων δημιουργείται από την σάρωση του αντικειμένου με έναν τρισδιάστατο επίγειο σαρωτή. Τα σημεία που έχουν σαρωθεί αποθηκεύονται αυτόματα από τον σαρωτή και είναι διαθέσιμα για επεξεργασία. Κάθε σημείο περιγράφεται από τις συντεταγμένες X, Y, Z στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή laser και από μία τιμή ανακλαστικότητας (i) της επιφάνειας του σημείου ή από μια τριάδα τιμών που χαρακτηρίζει το χρώμα (R, G, B). Τα αρχεία της σάρωσης μπορούν να αποθηκευτούν σε διάφορες μορφές. Για την διευκόλυνση της μετατροπής του αρχείου σε .txt είναι επιθυμητή η μετατροπή των αρχικών δεδομένων σε μορφή αρχείου .dxf, μία μορφή που υποστηρίζεται από τα περισσότερα λογισμικά. Το τελικό αρχείο κειμένου περιέχει για κάθε σημείο έναν κωδικό (αύξοντα αριθμό) και τις αντίστοιχες συντεταγμένες του.

Για την καλύτερη λειτουργία του προγράμματος είναι επιθυμητό να έχουν αφαιρεθεί από το νέφος τα περιττά σημεία που αντιστοιχούν σε αντικείμενα του γύρω χώρου. Σε αντίθετη περίπτωση -εισαγωγή ολόκληρου του 3D νέφους - ο αλγόριθμος κόβει αυτόματα το νέφος διαγράφοντας τα περιττά σημεία. Αυτό γίνεται για λόγους βελτιστοποίησης της ταχύτητας του προγράμματος, καθώς όσα περισσότερα σημεία περιλαμβάνει το νέφος τόσο περισσότερο αυξάνεται ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου.

2.2 Γλώσσα Προγραμματισμού

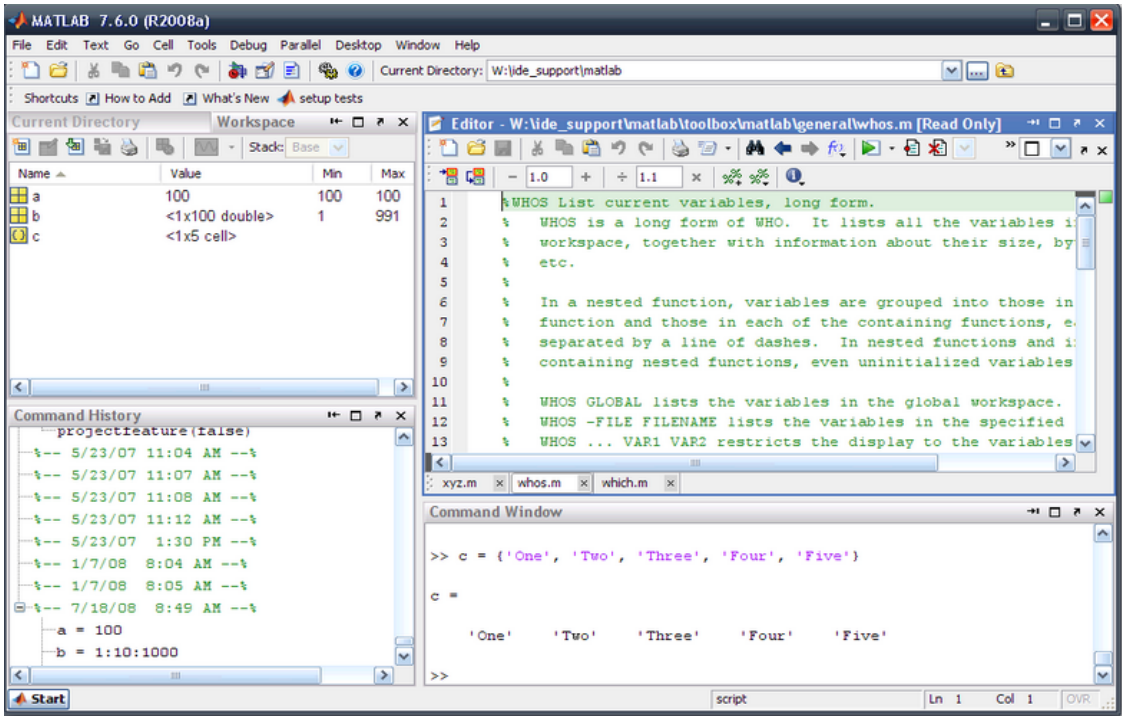
Η υλοποίηση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο Matlab. Το Matlab που παίρνει το όνομα του από τις λέξεις MATrix LABoratory είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιείται ευρέως σε πανεπιστημιακά ιδρύματα και διάφορες ερευνητικές εφαρμογές με επιστημονικούς υπολογισμούς. Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα το οποίο παρέχει επίσης την δυνατότητα προγραμματισμού γεγονός που το καθιστά ένα ισχυρό εργαλείο, δίνοντας στον χρήστη την ευχέρεια να το επεκτείνει με δικά του προγράμματα. Στην συνέχεια θα γίνεται αναφορά στο Matlab εννοώντας την γλώσσα προγραμματισμού και όχι το πακέτο (Γεωργίου και Ξενοφώντος, 2007).

Το Matlab περιλαμβάνει πολλές έτοιμες ρουτίνες σχετικά με μαθηματικές πράξεις και διαχείριση αρχείων και δεν απαιτεί ιδιαίτερη εξοικείωση με τον προγραμματισμό στην δημιουργία αλγορίθμων σε σχέση με άλλες γλώσσες που απαιτούν υψηλές γνώσεις προγραμματισμού. Επιπλέον, ο υλοποιημένος κώδικας μέσω του λογισμικού είναι φιλικός προς το χρήστη και δεν απαιτεί προγραμματιστικές γνώσεις από αυτόν.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η υλοποίηση του αλγορίθμου στην συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού καλύπτει τις περισσότερες απαιτήσεις που τέθηκαν, όπως ευκολία στον προγραμματισμό, υπάρχουν όμως όπως είναι αναμενόμενο και κάποια μειονεκτήματα. Το βασικό μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι για την εκτέλεση της εφαρμογής απαιτείται η αγορά του πακέτου ακόμα και αν ο κώδικας διανέμεται δωρεάν.

Επιπλέον αντιμετωπίζει προβλήματα στην ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου. Σε μερικές περιπτώσεις, ιδιαίτερα όσον αφορά στην διαχείριση των μεγάλων σε χωρητικότητα αρχείων των τρισδιάστατων νεφών, απαιτούνται από μερικά λεπτά έως αρκετές ώρες για την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Ενδεχόμενη βελτιστοποίηση του κώδικα ή προσαρμογής του σε άλλη γλώσσα να μειώσει τον αυξημένο χρόνο αναμονής.

Ο τελικός κώδικας που συντάχτηκε αποτελείται από διάφορες συναρτήσεις (functions) κάθε μία από τις οποίες υλοποιεί ένα ξεχωριστό κομμάτι του προγράμματος. Οι λειτουργίες των συναρτήσεων όπως επίσης και ο τρόπος χρήσης του προγράμματος θα αναλυθούν εκτενώς.



Εικόνα 2.2: Παραθυρικό περιβάλλον Matlab

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην χρήση του Matlab είναι η αγορά του εμπορικού πακέτου για την εκτέλεση του αλγορίθμου. Το πρόβλημα λύνεται με την χρήση του λογισμικού Octave. Πρόκειται για ένα ανοιχτό λογισμικό που διατίθεται υπό ελεύθερη άδεια χρήσης. Η λειτουργία του είναι ίδια με αυτή του μαθηματικού πακέτου Matlab και δημιουργήθηκε με γνώμονα τα δύο λογισμικά να είναι όσο το δυνατόν συμβατά μεταξύ τους. Το Octave από μόνο του χρησιμοποιείται μόνο μέσω terminal, ωστόσο υπάρχουν μερικά παραθυρικά περιβάλλοντα που έχουν αναπτυχθεί για να κάνουν την λειτουργία του πιο φιλική προς τον χρήστη. Παρότι οι περισσότερες εντολές του Matlab είναι συμβατές στο Octave, θα χρειαστούν τροποποιήσεις στον κώδικα σε περίπτωση μεταφοράς του στο ανοικτό λογισμικό του Octave. Μερικές από τις διαφορές που υπάρχουν σε βασικές εντολές μεταξύ των δύο γλωσσών προγραμματισμού αναφέρονται στον ακόλουθο σύνδεσμο:

http://en.wikibooks.org/wiki/MATLAB_Programming/Differences_between_Octave_and_MATLAB

3 Αλγόριθμος Εύρεσης Στοιχείων Εξωτερικού Προσανατολισμού

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να εισαχθεί στο πρόγραμμα όπως αναφέρθηκε μία ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου, το τρισδιάστατο νέφος σημείων του αντικειμένου και τα στοιχεία για την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού. Επιπλέον, πρέπει να μετρηθούν οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων στην εικόνα και οι αντίστοιχες συντεταγμένες τους στον χώρο μέσω του 3D νέφους. Μετά την εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων στο πρόγραμμα εκτελείται ο αλγόριθμος. Τα στάδια εκτέλεσής του περιγράφονται περιληπτικά στα παρακάτω βήματα.

1. Ο χρήστης επιλέγει σημεία πάνω στην εικόνα, οι εικονοσυντεταγμένες των οποίων αποθηκεύονται αυτόματα.
2. Έπειτα επιλέγει τα αντίστοιχα σημεία στο 3D νέφος, αποθηκεύοντας τις εικονοσυντεταγμένες τους σε ένα αρχείο .txt
3. Χρησιμοποιείται ο αφινικός μετασχηματισμός για την αναγωγή των εικονοσυντεταγμένων που έχουν μετρηθεί από τον χρήστη. Στην συνέχεια γίνεται διόρθωση των εικονοσυντεταγμένων λόγω ακτινικής διαστροφής του φακού της μηχανής.
4. Πραγματοποιούνται οι απαραίτητες στροφές του συστήματος αναφοράς ώστε να μετατραπεί το γεωδαιτικό σύστημα σε φωτογραμμετρικό.
5. Οι εικονοσυντεταγμένες από το βήμα 3 και οι αντίστοιχες γεωδαιτικές τους συντεταγμένες όπως προέκυψαν από την στροφή του συστήματος, χρησιμοποιούνται για την εύρεση των 11 παραμέτρων του μετασχηματισμού DLT εφαρμόζοντας την Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων (ΜΕΤ) .
6. Από τις 11 παραμέτρους του μετασχηματισμού DLT υπολογίζονται οι τιμές των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται ως προσωρινές τιμές των στοιχείων αυτών στην διαδικασία της οπισθοτομίας.
7. Γίνεται επίλυση της οπισθοτομίας με την μέθοδο των Εμμέσων Παρατηρήσεων. Ως εξισώσεις παρατήρησης θεωρούνται οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας.

Οι συναρτήσεις που δημιουργήθηκαν για την υλοποίηση των παραπάνω συνδέονται κάτω από ένα ενιαίο παραθυρικό περιβάλλον εργασίας (interface), ώστε το πρόγραμμα να είναι πιο φιλικό προς τον χρήστη αφού πλέον η διαχείριση των αρχείων γίνεται μέσω ενός παραθυρικού περιβάλλοντος.

3.1 Μετρήσεις σημείων στην εικόνα

Εφόσον έχει προηγηθεί η εισαγωγή της εικόνας, ο χρήστης καλείται να επιλέξει πάνω σε αυτήν τουλάχιστον επτά σημεία. Για την εξασφάλιση της ευκολότερης λειτουργίας του προγράμματος ως προς τον χρήστη, χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των σημείων πάνω στην εικόνα η συνάρτηση ''*ginput2.m'' by Carlos Adrian Vargas Aguilera (βλ. σύνδεσμο: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20645-ginput2-m-v3-1-nov-2009).*
Ο κώδικας διακινείται υπό την άδεια BSD, η οποία επιτρέπει την ελεύθερη χρήση του. Στο περιβάλλον του Matlab, όπου εκτελείται ο κώδικας, εμφανίζεται η εικόνα που ο χρήστης εισήγαγε. Αφού ο χρήστης επιλέξει με τον δρομέα πάνω στην εικόνα όσα σημεία επιθυμεί, τα σημεία αποθηκεύονται σε έναν πίνακα με την σειρά που αυτά επιλέχτηκαν. Το κάθε σημείο χαρακτηρίζεται από δύο συντεταγμένες i, j σε μονάδες pixel, με αρχή του συστήματος την πάνω αριστερή γωνία της εικόνας).

3.2 Μετρήσεις σημείων στο νέφος

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι αναγκαία η εισαγωγή στο πρόγραμμα ενός αρχείου που θα περιλαμβάνει τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων, με την ίδια σειρά που αυτά επιλέχτηκαν στη εικόνα.
Η επιλογή των σημείων γίνεται μέσω του τρισδιάστατου νέφους της σάρωσης. Ωστόσο, ο μεγάλος όγκος των σημείων του νέφους καθιστά δύσκολη την αναγνώρισή τους και κατ' επέκταση την σωστή επιλογή τους σε αυτό. Για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια στην επιλογή αυτή, θα ήταν επιθυμητό τα σημεία που θα μετρηθούν να αποτελούν σημεία λεπτομέρειας ή χαρακτηριστικά σημεία του αντικειμένου τα οποία να είναι ευδιάκριτα στο 3D νέφος, π.χ. γωνίες, χαρακτηριστικές ρωγμές κ.ά . Με αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθεί σε μεγάλο βαθμό ο κίνδυνος χονδροειδών λαθών.
Για την οπτικοποίηση του νέφους μέσω του αλγορίθμου στο Matlab, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση ''*clickA3Dpoint.m'' by Babal Taati (βλέπε σύνδεσμο:*
http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7594-click3dpoint/content/clickA3DPoint.m).
Ο κώδικας αυτός διακινείται υπό την άδεια BSD, η οποία επιτρέπει την ελεύθερη χρήση του.
Η παραπάνω συνάρτηση δίνει την δυνατότητα επιλογής σημείων στο νέφος για τα οποία εμφανίζονται οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Ο χρήστης πρέπει να αποθηκεύσει χειροκίνητα τις συντεταγμένες σε ένα αρχείο κειμένου τύπου txt. Να σημειωθεί ότι η σειρά που εμφανίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες στο αρχείο πρέπει να είναι ίδια με την σειρά που έχουν επιλεχθεί τα σημεία στην εικόνα.

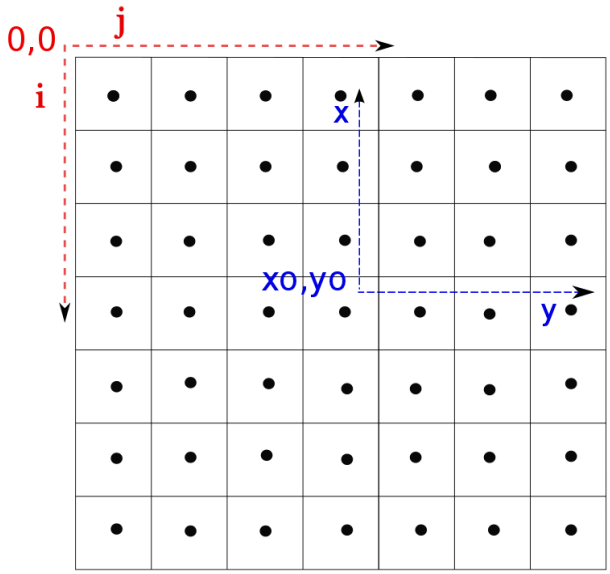
3.3 Αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού

Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού είναι η σταθερά c της μηχανής, οι συντεταγμένες xo, yo του πρωτεύοντος σημείου και οι τιμές της ακτινικής διαστροφής Δr , τα οποία καθορίζουν το μοντέλο εκείνο της κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα την συγκεκριμένη φωτογραφική μηχανή. Η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού είναι ουσιαστικά η αναγωγή των μετρούμενων εικονοσυντεταγμένων στις

γεωμετρικές θέσεις που απαιτεί το γεωμετρικό μοντέλο της Κεντρικής Προβολής που επιλέχθηκε για να περιγράψει την συγκεκριμένη δέσμη.
Για την αναγωγή των συντεταγμένων χρησιμοποιείται ο αφινικός μετασχηματισμός και στην συνέχεια γίνεται διόρθωση των ανηγμένων εικονοσυντεταγμένων εξαιτίας της ακτινικής διαστροφής. (Kraus, 2003)

3.3.1 Αφινικός μετασχηματισμός

Η μετάβαση από το σύστημα αναφοράς της ψηφιακής εικόνας στο σύστημα του φωτογραφικού επιπέδου πραγματοποιείται με τον αφινικό μετασχηματισμό. Πρόκειται για έναν 2D μετασχηματισμό μεταξύ δύο συστημάτων όπου περιλαμβάνει 6 συντελεστές $a_{1,}b_{1,}c_1, a_2, b_2, c_2$ όσες και οι γεωμετρικές παράμετροι που περιγράφουν την σχέση των δύο συστημάτων (2 στροφές, 2 κλίμακες, 2 μεταθέσεις).
Τα δύο συστήματα συντεταγμένων (Εικόνα 3.1) είναι το (i, j) με αρχή αφετηρίας την πάνω αριστερή γωνία της εικόνας και το (x, y) με αρχή αφετηρίας το πρωτεύον σημείο x_o, y_o .



Εικόνα 3.1: Συστήματα i,j και x,y της εικόνας

Ο αφινικός είναι ο συνηθέστερα εφαρμοζόμενος μετασχηματισμός στις περιπτώσεις μεταφοράς μετρήσεων από το σύστημα της ψηφιακής εικόνας (i, j) στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων (x, y) του φωτογραφικού επιπέδου.
Σημειώνεται ότι στην περίπτωση του μετασχηματισμού δεν διατηρούνται οι μορφές των σχημάτων. Αυτό που μένει αμετάβλητο είναι οι παραλληλίες μεταξύ των ευθειών. Ο μετασχηματισμός δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} x &= a_1 \cdot i + b_1 \cdot j + c_1 \\ y &= a_2 \cdot i + b_2 \cdot j + c_2 \end{aligned} \qquad (3.1)$$

- Στροφές

Πραγματοποιούνται δύο ανεξάρτητες στροφές του συστήματος i, j ως προς το σύστημα x, y . Η πρώτη αποτελεί μία ενιαία στροφή του συστήματος i, j και η δεύτερη μία ανεξάρτητη στροφή του άξονα i . Υπάρχει επίσης μια γωνία που εκφράζει την απόκλιση των αξόνων από την ορθογωνικότητα. Έστω ε η γωνία που εκφράζει την απόκλιση αυτή, θ_1 η γωνία στροφής του συστήματος (i, j) και θ_2 η γωνία στροφής του άξονα i . Αρχικά το σύστημα στρέφεται (δεξιόστροφα) μέχρι ο άξονας j να συμπέσει με τον άξονα y , οπότε η πρώτη στροφή θ_1 είναι $\theta_1 = \pi\ rad\ (180^o)$. Η δεύτερη στροφή πραγματοποιείται ανεξάρτητα, μόνο στον άξονα i , όπου στρέφεται επίσης κατά $\theta_2 = \pi\ rad$ ώστε να ταυτιστεί με τον άξονα x . Υπάρχει όμως και η γωνία ε που εκφράζει την απόκλιση των 2 αξόνων (i, j) από την ορθογωνικότητα. Για αυτόν τον λόγο προστίθεται η γωνία ε στην γωνία θ_2 και προκύπτει $\theta_2 = (\pi + \varepsilon)\ rad$. Να σημειωθεί ότι όλες οι γωνίες εισάγονται στο πρόγραμμα σε rad και οι στροφές πραγματοποιούνται δεξιόστροφα από το σύστημα (i, j) στο σύστημα (x, y) .

- Κλίμακες

Οι δύο άξονες του συστήματος έχουν διαφορετικές κλίμακες kx , ky . Το $\frac{ky}{kx}$ είναι ο λόγος των κλιμάκων των δύο αξόνων και δίνεται στα στοιχεία του δελτίου βαθμονόμησης.

- Μεταθέσεις

Στο σύστημα (i, j) που έχει ήδη στραφεί και έχουν ληφθεί υπόψη οι διαφορετικές κλίμακες τον αξόνων, πραγματοποιούνται δύο μεταθέσεις tx και ty . Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι μεταθέσεις είναι $tx = -xo$ και $ty = yo$

Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & sin\theta_2 \\ -sin\theta_2 & cos\theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 \\ sin\theta_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} kx & 0 \\ 0 & ky \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Με ανάπτυξη της σχέσης (3.2) προκύπτουν:

$$\begin{aligned} x &= k_x(cos\theta + \varepsilon \cdot sin\theta) \cdot i + \lambda x \cdot sin\theta \cdot j + tx \\ x &= k_x(-sin\theta + \varepsilon \cdot cos\theta) \cdot i + \lambda y \cdot cos\theta \cdot j + ty \end{aligned} \quad (3.3)$$

Από τις σχέσεις (3.1) και (3.2) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} a_1 &= k_x(cos\theta_1 \cdot cos\theta_2 + sin\theta_1 \cdot sin\theta_2) \qquad b_1 = kx \cdot sin\theta_1 \qquad c_1 = tx \\ a_2 &= k_x(-sin\theta_1 \cdot cos\theta_2 + sin\theta_2 \cdot cos\theta_1) \qquad b_2 = ky \cdot cos\theta_1 \qquad c_2 = ty \end{aligned} \quad (3.4)$$

Τα στοιχεία ε , kx , ky έχουν εισαχθεί ήδη στο πρόγραμμα από τον χρήστη, καθώς επίσης και οι τιμές των συντεταγμένων του πρωτεύοντος σημείου x_o, y_o . Οι γωνίες θ_1 και θ_2 όπως επίσης και οι μεταθέσεις tx και tx καθορίζονται στο πρόγραμμα και οι τιμές τους είναι σταθερές και ίσες με: $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = \pi + \varepsilon$, $tx = -xo$, $ty = yo$

Εφόσον γίνει εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις 6 παραμέτρους του αφινικού μετασχηματισμού, όπως φαίνονται στην σχέση (3.4).

Ο χρήστης έχει επιλέξει έναν αριθμό σημείων πάνω στην εικόνα οι συντεταγμένες των

οποίων έχουν αποθηκευτεί σε έναν πίνακα. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι συντεταγμένες i, j τριών σημείων:

i (px)	j (px)
2116	283
3046	274
584	5408

Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες pixel i,j

το i υποδηλώνει την σειρά και το j την στήλη που βρίσκεται το επιλεγμένο σημείο στο σύστημα i, j την ψηφιακής εικόνας. Με βάση λοιπόν την σχέση (3.2) γίνεται η μεταφορά των συντεταγμένων από το σύστημα i, j στο σύστημα x, y της εικόνας. Εφόσον έχει γίνει η παραπάνω μεταφορά, ακολουθεί η διόρθωσή τους από την ακτινική διαστροφή.

(Καρράς, 1998)

3.3.2 Ακτινική Διαστροφή

Η ακτινική διαστροφή Δr αποτελεί σφάλμα των φακών της μηχανής εξαιτίας του οποίου οι οπτικές ακτίνες δεν εξέρχονται με την ίδια γωνία που εισέρχονται στο σύστημα των φακών. Η διαστροφή των φακών είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος της συμμετρική γύρω από τον οπτικό άξονα και για αυτό άλλωστε ονομάζεται ακτινική. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απεικόνιση των ευθειών του χώρου ως καμπύλες. Η καμπύλωση μπορεί να είναι ''μηνοειδής'' ή ''πιθοειδής'' (καμπύλωση των άκρων προς τα έξω και προς τα μέσα αντίστοιχα). Η ακτινική διαστροφή Δr είναι συνάρτηση της ακτινικής απόστασης r από το πρωτεύον σημείο της εικόνας. Περιγράφεται από ένα πολυώνυμο των περιττών δυνάμεων της ακτινικής απόστασης r .

$$\Delta r = k_0 \cdot r + k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5 \qquad (3.6)$$

Ο αριθμός των συντελεστών του πολυωνύμου που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια. Οι συντελεστές $k_{0,}\, k_{1,}\, k_2$ θεωρούνται αρκετοί για αποτυπώσεις μεγάλης ακρίβειας. Η ποσότητα Δr αναλύεται στις συνιστώσες $\Delta x, \Delta y$ με τις οποίες διορθώνονται οι εικονοσυντεταγμένες x, y .

Γνωρίζοντας το πρωτεύον σημείο x_o, y_o προκύπτει για κάθε μετρημένο σημείο πάνω στην εικόνα η απόσταση r : $r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2}$

Από όμοια τρίγωνα υπολογίζονται οι συνιστώσες $\Delta x, \Delta y$

$$\Delta x = \frac{x}{r}\Delta r \quad , \quad \Delta y = \frac{y}{r}\Delta r \qquad (3.7)$$

Επομένως οι διορθωμένες από ακτινική διαστροφή εικονοσυντεταγμένες είναι:

$$x_{διορθωμένο} = x - \Delta x \quad , \quad y_{διορθωμένο} = y - \Delta y \qquad (3.8)$$

Σημειώνεται ότι τα x, y και οι διορθώσεις $\Delta x, \Delta y$ πρέπει να έχουν τις ίδιες μονάδες.

Εκτός από την ακτινική διαστροφή υπάρχει και το σφάλμα της ασύμμετρης διαστροφής που οφείλεται και αυτή σε κατασκευαστική ατέλεια των φακών και συγκεκριμένα στη εκκεντρότητα των στοιχείων τους. Η τιμή της είναι πολύ μικρότερη από αυτήν της ακτινικής

ώστε να θεωρείται σχεδόν αμελητέα στις περισσότερες περιπτώσεις.

Η μαθηματικές σχέσεις που υπολογίζουν τις διορθώσεις αυτές -κατά x και κατά y αντίστοιχα- είναι:

$$\begin{aligned}\delta x &= p_1(r^2+2\cdot(x-x_o)^2)+2\mathrm{p}_2(x-x_o)(y-y_o)\\ \delta y &= 2\mathrm{p}_1(x-x_o)(y-y_o)+p_2(r^2+2(y-y_o)^2)\end{aligned} \quad (3.9)$$

Επομένως οι τελικές διορθωμένες συντεταγμένες προκύπτουν από την σχέση:

$$x_{διορθωμένο}=x-\Delta x-\delta x\,,\quad y_{διορθωμένο}=y-\Delta y-\delta y \quad (3.10)$$

(Πέτσα, 2000), (Μουντράκης, 1998)

Ο χρήστης έχει την επιλογή, μέσω του προγράμματος, να ακολουθήσει την παραπάνω διαδικασία ακόμα και αν δεν διαθέτει τα στοιχεία των παραμέτρων των αφινικών παραμορφώσεων και της ακτινικής διαστροφής. Οι μετρημένες συντεταγμένες θα αναχθούν στο σύστημα x, y της εικόνας με αρχή των αξόνων το κέντρο της εικόνας και όχι το πρωτεύον σημείο όπως προηγουμένως. Σημειώνεται ότι χωρίς διόρθωση των αφινικών παραμορφώσεων και της ακτινικής διαστροφής το τελικό αποτέλεσμα πιθανώς να ενέχει προβλήματα λόγω ακριβώς της μη εξάλειψής τους.

Συνοψίζοντας

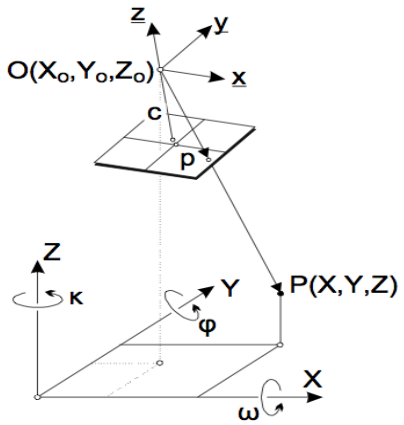
- Μετρούνται, μέσω του αλγορίθμου, σημεία πάνω στην εικόνα. Ο αριθμός των σημείων καθορίζεται από τον χρήστη.
- Εισάγονται από τον χρήστη τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, εφόσον έχει προηγηθεί βαθμονόμηση της μηχανής. Τα στοιχεία που ζητούνται είναι οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, η απόκλιση των αξόνων του συστήματος από την ορθογωνικότητα, ο λόγος των κλιμάκων κατά x και κατά y της εικονοψηφίδας και οι συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής.
- Εφαρμόζεται στις μετρημένες εικονοσυντεταγμένες ο αφινικός μετασχηματισμός και στην συνέχεια γίνεται διόρθωση εξαιτίας των σφαλμάτων της ακτινικής διαστροφής.
- Οι τελικές εικονοσυντεταγμένες θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια στην διαδικασία της οπισθοτομίας για την εύρεση των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού.

3.4 Στροφές- Συστήματα αναφοράς

Για την κατανόηση των στροφών του συστήματος γίνεται μία περιληπτική αναφορά στα συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται.

Για τον προσδιορισμό της θέσης του αντικειμένου και της φωτομηχανής στο χώρο χρησιμοποιείται το σύστημα συντεταγμένων του τρισδιάστατου χώρου ή αλλιώς το επίγειο σύστημα αναφοράς. Πρόκειται για ένα τοπικό δεξιόστροφο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z με αυθαίρετη αρχή, ενώ ο άξονας Z θεωρείται κατακόρυφος (Πατιάς, 1991). Συνηθίζεται να αναφέρεται το σύστημα αυτό ως γεωδαιτικό. Στη παρούσα

διπλωματική το τρισδιάστατο αυτό σύστημα αναφοράς αναφέρεται στο αυθαίρετο σύστημα στο οποίο γεωαναφέρθηκε το νέφος σημείων.



Εικόνα 3.2: Σχέση γεωδαιτικού συστήματος με το σύστημα της εικόνας- Εναέριες λήψεις . Πηγή: Ε. Πέτσα

Στην περίπτωση της εναέριας φωτογραμμετρίας ο κατακόρυφος άξονας Z είναι σχεδόν παράλληλος με τον άξονα λήψης. Ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της σχέσης μεταξύ αυτών των δύο συστημάτων. Η σχέση αυτή περιγράφεται με την βοήθεια τριών μεταθέσεων Xo, Yo, Zo και τριών στροφών ω, φ, κ . Τα στοιχεία αυτά εκφράζουν τις στροφές και τις μεταθέσεις που έχει υποστεί η εικόνα σε σχέση με το γεωδαιτικό σύστημα συνεπώς κατά αυτά τα μεγέθη πρέπει να στραφεί και να μετατεθεί το γεωδαιτικό σύστημα για να γίνει παράλληλο με εκείνο της εικόνας (και όχι το αντίθετο) (Πέτσα, 2000).

Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε αυτή την ιδιότητα των συγκεκριμένων στροφών, καθώς δεν πρέπει να συγχέονται με τις στροφές της φωτομηχανής γύρω από το προβολικό της κέντρο. Μόνο στην περίπτωση των εναέριων λήψεων όπου το αζιμούθιο πτήσης παραλληλίζεται με τον άξονα X του επίγειου συστήματος αναφοράς και θεωρητικά παραλληλίζονται ο άξονας Z με τον άξονα λήψης, μπορούν να θεωρηθούν οι συγκεκριμένες στροφές σχετικές αλλά όχι ίδιες, δεδομένου ότι οι ω, φ, κ αναφέρονται σε δεξιόστροφο σύστημα και οι άξονες Z και W είναι αντίθετοι. Είναι προφανές ότι, όσον αφορά στις επίγειες λήψεις, οι γωνίες αυτές δεν ταυτίζονται με κανένα τρόπο, ωστόσο είναι αλληλένδετες καθώς μία απλή στροφή γύρω από οποιονδήποτε άξονα του συστήματος της φωτομηχανής την ώρα της λήψης, έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή και των τριών γωνιών ω, φ, κ .

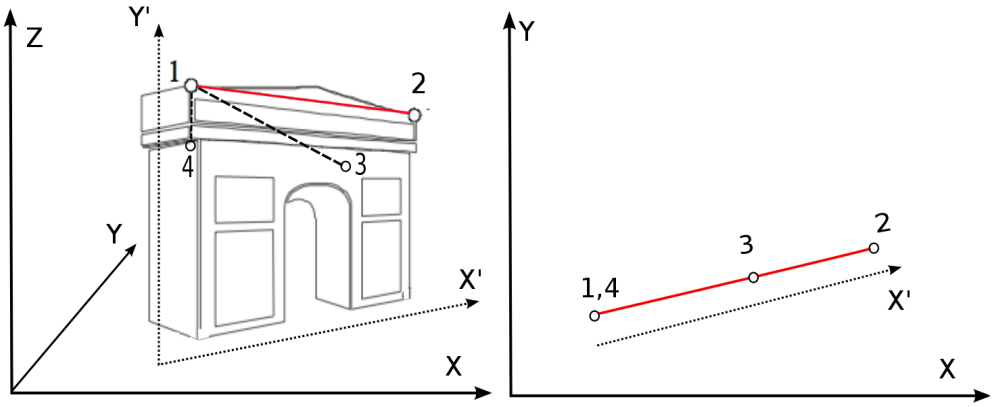
Για τους παραπάνω λόγους θεωρείται επιθυμητή η στροφή του γεωδαιτικού συστήματος ώστε ο άξονας Z να γίνει παράλληλος με τον άξονα λήψης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μεταξύ των δύο συστημάτων η ίδια σχέση που υπάρχει στις περίπτωση των εναέριων λήψεων. Το στραμμένο γεωδαιτικό σύστημα αναφέρεται συνήθως ως φωτογραμμετρικό σύστημα.

Οι στροφές που πραγματοποιούνται είναι δύο. Η πρώτη πραγματοποιείται γύρω από τον άξονα Z του γεωδαιτικού συστήματος XYZ , ώστε το κύριο επίπεδο του αντικειμένου να γίνει παράλληλο είτε με τον άξονα των X είτε με τον άξονα των Y και η δεύτερη στροφή πρόκειται για μία αντιμετάθεση αξόνων.

3.4.1 Στροφή I

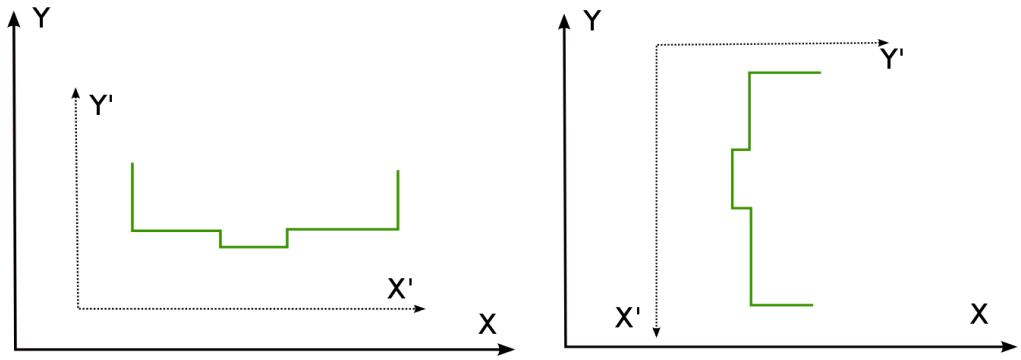
Για την πραγματοποίηση της στροφής του γεωδαιτικού συστήματος είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός από τον χρήστη δύο σημείων που βρίσκονται στο κύριο επίπεδο του αντικειμένου. Μέσω του αζιμουθίου που προκύπτει από τις συντεταγμένες των δύο αυτών σημείων, προσδιορίζεται η γωνία στροφής.

1. Τα δύο σημεία που θα επιλεγούν για την εύρεση του αζιμουθίου δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε ευθεία παράλληλη με τον άξονα X' του κύριου επιπέδου του αντικειμένου. Η υψομετρική διαφορά τους δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα καθώς αυτό που ενδιαφέρει η προβολή της ευθείας των δύο σημείων. Ωστόσο θα πρέπει τα δύο σημεία να μην σχηματίζουν κάθετη ευθεία ως προς το επίπεδο του αντικειμένου καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι δυνατή η εύρεση της γωνίας διεύθυνσης αφού τα δύο σημεία συμπίπτουν.



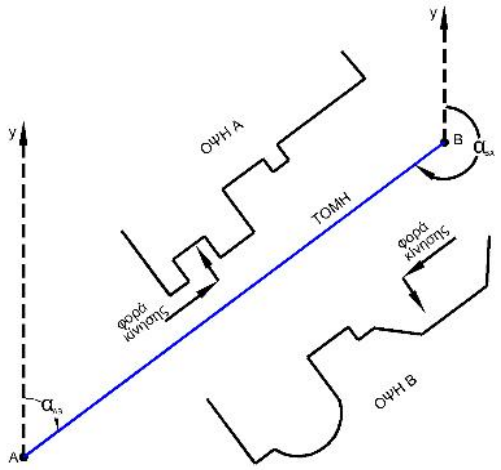
Εικόνα 3.3: Επιλογή σημείων για την εύρεση αζιμουθίου.
Αριστερά:Όψη αντικειμένου, Δεξιά: Κάτοψη

2. Ανάλογα με την στροφή που πρόκειται να πραγματοποιηθεί, παράλληλα με τον άξονα X ή με τον Y , η γωνία στροφής που ζητείται είναι είτε α_{AB} είτε $90^o - \alpha_{AB}$. Ο αλγόριθμος υλοποιεί τέτοια στροφή ώστε ο άξονας X (και όχι ο Y) να είναι παράλληλος με το επίπεδο του αντικειμένου $X'Y'$.



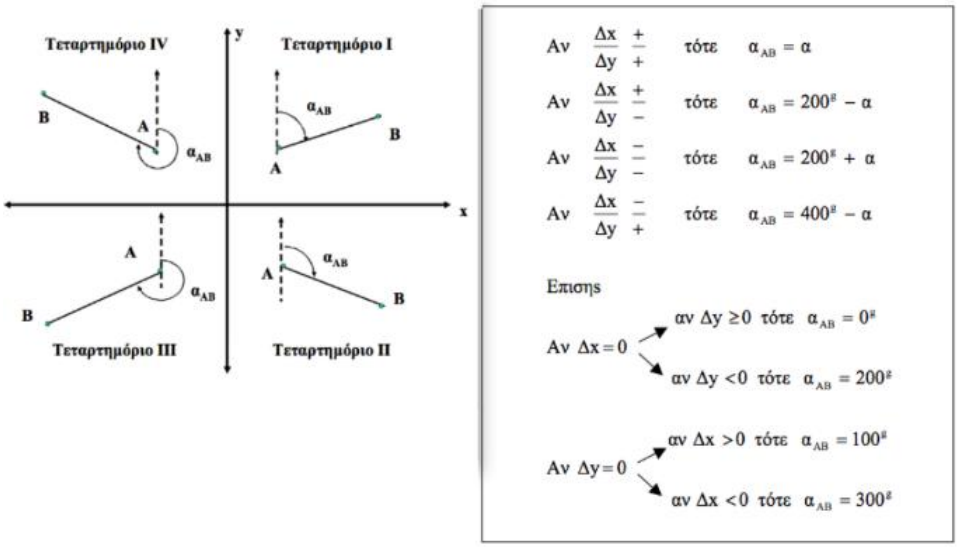
Εικόνα 3.4: Στροφή αντικειμένου ως προς τον X ή ως προς τον Y αντίστοιχα

3. Η σχέση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων XYZ και του επιπέδου του αντικειμένου $X'Y'Z'$ δεν είναι γνωστή. Για να αποφευχθεί η περίπτωση καθρεφτίσματος του αντικειμένου στην τελική εικόνα πρέπει να επιλεχθεί το κατάλληλο αζιμούθιο. Έστω δύο σημεία A και B στο αντικείμενο, τα σημεία αυτά επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε με φορά κίνησης από το Α στο Β το αντικείμενο να βρίσκεται στα αριστερά του παρατηρητή (Μακρής, 1999)



Εικόνα 3.5 : Επιλογή αζιμουθίου
Πηγή: Α. Γεωργόπουλος

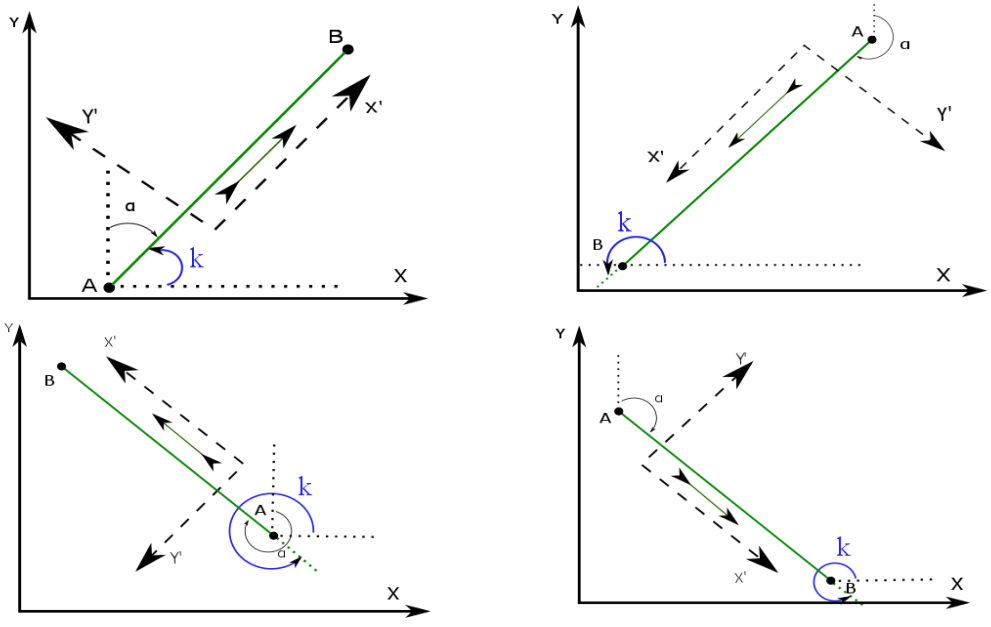
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μετά την επιλογή των δύο σημείων από τον χρήστη γίνεται διερεύνηση της γωνία α_{AB} ανάλογα με το τεταρτημόριο στο οποίο βρίσκεται.



Εικόνα 3.6: Διερεύνηση αζιμουθίου

Επειδή η σχέση του αντικειμένου με το σύστημα αναφοράς είναι άγνωστη, γίνεται διερεύνηση της στροφής που πρέπει να πραγματοποιηθεί κάθε φορά. Οι διαφορετικές περιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν είναι τέσσερις και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις του σχήματος φαίνονται το αζιμούθιο α και η γωνία στροφής k του συστήματος. Η τελευταία προκύπτει ίση με: $k=(90^0-\alpha)+360^o$. Η σχέση αυτή καλύπτει όλες τις πιθανές περιπτώσεις.

Ο πίνακας στροφής που πραγματοποιεί την μεταφορά (δεξιόστροφα) από το γεωδαιτικό σύστημα XYZ στο φωτογραμμετρικό σύστημα $X'Y'Z'$ περιγράφεται από την σχέση:



Γωνία στροφής k= (90-α)+360

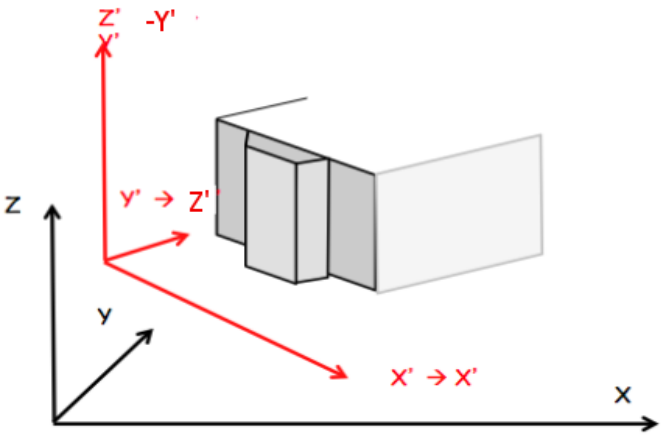
Εικόνα 3.7: Στροφή Συστήματος

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k & sink \\ -sink & \cos k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Μετά την στροφή και την εύρεση των $X'Y'$ προστίθενται οι συντεταγμένες των Z που παραμένουν ίδιες εφόσον η πρώτη στροφή πραγματοποιείται γύρω από τον γεωδαιτικό Z άξονα.

3.4.2 Στροφή II

Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η Στροφή I στην συνέχεια γίνεται μία δεύτερη στροφή, αυτή την φορά στο σύστημα $X'Y'Z'$. Πρόκειται για μία εναλλαγή αξόνων ώστε το επίπεδο $X'Y'$ όπως ορίστηκε προηγουμένως να γίνει παράλληλο με το κύριο επίπεδο του αντικειμένου. Η εναλλαγή των αξόνων πραγματοποιείται θετικά (αντίθετα της φοράς των δεικτών του ωρολογίου) γύρω από τον άξονα X' . Επομένως $X' = X', Y' = Z', Z' = -Y'$



Εικόνα 3.8: Εναλλαγή αξόνων

3.5 Εξωτερικός Προσανατολισμός

Μετά την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού, όπως περιγράφηκε παραπάνω, ακολουθούν οι εξής δύο διαδικασίες:

- Εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός DLT για την εύρεση προσεγγιστικών τιμών των στοιχείων $X_o^o, Y_o^o, Z_o^o, \omega^o, \varphi^o, \kappa^o$
- Επιλύεται η διαδικασία της οπισθοτομίας με αποτέλεσμα την εύρεση των τελικών τιμών του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa$

3.5.1 Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (Direct Linear Transformation)

Ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός περιγράφει την προβολική σχέση μεταξύ του 2D συστήματος της εικόνας και του 3D συστήματος του χώρου. *Πρόκειται δηλαδή για έναν μετασχηματισμό 2D-3D που περιγράφει την γραμμική απεικόνιση (προβολικότητα) ενός τρισδιάστατου σημειοσυνόλου στο επίπεδο* (Καρράς, 1998). Οι παράμετροι που περιγράφουν τη σχέση αυτή μεταξύ της εικόνας και του τρισδιάστατου χώρου είναι 11, όπως φαίνεται και στις σχέσεις (3.11).

$$x=\frac{b_{11}X+b_{12}Y+b_{13}Z+b_{14}}{b_{31}X+b_{32}Y+b_{33}Z+1} \qquad y=\frac{b_{21}X+b_{22}Y+b_{23}Z+b_{24}}{b_{31}X+b_{32}Y+b_{33}Z+1} \tag{3.11}$$

Ο μετασχηματισμός αυτός, σε αντίθεση με τον προβολικό μετασχηματισμό επιπέδου με επίπεδο (2D-2D), δεν είναι αντιστρέψιμος.

Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται οι συντεταγμένες των x, y να είναι ανηγμένες στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων. Δεν απαιτείται δηλαδή ο αφινικός μετασχηματισμός των εικονοσυντεταγμένων, αλλά μπορούν τα x, y να αναφέρονται σε οποιοδήποτε σύστημα, να είναι για παράδειγμα συντεταγμένες σε μονάδες pixel ή mm κ.λπ και με οποιαδήποτε αφετηρία. Η ιδιότητα αυτή προσφέρει την δυνατότητα χρήσης εικόνων από ερασιτεχνικές μηχανές για τις οποίες είναι άγνωστος ο εσωτερικός προσανατολισμός

Οι 11 παράμετροι είναι συναρτήσεις των έξι παραμέτρων του εξωτερικού και των τριών του εσωτερικού προσανατολισμού της εικόνας.

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} b_{11} & b_{13} \\ b_{22} & b_{23} \\ b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} b_{14} \\ b_{24} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.12 α-ε}$$

$$\omega=\arctan\left(-\frac{b_{32}}{b_{33}}\right) \qquad \varphi=\arctan\left(-sin\omega\frac{b_{31}}{b_{32}}\right) \qquad \kappa=\arctan\left(\frac{b_{21}-y_o b_{31}}{b_{11}-x_o b_{31}}\right)$$

$$x_o=\frac{b_{11}b_{31}+b_{12}b_{32}+b_{13}b_{33}}{b_{31}^2+b_{32}^2+b_{33}^2} \qquad y_o=\frac{b_{21}b_{31}+b_{22}b_{32}+b_{23}b_{33}}{b_{31}^2+b_{32}^2+b_{33}^2}$$

$$c_x=-x_o^2+\left(b_{11}^2+b_{12}^2+b_{13}^2\right)B^2 \qquad c=\frac{c_x+c_y}{2}$$
$$c_y=-y_o^2+\left(b_{21}^2+b_{22}^2+b_{23}^2\right)B^2$$

$$B=-\left(r_{31}X_o+r_{32}Y_o+r_{33}Z_o\right)$$

Οι σχέσεις (3.11) δεν είναι γραμμικές ως προς τους 11 συντελεστές της, μπορούν όμως να γραφούν στην παρακάτω μορφή:

$$x+v_x=b_{11}X+b_{12}Y+b_{13}Z+b_{14}-b_{31}Xx-b_{32}Yx-b_{33}Zx \quad (3.13)$$
$$y+v_y=b_{21}X+b_{22}Y+b_{23}Z+b_{24}-b_{31}Xy-b_{32}Yy-b_{33}Zy$$

Οι ποσότητες $v_x, v_y,$ εκφράζουν το σφάλμα κλεισίματος των εξισώσεων παρατήρησης αφού εμφανίζονται γινόμενα των $b_{31,}b_{32,}b_{33}$ με τα x, y . Από τις παραπάνω γραμμικές σχέσεις υπολογίζονται οι 11 παράμετροι b_{ij} του μετασχηματισμού με την Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων και συγκεκριμένα με την μέθοδο των Εμμέσων Παρατηρήσεων. Ως εξισώσεις παρατήρησης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3.13), τα x, y είναι οι παρατηρήσεις και τα X, Y, Z χρησιμοποιούνται ως γνωστά σημεία. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων πρέπει να είναι γνωστά τουλάχιστον 7 σημεία του χώρου -και όχι συνεπίπεδα- καθώς κάθε σημείο δίνει δύο εξισώσεις. Οι τιμές των παραμέτρων b_{ij} που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για την εύρεση των προσεγγιστικών τιμών $X_o^o, Y_o^o, Z_o^o, \omega^o, \varphi^o, \kappa^o$ από τους τύπους (3.12).

(Καρράς, 1998), (El-Manadili and Kurt, 1996)

3.5.2 Συνθήκη Συγγραμμικότητας

Η μαθηματική σχέση που συνδέει τα σημεία πάνω στην εικόνα με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος ονομάζεται Συνθήκη Συγγραμμικότητας. Η συνθήκη αυτή εκφράζει με μαθηματικό τρόπο το γεγονός ότι ένα σημείο A στο αντικείμενο, το προβολικό κέντρο Ο της μηχανής και η εικόνα α του σημείου στην εικόνα βρίσκονται πάνω σε μία ευθεία (Πατιάς, 1991). Οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας (ΣΣ) διατυπώνονται υπό την μορφή πινάκων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} x-x_o \\ y-y_o \\ -c \end{bmatrix} = \frac{1}{k}\cdot R \begin{bmatrix} X-X_o \\ Y-Y_o \\ Z-Z_o \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

όπου

- x, y : οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου στην εικόνα, συνηθίζεται στις φωτογραμμετρικές εργασίες να μετρούνται σε χιλιοστά (mm)
- X, Y, Z : οι αντίστοιχες γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου (m)
- c : η σταθερά της μηχανής, εκφρασμένη στις ίδιες μονάδες που είναι μετρημένες οι εικονοσυντεταγμένες $x, y,$ σε αυτήν την περίπτωση σε μέτρα (m).
- $R_{\omega\varphi\kappa}$: ο 3x3 πίνακας στροφής

Ο συντελεστής $\frac{1}{k}$ εκφράζει την κλίμακα του συγκεκριμένου σημείου κάθε φορά, γι' αυτό είναι επιθυμητή η εξάλειψή του. Με την διαίρεση της πρώτης και της δεύτερης με την τρίτη εξίσωση προκύπτουν οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας:

$$x = x_o - \frac{c \cdot r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)}$$
$$y = y_o - \frac{c \cdot r_{21}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{23}(Z - Z_o)}{r_{31}(X - X_o) + r_{32}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \quad (3.15)$$

Όπου r_{ij} α στοιχεία του πίνακα στροφής R :

$$R = \begin{bmatrix} cos\varphi \cdot cos\kappa & sin\omega \cdot sin\varphi \cdot cos\kappa + cos\omega \cdot sin\kappa & -cos\omega \cdot sin\varphi \cdot cos\kappa + sin\omega \cdot sin\kappa \\ -cos\varphi \cdot sin\kappa & -sin\omega \cdot sin\varphi \cdot sin\kappa + cos\omega \cdot cos\kappa & -cos\omega \cdot sin\varphi \cdot sin\kappa + sin\omega \cdot cos\kappa \\ sin\varphi & -sin\omega \cdot cos\varphi & -cos\omega \cdot cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας χρησιμοποιούνται ως εξισώσεις παρατήρησης για την επίλυση της οπισθοτομίας.

3.5.3 Οπισθοτομία

Ως οπισθοτομία μιας εικόνας ορίζεται η φωτογραμμετρική διαδικασία μέσω της οποίας υπολογίζονται οι έξι παράμετροι του εξωτερικού της προσανατολισμού.

Πραγματοποιείται συνόρθωση με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (ΜΕΤ) θεωρώντας ως εξισώσεις παρατήρησης τις εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας . Στις εξισώσεις (3.15) οι εικονοσυντεταγμένες x, y ενός σημείο είναι συνάρτηση των στοιχείων του εσωτερικού (xo, yo, c) και εξωτερικού προσανατολισμού $(Xo, Yo, Zo, \omega, \varphi, \kappa)$ της εικόνας και των γεωδαιτικών συντεταγμένων (X, Y, Z) του σημείου. Για την συνόρθωση τα x, y αποτελούν τις παρατηρήσεις, τα $Xo, Yo, Zo, \omega, \varphi, \kappa$ τις άγνωστες παραμέτρους και τα X, Y, Z τα γνωστά στοιχεία. Κάθε μετρημένο σημείο -φωτοσταθερό- δίνει 2 εξισώσεις παρατήρησης μία κατά x και μία κατά y . Οπότε m γνωστά σημεία δίνουν $2 \times m$ εξισώσεις παρατήρησης. Δεδομένου ότι οι άγνωστοι παράμετροι είναι έξι, η περίσσεια των παρατηρήσεων, δηλαδή οι βαθμοί ελευθερίας, είναι $2 \times m - 6$. Από αυτό συμπεραίνεται ότι 3 γνωστά σημεία αρκούν για να δώσουν λύση στο πρόβλημα. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι εάν υπάρχουν τόσες εξισώσεις όσοι και οι άγνωστοι προκύπτει μία αναγκαία αλλά όχι και ικανή συνθήκη λύσης. Με τρία γνωστά σημεία υπάρχει λύση για την οποία όμως δεν προκύπτει η αβεβαιότητα του υπολογισμού της. Γι αυτό επιλέγονται περισσότερα από τέσσερα γνωστά σημεία για την επίλυση της οπισθοτομίας και όσο τον δυνατόν να ορίζουν ένα τετράπλευρο στην εικόνα ώστε να εξασφαλίζονται γεωμετρικές προϋποθέσεις.

Η συνόρθωση γίνεται με την μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων. Για την εφαρμογή της ΜΕΤ απαιτείται γραμμικοποίηση των εξισώσεων παρατήρησης. Η γραμμικοποίηση γίνεται με ανάπτυξη των εξισώσεων σε σειρά κατά Taylor γύρω από κάποιες αρχικές προσεγγιστικές τιμές (Αγατζά-Μπαλοδήμου, 2007). Γενικά αν δίνεται η μη γραμμική εξίσωση $y = f(xi)$ η ανάπτυξη κατά Taylor γύρω από τις προσεγγιστικές τιμές xi^o θα δώσει:

$$y = y^o + \left(\frac{\partial f}{\partial xi} \right)^o \cdot \delta xi$$

όπου y^o είναι η τιμή $f(xi^o)$ και δxi είναι οι διορθώσεις των προσεγγιστικών τιμών xi^o έτσι ώστε οι τελικές τιμές είναι $xi = xi^o + \delta xi$

Ως άγνωστοι θεωρούνται οι διορθώσεις δxi των προσεγγιστικών τιμών.

Λόγω της γραμμικοποίησης, το πρόβλημα λύνεται με διαδοχικές επαναλήψεις. Σε κάθε επανάληψη ως προσεγγιστικές τιμές εισάγονται οι νέες τιμές $xi' = xi^o + \delta xi$ και υπολογίζονται οι νέες διορθώσεις των $\delta xi'$. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι οι διορθώσεις αυτές να γίνουν μικρότερες από ένα όριο σύγκλισης που έχει εξαρχής τεθεί.

Οι διορθώσεις δxi αναφέρονται στις έξι άγνωστες παραμέτρους. Επομένως το όριο σύγκλισης που επιλέγεται καθορίζεται από την επιδιωκόμενη ακρίβεια που επιζητείται στα τρία γραμμικά (X_o, Y_o, Z_o) και στα τρία γωνιακά μεγέθη $(\omega, \varphi, \kappa)$. Η ακρίβεια αυτή καθορίζεται από την κλίμακα των τελικών προϊόντων που ο χρήστης επιλέγει.

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να γίνουν κάποιες επισημάνσεις. Αρχικά πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα αρχικά πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε όλη την διαδικασία παραγωγής των φωτογραμμετρικών προϊόντων πρέπει να έχουν μετρηθεί με ακρίβεια που να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Για παράδειγμα αν η τελική ακρίβεια που επιδιώκεται –η οποία καθορίζεται από την κλίμακα του τελικού προϊόντος- είναι της τάξης των 1.25 cm τότε είναι προφανές ότι η ακρίβεια του νέφους πρέπει να είναι μικρότερη της τιμής αυτής. Επειδή ακριβώς τα διάφορα στάδια της διαδικασίας μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος ενέχουν σφάλματα, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται δεδομένα καλύτερης ακρίβειας από την επιδιωκόμενη, ώστε να υπάρχει ένα περιθώριο ασφάλειας για την εξασφάλιση της τελικής ακρίβειας (Πέτσα, 2000), (Deakin, 2005).

Έστω ότι η κλίμακα του τελικού προϊόντος που επιλέγεται είναι 1:50, αυτό σημαίνει ότι το σφάλμα των γραμμικών μεγεθών μπορεί να είναι όχι πάνω από 1.25cm. $(50 \times 0.0025 = 1.25,\ \ 0.0025\text{cm}\ \textit{αντιστοιχεί στην διακριτική ικανότητα του ματιού})$

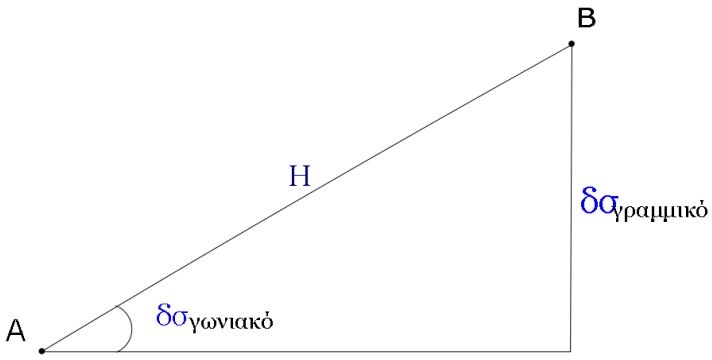
Για την επίτευξη αυτής της ακρίβειας, και με γνώμονα τα παραπάνω, ορίζεται ως όριο

σύγκλισης για τα γραμμικά μεγέθη περίπου το μισό της παραπάνω τιμής, δηλαδή $\frac{1.25}{2} \simeq 0.6\,cm$.

Αυτό φυσικά σημαίνει πως αν τα μετρημένα στοιχεία –σε αυτήν την περίπτωση το νέφος σημείων– έχουν ακρίβεια μεγαλύτερη των 0.6 cm (π.χ 1cm) τότε υπάρχει κίνδυνος να μην επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια του τελικού προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση είτε επιλέγεται (αν είναι εφικτό) μικρότερη κλίμακα τελικού προϊόντος, είτε εξασφαλίζεται εξαρχής ότι τα μετρημένα στοιχεία καλύπτουν την επιδιωκόμενη ακρίβεια.

Όσον αφορά στα γωνιακά μεγέθη ω, φ, κ το όριο σύγκλισης τους εξαρτάται από εκείνο των γραμμικών στοιχείων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.9 αν H η προσεγγιστική τιμή της απόστασης λήψης μεταξύ του αντικειμένου και της φωτογραφικής μηχανής και $\delta\sigma_{\gamma\rho\alpha\mu}$ το σφάλμα των γραμμικών μεγεθών όπως ορίστηκε προηγουμένως, τότε το ανεκτό σφάλμα για τα γωνιακά μεγέθη είναι :

$$\delta\sigma_{\gamma\omega\nu\iota\alpha\kappa\omega\nu} = \arctan\left(\frac{\delta\sigma_{\gamma\rho\alpha\mu}}{H} \right)$$



$$\delta\sigma_{\text{γωνιακό}} = \arctan\left(\delta\sigma_{\text{γραμμικό}}/H\right)$$

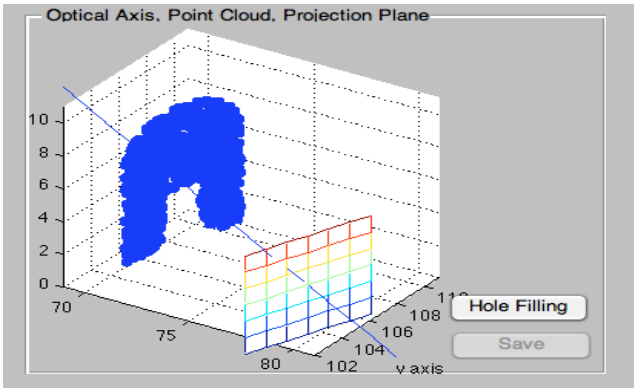
Εικόνα 3.9: Σχέση γραμμικού και γωνιακού σφάλματος

Εφόσον ο αλγόριθμος συγκλίνει και βρεθούν οι τιμές των αγνώστων, υπολογίζεται το a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους. Αρχικά υπολογίζονται τα εναπομένοντα σφάλματα υ , που αντιπροσωπεύουν τα τυχαία σφάλματα των μετρήσεων των εικονοσυντεταγμένων x, y . Το μέτρο για την ακρίβεια των εικονοσυντεταγμένων είναι το τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους:

$$\hat{\sigma_o} = \pm\sqrt{\frac{\sum \upsilon^2}{r}} \quad , \quad \text{όπου } r \text{ ο βαθμός ελευθερίας του συστήματος } (r = n - m)$$

Τα σφάλματα αυτά των παρατηρήσεων x, y μεταδίδονται και στις τιμές των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Ο υπολογισμός των σφαλμάτων των παραμέτρων προκύπτει από την σχέση: $V_{xy} = \hat{\sigma_o}^2 (A^T A)^{-1}$

Εφόσον ο αλγόριθμος έχει ολοκληρωθεί εμφανίζεται ένα γράφημα το οποίο παρουσιάζει τον άξονα λήψης όπως προέκυψε από τον υπολογισμό των 6 στοιχείων που καθορίζουν την θέση του και τον προσανατολισμό του σε σχέση με το τρισδιάστατο νέφος



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση οπτικού άξονα, νέφους σημείων και επιπέδου προβολής

3.6 Έλεγχος

3.6.1 Προσομοίωση

Ο πρώτος έλεγχος πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον εξακρίβωση της ορθότητας του αλγορίθμου. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα προσομοίωσης μιας εναέριας λήψης. Με γνωστές εικονοσυντεταγμένες πέντε σημείων, τις αντίστοιχες γεωδαιτικές τους συντεταγμένες XYZ και τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της λήψης υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος της οπισθοτομίας. Χρησιμοποιήθηκαν ως προσωρινές τιμές για τα γραμμικά στοιχεία οι μέσοι όροι των Xo, Yo, Zo αντίστοιχα και για τα γωνιακά μεγέθη οι προσωρινές τιμές θεωρήθηκαν μηδενικές. Μετά την υλοποίηση του αλγορίθμου της οπισθοτομίας οι τιμές των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού που προέκυψαν ήταν οι αναμενόμενες όπως επίσης και τα σφάλματά τους. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκε η ορθότητα της σύνταξης του αλγορίθμου.

Επιπλέον με τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν ως προσωρινές τιμές εκείνες που προέκυψαν από τον Άμεσο Γραμμικό Μετασχηματισμό με την ίδια επιτυχία, ελέγχοντας με αυτόν τον τρόπο την ορθότητα της σύνταξης του αλγορίθμου που πραγματοποιεί την εύρεση των προσωρινών τιμών.

3.6.2 Έλεγχος οπισθοτομίας με δεδομένα από 3D νέφος σημείων

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, έγινε εφαρμογή του σε πραγματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον ναό του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά των Αθηνών. Πραγματοποιήθηκα τέσσερις εφαρμογές. Οι τρεις πρώτες αφορούν σε διαφορετικές λήψεις της ανατολικής πλευράς του εσωτερικού του ναού όπου απεικονίζονται δύο κίονες και η τρίτη εφαρμογή αφορά μία λήψη του δυτικού τοίχου στο εσωτερικού του σηκού του ναού.

3.6.2.1 Εφαρμογή 1

Στο πρόγραμμα εισήχθη η αρχική εικόνα (Εικ. 3.14) και ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων σε μορφή κειμένου txt. Μετρήθηκαν μέσω του λογισμικού οι εικονοσυντεταγμένες (σε pixel) 9 σημείων στο αντικείμενο. Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου προέκυψαν τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού.

$$X_o(m) = 88.4480 \pm 0.0377$$
$$Y_o(m) = 2.8827 \pm 0.0275$$
$$Z_o(m) = -100.5664 \pm 0.0190$$
$$\omega(deg) = 14.0017 \pm 0.344$$
$$\varphi(deg) = 0.6194 \pm 0.541$$
$$\kappa(deg) = 1.0600 \pm 0.183$$

$$\hat{\sigma}_o = 0.09751\, mm = 15\, pixel$$

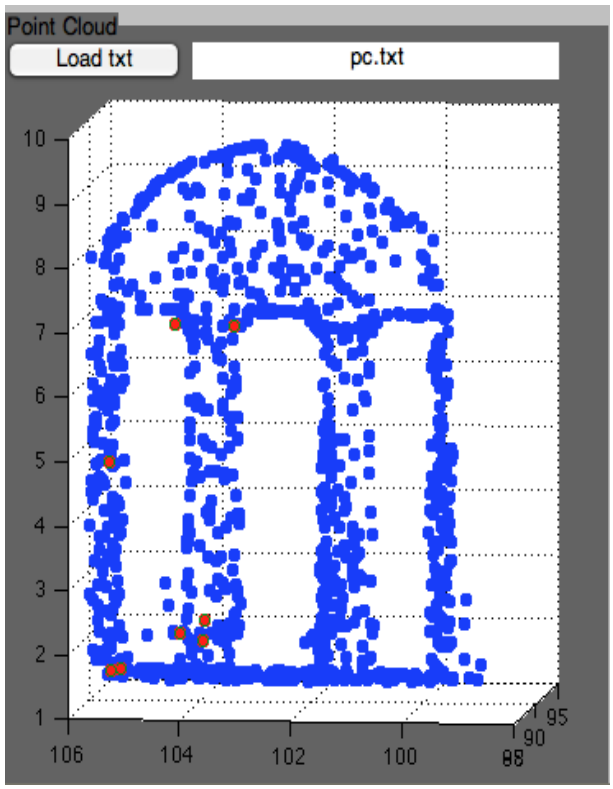
Εικόνα 3.11: Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού - Εφαρμογή 1α

xy (pixe

	x	*y*
1	*9.45*	*9.88*
2	*7.45*	*-1.12*
3	*10.67*	*-33.62*
4	*-15.28*	*11.04*
5	*9.87*	*13.91*
6	*1.46*	*-2.82*
7	*-4.58*	*-18.52*
8	*-9.22*	*-0.66*
9	*-4.63*	*13.08*

Εικόνα 3.12: Υπόλοιπα παρατηρήσεων xy Εφαρμογή 1α

Εικόνα 3.13: Επιλογή σημείων στην αρχική εικόνα



Εικόνα 3.14: Επιλογή σημείων στο νέφος- Απεικόνιση δείγματος του 3D νέφους από το λογισμικό

Παρατηρείται από τα σφάλματα των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού αλλά κυρίως από το a posteriori σφάλμα της μονάδας βάρους $\hat{\sigma}_o = 0.09751\, mm$ ότι η ακρίβεια είναι χειρότερη από την αναμενόμενη. Το $\hat{\sigma}_o$ αναφέρεται στις παρατηρήσεις της συνόρθωσης που στην προκειμένη περίπτωση είναι οι εικονοσυντεταγμένες xy. Από τα υπόλοιπα των παρατηρήσεων φαίνεται ότι η ακρίβεια των αρχικών δεδομένων δεν ήταν ικανοποιητική.

Το μέγεθος του pixel της εικόνας είναι 6.4 μm, οπότε το σφάλμα προκύπτει $\hat{\sigma}_o = 15\ pixel$. Δεδομένου ότι η κλίμακα της αρχικής εικόνας είναι περίπου 1:200, μία προσεγγιστική τιμή του σφάλματος αυτού στην πραγματικότητα είναι περίπου $\hat{\sigma}_o = 2\ cm$. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού χρησιμοποιούνται μέσω του λογισμικού για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας (Σταυροπούλου, 2013) επομένως η επιθυμητή ακρίβεια που αναμένεται, εξαρτάται από την κλίμακα του τελικού προϊόντος που ο χρήστης έχει ορίσει. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει οριστεί τελική κλίμακα 1:50, ως εκ τούτου το μέγιστο ανεκτό σφάλμα είναι 1.25 cm

Από τις παραπάνω τιμές συμπεραίνεται ότι οι τιμές του εξωτερικού προσανατολισμού δεν έχουν προσδιοριστεί με την καλύτερη ακρίβεια. Κύριος παράγοντας αυτής της αβεβαιότητας είναι η ακρίβεια προσδιορισμού των αρχικών δεδομένων. Γι' αυτόν τον λόγο έγινε μία δεύτερη συνόρθωση χρησιμοποιώντας την ίδια εικόνα και επιλέγοντας ξανά σημεία στην εικόνα και το 3D νέφος. Αφαιρέθηκαν κάποια από τα σημεία της πρώτης συνόρθωσης που παρουσίαζαν μεγάλα υπόλοιπα και προστέθηκαν καινούρια, επιλεγμένα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα της δεύτερης συνόρθωσης παρουσιάζουν μικρότερα σφάλματα σε σχέση με την πρώτη.

Όπως προηγουμένως μπορεί να γίνει μία προσεγγιστική αναγωγή της τιμής του σφάλματος της οπισθοτομίας, που αναφέρεται στην ακρίβεια των εικονοσυντεταγμένων της εικόνας, στην πραγματικότητα. Δεδομένης της κλίμακας της εικόνας (1:200) προκύπτει σφάλμα $0.8\ cm$, τιμή αρκετά μικρότερη σε σύγκριση με την πρώτη δοκιμή ($\hat{\sigma}_o = 2\text{cm}$).

$$
\begin{aligned}
X_o(m) &= 88.4960 \quad \pm 0.0209 \\
Y_o(m) &= 2.8750 \quad \pm 0.01579 \\
Z_o(m) &= -100.5688 \quad \pm 0.0107 \\
\omega(deg) &= 14.1645 \quad \pm 0.1931 \\
\varphi(deg) &= 1.2803 \quad \pm 0.2984 \\
\kappa(deg) &= 0.8575 \quad \pm 0.1005 \\
\\
\hat{\sigma}_o &= 0.04461\ mm = 7\ pixel
\end{aligned}
$$

Εικόνα 3.15: Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού - Εφαρμογή 1β

xy (pixe

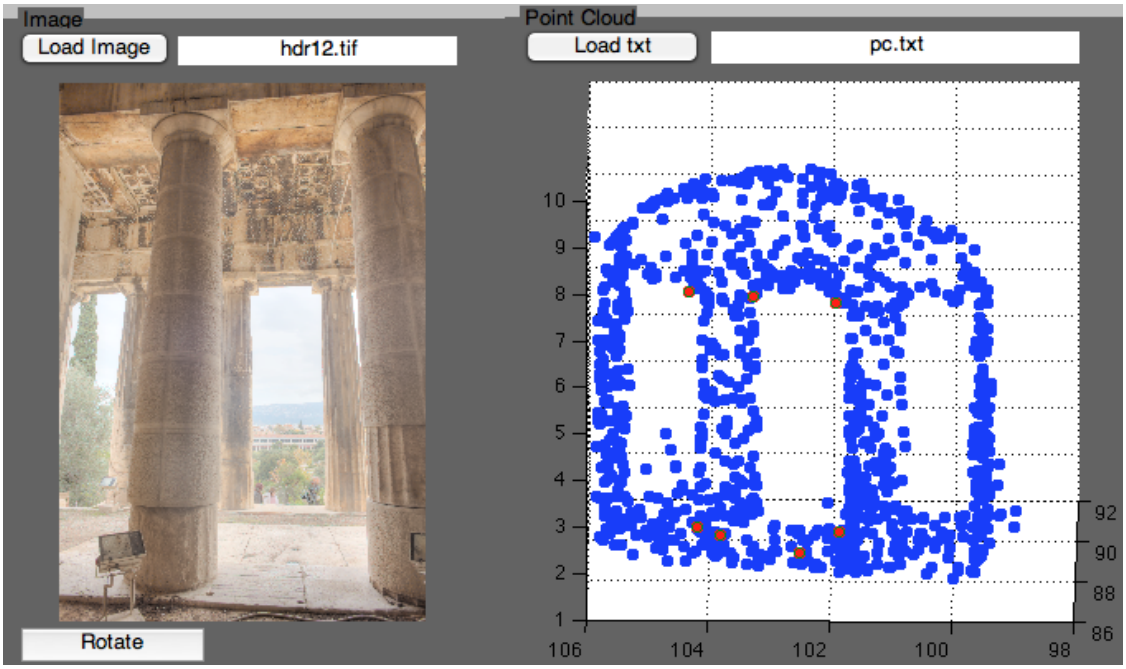
	x	*y*
1	*5.02*	*2.8*
2	*4.72*	*1.84*
3	*1.41*	*7.71*
4	*2.53*	*-4.46*
5	*-8.47*	*-5.57*
6	*-4.74*	*-4.44*

Εικόνα 3.16: Υπόλοιπα παρατηρήσεων xy- Εφαρμογή 1β

Τα αποτελέσματα των δύο εφαρμογών δείχνουν ότι τα σφάλματα που εισάγονται κατά την μέτρηση των σημείων στην εικόνα και το νέφος επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια του προσδιορισμού του στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Οι προσπάθειες που έγιναν να μειωθεί ακόμα περισσότερο το σφάλμα αυτό απέτυχαν. Στο συγκεκριμένο αντικείμενο, λόγω της πολυπλοκότητας του σχήματός του, παρουσιάστηκε δυσκολία στην σκόπευση των σημείων, γι' αυτόν τον λόγο στην δεύτερη δοκιμή τα επιλεγμένα σημεία είναι λιγότερα (τα ελάχιστα που απαιτούνται).

3.6.2.2 Εφαρμογή 2

Στην δεύτερη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε μία εικόνα διαφορετικής λήψης του ίδιου όμως αντικειμένου. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μέτρησης σημείων στην εικόνα και στο νέφος. Έγιναν και σε αυτήν την περίπτωση δοκιμές με διαφορετικά αρχικά δεδομένα ώστε να βελτιωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η ακρίβεια προσδιορισμού του σημείου λήψης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.17 Η αρχική εικόνα και ένα ενδεικτικό νέφος του αντικειμένου

$$X_o(m) = 90.3399 \pm 0.0091$$
$$Y_o(m) = 2.8667 \pm 0.0053$$
$$Z_o(m) = -100.6364 \pm 0.0035$$
$$\omega(deg) = 14.3457 \pm 0.0667$$
$$\varphi(deg) = 5.7842 \pm 0.1361$$
$$\kappa(deg) = -1.096 \pm 0.0520$$

$$\hat{\sigma}_o = 0.0234\, mm \simeq 3.5\ pixel$$

Εικόνα 3.18: Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού Εφαρμογή 2

xy (pixe

	x	*y*
1	*-4.18*	*-0.71*
2	*5.06*	*-1.69*
3	*-0.71*	*3.44*
4	*4.26*	*-0.55*
5	*-2.74*	*0.94*
6	*-2.70*	*3.64*
7	*0.13*	*0.82*

Εικόνα 3.19: Υπόλοιπα παρατηρήσεων xy Εφαρμογή 2

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα η ακρίβεια προσδιορισμού του σημείου λήψης της εικόνας είναι καλύτερη συγκριτικά με την πρώτη εικόνα. Το a posteriori τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης προέκυψε $\hat{\sigma_o} = 0.02339\,cm = 3.5\,pixel$. Η κλίμακα της αρχικής εικόνας είναι περίπου 1:200 επομένως το παραπάνω σφάλμα αντιστοιχεί σε $0.4\,cm$ στην πραγματικότητα, μία αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια αφού είναι αρκετά μικρότερο από το όριο των 1.25 cm.

3.6.2.3 Εφαρμογή 3

Η τρίτη εφαρμογή έγινε με μία εικόνα του αντικειμένου που απεικονίζει και τους δύο κίονες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν ικανοποιητικής ακρίβειας όπως φαίνεται παρακάτω. Η μη επαρκής κατανομή των σημείων σε όλη την έκταση της εικόνας και ταυτόχρονα η δύσκολη επιλογή τους στο νέφος ήταν καταλυτική στη τελική ακρίβεια υπολογισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Όπως φαίνεται, στο κάτω μέρος της εικόνας δεν έχουν επιλεχθεί καθόλου σημεία καθώς λόγω του σχήματος και της επιφάνειας των κιόνων ήταν απαγορευτική η επιλογή τους στο νέφος.

Εικόνα 3.20: Αρχική εικόνα με τα σημεία που επιλέχθηκαν

$$
\begin{aligned}
X_o(m) &= 90.8131 \quad \pm 0.2118 \\
Y_o(m) &= 2.9438 \quad \pm 0.1517 \\
Z_o(m) &= -99.3795 \quad \pm 0.1131 \\
\omega(deg) &= 29.2198 \quad \pm 1.551 \\
\varphi(deg) &= 3.0182 \quad \pm 0.566 \\
\kappa(deg) &= -1.096 \quad \pm 0.4845 \\
\\
\hat{\sigma_o} &= 0.17971\,mm = 28\,pixel
\end{aligned}
$$

Εικόνα 3.22: Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού - Εφαρμογή 3

xy (pixe

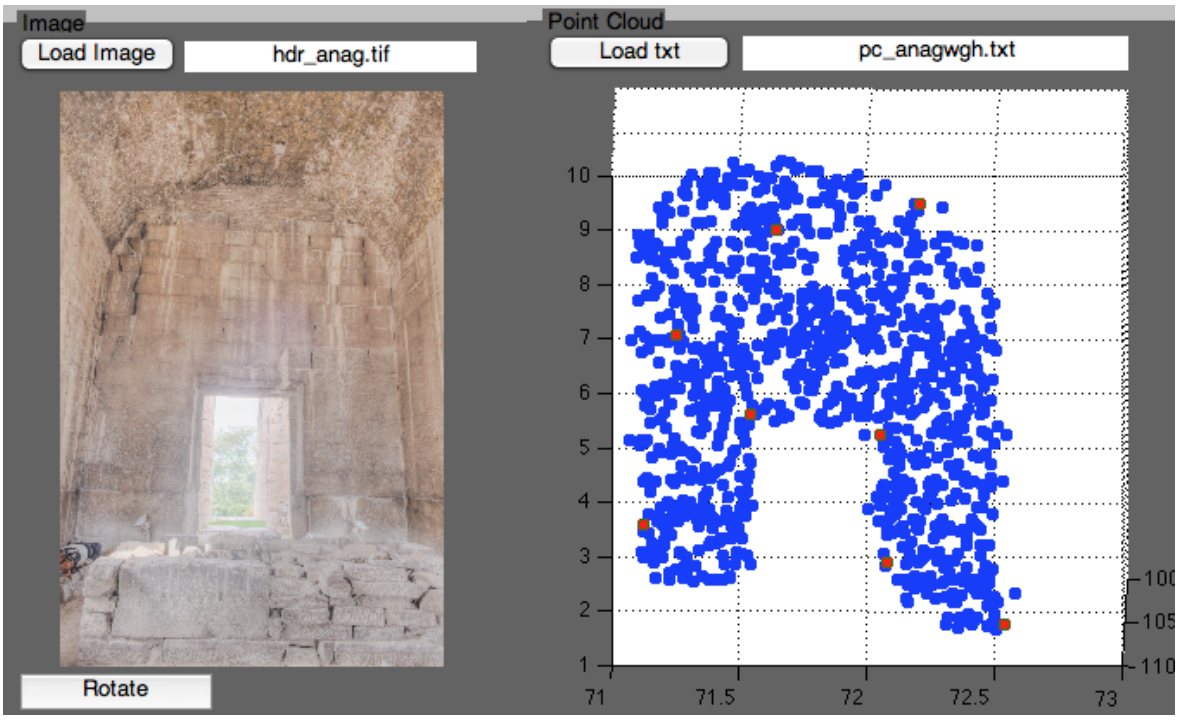
x	*y*
13.8259	*-0.9615*
-12.5611	*-6.678*
47.305	*12.6920*
-30.1748	*-12.54*
-24.2626	*-20.039*
-13.1439	*15.4157*

Εικόνα 3.21: Υπόλοιπα παρατηρήσεων xy Εφαρμογή 3

Η κλίμακα της αρχικής εικόνας είναι 1:200 γεγονός που σημαίνει ότι το σφάλμα των 28 pixel αντιστοιχεί περίπου με 3.5 cm, σφάλμα πολύ μεγαλύτερο από το επιτρεπτό.

3.6.2.4 Εφαρμογή 4

Στην τελευταία εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα μία εικόνα του δυτικού τοίχου που βρίσκεται στο εσωτερικό του ναού και το αντίστοιχο τρισδιάστατο νέφος σημείων. Τα αποτελέσματα από την επίλυση της οπισθοτομίας φαίνονται στις Εικόνες 3.24 - 3.25:



Εικόνα 3.23: Αρχική εικόνα και απεικόνιση νέφους σημείων με τα επιλεγμένα σημεία

$$
\begin{aligned}
X_o(m) &= 77.291 \quad \pm 0.151 \\
Y_o(m) &= 2.794 \quad \pm 0.051 \\
Z_o(m) &= -95.719 \quad \pm 0.028 \\
\omega(deg) &= 14.593 \quad \pm 0.411 \\
\varphi(deg) &= -5.052 \quad \pm 1.003 \\
\kappa(deg) &= 2.778 \quad \pm 0.208 \\
\\
\hat{\sigma}_o &= 0.0418\, mm \simeq 6.5\ pixel
\end{aligned}
$$

Εικόνα 3.24: Στοιχεία Εξωτερικού Προσανατολισμού Εφαρμογή 4

xy (pixe

x	*y*
-0.44	*-5.72*
1.14	*-0.81*
4.86	*2.60*
4.36	*-1.20*
-5.52	*10.31*
-4.05	*-4.17*

Εικόνα 3.25: Υπόλοιπα παρατηρήσεων xy Εφαρμογή 4

Η κλίμακα της αρχικής εικόνας είναι περίπου 1:300 επομένως το σφάλμα που προκύπτει από την οπισθοτομία αντιστοιχεί στην πραγματικότητα σε

$$\sigma_o = 0.0418 \cdot 300 = 0.014\text{m} = 1.4\,cm$$

Το σφάλμα αυτό είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με τις δύο πρώτες εφαρμογές. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το βήμα σάρωσης του τρισδιάστατου νέφους που χρησιμοποιήθηκε ήταν μεγαλύτερο συγκριτικά με τις προηγούμενες εφαρμογές με αποτέλεσμα να εισάγεται μεγαλύτερο σφάλμα στον εντοπισμό των σημείων λόγω του πιο αραιού νέφους.

3.6.2.5 Ορθοφωτογραφίες του αντικειμένου

Τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των παραπάνω εικόνων, όπως υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο, χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών. Ο τρόπος εκτέλεσης του αλγορίθμου για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών παρουσιάζεται στην διπλωματική εργασία της Γ. Σταυροπούλου *"Ανάπτυξη Λογισμικού για την Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις"* (2013) ενώ τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

Εικόνα 3.26: Αριστερά : Αρχική Εικόνα - Δεξιά : Ορθοφωτογραφία - Εφαρμογή 1

Εικόνα 3.27: Αριστερά : Αρχική εικόνα - Δεξιά : Ορθοφωτογραφία - Εφαρμογή 2

Εικόνα 3.28: Αριστερά : Αρχική εικόνα - Δεξιά : Ορθοφωτογραφία - Εφαρμογή 3

Εικόνα 3.29: Ορθοφωτομωσαϊκό των τριών πρώτων εφαρμογών

Εικόνα 3.30: Εφαρμογή 4

3.6.3 Έλεγχος οπισθοτομίας με δεδομένα από γεωδαιτικές μετρήσεις

Εκτός από τους παραπάνω ελέγχους πραγματοποιήθηκε και μία εφαρμογή όπου τα χρησιμοποιούμενα φωτοσταθερά ήταν μετρημένα με γεωδαιτικές μετρήσεις. Οι εικόνα που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζει την βόρεια όψη του ιερού ναού του Τιμίου Σταυρού στο Πελένδρι της Κύπρου (Μπαριάμη 2012, Φάκα 2012)

Εικόνα 3.31: Αρχική εικόνα- Ναός Πελενδρίου στην Κύπρο

Εικόνα 3.32: Προσημασμένο φωτοσταθερό

Χρησιμοποιήθηκαν έξι φωτοσταθερά σημεία που είναι μετρημένα με γεωδαιτικές μετρήσεις και προσημασμένα με στόχους πάνω στο αντικείμενο. Μετρήθηκαν οι εικονοσυνταταγμένες των στόχων στην εικόνα μέσω του λογισμικού και εισήχθησαν οι γνωστές μετρημένες γεωδαιτικές τους συντεταγμένες.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την οπισθοτομία είναι τα εξής:

$$
\begin{aligned}
X_o(m) &= 101.3938 \ \pm 0.036 \\
Y_o(m) &= 102.0372 \ \pm 0.091 \\
Z_o(m) &= -92.7765 \ \pm 0.0141 \\
\omega(deg) &= -0.0048 \ \pm 0.0040 \\
\kappa(deg) &= -0.0065 \ \pm 0.0015 \\
\\
\hat{\sigma}_o &= 0.03814\, mm = 6\, pixel
\end{aligned}
$$

Εικόνα 3.33: Στοιχεία Εξωτερικού Πρασανατολισμού

Η κλίμακα της αρχικής εικόνας υπολογίζεται περίπου ίση με $1:300 \simeq 1:330$, επομένως το σφάλμα $\hat{\sigma}_o$ αντιστοιχεί περίπου με 1.2-1.26 cm στην πραγματικότητα. Τα όρια σύγκλισης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της διαδικασίας της οπισθοτομίας καθορίστηκαν με βάση την επιθυμητή κλίμακα του τελικού προϊόντος που ορίστηκε 1:50. Σύμφωνα με την κλίμακα αυτή το αναμενόμενο σφάλμα δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1.25 cm. Επομένως η ακρίβεια προσδιορισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων έχουν μετρηθεί με ακρίβεια 5mm και ότι οι προσημασμένοι στόχοι διευκολύνουν την σκόπευση των σημείων στην εικόνα, δεν δικαιολογείται το μεγάλο σφάλμα που προέκυψε.

Για την διερεύνηση πιθανού προβλήματος στην παραπάνω επίλυση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία.

Η οπισθοτομία επιλύθηκε ξανά με την Γενική Μέθοδο Συνόρθωσης αυτή τη φορά (Αγάτζα-Μπαλοδήμου, 2009) . Με αυτόν τον τρόπο οι μετρήσεις XYZ των σημείων δεν θεωρούνται γνωστές, όπως συμβαίνει στην περίπτωση επίλυσης με έμμεσες παρατηρήσεις, αλλά θεωρούνται ως παρατηρήσεις με γνωστό σφάλμα. Θεωρήθηκε αρχικά ότι το σφάλμα μέτρησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων είναι $\sigma_{XYZ} = 0.005\, m$ ενώ αντίστοιχα για τις εικονοσυντεταγμένες θεωρήθηκε σφάλμα 1 pixel, δηλαδή $\sigma_{xy} = 0.0064\, mm$,καθώς το μέγεθος του pixel είναι 6.4 μm. Χρησιμοποιώντας ως a priori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους την μονάδα ($\sigma_o = 1$) τα βάρη των μετρήσεων προκύπτουν: $P_{XYZ} = \frac{1}{\sigma_{XYZ}^2}$, $P_{xy} = \frac{1}{\sigma_{xy}^2}$. Με την επίλυση της συνόρθωσης αναμένεται $\frac{\hat{\sigma}_o}{\sigma_o} \simeq 1 \rightarrow \hat{\sigma}_o \simeq 1$

Αφού χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω βάρη προέκυψε από την συνόρθωση $\hat{\sigma}_o = 1.791$. Αρχικά σημειώνεται πως όταν το a posteriori τυπικό σφάλμα δεν είναι μονάδα σημαίνει ότι η αρχική εκτίμηση των αρχικών σφαλμάτων δεν ήταν σωστή. Συγκεκριμένα αν $\hat{\sigma}_o > 1$ δείχνει ότι η ακρίβεια των μετρήσεων είναι χειρότερη από αυτήν που θεωρήθηκε κατά την συνόρθωση, όπως συμβαίνει στην συγκεκριμένη περίπτωση. Επόμενο βήμα είναι η αλλαγή των αρχικών σφαλμάτων των μετρήσεων σε μεγαλύτερα από αυτά που θεωρήθηκαν την

πρώτη φορά ώστε να επυτευχθεί a posteriori τυπικό σφάλμα ίσο με την μονάδα. Μετά από δοκιμές το $\hat{\sigma}_o$ πλησίασε την μονάδα όταν η ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων XYZ έγινε $\sigma_{XYZ}=0.01\,m$ και των εικονοσυντεταγμένων xy μεταξύ 1- 2 pixel.

Η παραπάνω διαδικασία έδειξε ότι η αρχική θεώρηση που έγινε σχετικά με την ακρίβεια των γεωδαιτικών συντεταγμένων ήταν λανθασμένη και πως η ακρίβεια μέτρησής τους φτάνει το 0.01 m αντί τα 0.005 m όπως αρχικά θεωρήθηκε. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να δικαιολογήσει το σφάλμα υπολογισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας.

3.7 Προβλήματα- Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, σε συνδυασμό με την διπλωματική *"Ανάπτυξη Αλγορίθμου παραγωγής Ορθοφωτογραφίας χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις* (Σταυροπούλου, 2013)", αντιμετωπίστηκαν αρκετές δυσκολίες και προβλήματα, τα οποία προέκυψαν είτε από τον τρόπο της αλγοριθμικής προσέγγισης του θέματος, είτε από την φύση και τις ιδιαιτερότητες του αντικειμένου εφαρμογής. Καθώς η συλλογή των δεδομένων προηγήθηκε της υλοποίησης του αλγορίθμου, δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθούν οι περιορισμοί που ενέχει η προτεινόμενη μέθοδος και που ανακαλύφθηκαν με την μετέπειτα διερεύνηση, δυσχεραίνοντας ουσιαστικά την εφαρμογή των συγκεκριμένων δεδομένων στον αλγόριθμο. Όλες αυτές οι δυσκολίες αναλύονται παρακάτω, δίνοντας έναυσμα για βελτιώσεις και επεκτάσεις.

3.7.1 Επιλογή σημείων στο τρισδιάστατο νέφος

3.7.1.1 Επιλογή Λογισμικού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί δίνεται η δυνατότητα μέσω έτοιμης συνάρτησης στο Matlab να επιλεγούν σημεία στο 3D νέφος. Ωστόσο, η συνάρτηση αυτή παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα:

1. Ο μεγάλος αριθμός των σημείων του νέφους (εκατοντάδες χιλιάδες σημεία) καθιστά την διαχείρισή του δύσχρηστη μέσω της συγκεκριμένης συνάρτησης.
2. Δεν επιτρέπει την αυτόματη αποθήκευση των συντεταγμένων των σημείων που έχουν επιλεχθεί, όπως γίνεται στην περίπτωση της επιλογής σημείων στην εικόνα, αλλά καλείται ο χρήστης να αποθηκεύει τις ζητούμενες συντεταγμένες χειροκίνητα σε ένα αρχείο κειμένου txt.

Για τους παραπάνω λόγους προτείνεται η επιλογή ενός διαφορετικού λογισμικού για την επιλογή των σημείων. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το Geomagic, το οποίο προσφέρει μία εύκολη επεξεργασία των τρισδιάστατων νεφών, ακόμα και αν ο όγκος των διαχειρίσιμων αρχείων είναι πολύ μεγάλος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει με τον δρομέα όσα σημεία επιθυμεί και να τα αποθηκεύσει αυτόματα σε ένα αρχείο .txt το οποίο περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των σημείων αυτών. Αυτό φυσικά απαιτεί την εξασφάλιση του εμπορικού αυτού προγράμματος από τον χρήστη. Σημειώνεται, ότι δίνεται πάντα η επιλογή στον χρήστη να διαλέξει τα σημεία αυτά μέσω του υλοποιημένου αλγορίθμου στο περιβάλλον του Matlab.

3.7.1.2 Ακρίβεια επιλογής σημείων στο νέφος

Μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες που εντοπίστηκαν αφορούσε στην ακριβή επιλογή των σημείων/φωτοσταθερών από το τρισδιάστατο νέφος. Το μειονέκτημα των τρισδιάστατων νεφών είναι το σφάλμα που εισάγεται λόγω του βήματος σάρωσης του αντικειμένου δυσχεραίνοντας τον εντοπισμό χαρακτηριστικών γωνιών και εξάρσεων του αναγλύφου σε αυτό. Σε αυτό προστίθεται και το σφάλμα αναγνώρισης του σημείου από τον χρήστη. Στην εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε στον ναό του Ηφαίστου ήταν αρκετά δύσκολος ο προσδιορισμός της ακριβούς θέσης των χαρακτηριστικών σημείων που εμφανίζονταν στην εικόνα παρά την μεγάλη ακρίβεια που προσφέρει ο σαρωτής (5mm). Τα σημεία επιλέχθηκαν αρκετά δύσκολα και πολλές φορές ήταν απαραίτητη η επανάληψη της διαδικασίας έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά η επιλογή τους πάνω στους κίονες ήταν απαγορευτική λόγω της κυλινδρικής τους επιφάνειας, με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι δυνατότητες δοκιμών με διαφορετικούς συνδυασμούς σημείων.

Η επιλογή σημείων πάνω στους κίονες ήταν απαγορευτική λόγω της κυλινδρικής τους επιφάνειας, με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι δυνατότητες δοκιμών με διαφορετικούς συνδυασμούς σημείων. Ο ανεπαρκής αριθμός των σημείων που μπορούσαν να εντοπιστούν παράλληλα στην εικόνα και στο νέφος, σε συνδυασμό με το σφάλμα που εισάγει κάθε επιλεγμένο σημείο, έδρασαν κατασταλτικά στον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού επηρεάζοντας άμεσα και την μετέπειτα διαδικασία της ορθοαναγωγής.

3.7.2 Επιλογή σημείων στην εικόνα

Η επιλογή των σημείων στην εικόνα από τον χρήστη πρέπει να γίνεται με προσοχή ώστε να μην εισάγεται μεγάλο σφάλμα στις επιλεγμένες εικονοσυντεταγμένες.

Στην εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε παρουσιάστηκε δυσκολία στην επιλογή σημείων στην εικόνα. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας του αντικειμένου (κυλινρική επιφάνεια κιόνων) δεν ήταν εύκολη η σκόπευση σημείων με αποτέλεσμα να είναι ανεπαρκής ο αριθμός αυτών που μπορούσαν να εντοπιστούν. Σε αυτό προστίθεται ο περιορισμός της επιλογής των σημείων αυτών παράλληλα και στο τρισδιάστατο νέφος. Κατ' επέκταση περιορίστηκαν οι δυνατότητες δοκιμών του αλγορίθμου με διαφορετικούς συνδυασμούς σημείων.

Επιπλέον, για την εξασφάλιση της καλύτερης δυνατής λύσης τα σημεία πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το αντικείμενο. Η παραπάνω προϋπόθεση σε συνδυασμό με την ελάχιστη απαίτηση των 6 σημείων για τον υπολογισμό των προσωρινών τιμών που θέτει ο DLT κάνει ακόμα πιο δύσκολη την επιλογή των σημείων αυτών.

Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η αδυναμία εύρεσης επαρκών σημείων στην εικόνα και στο νέφος παράλληλα ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ακρίβεια.

Λύση στα παραπάνω πρόβλημα θα μπορούσε να δώσει η ύπαρξη ειδικών στόχων που χρησιμοποιούνται κατά την σάρωση του αντικειμένου οι οποίοι θα σαρώνονται με μεγαλύτερη πυκνότητα από το σαρωτή και ταυτόχρονα θα είναι δυνατός ο εντοπισμός τους σε κάθε εικόνα. Οι στόχοι αυτοί χρησιμεύουν ως συμπληρωματικά χαρακτηριστικά σημεία σύνδεσης του νέφους και της εικόνας, δίνοντας περισσότερες επιλογές για διαφορετικούς συνδυασμούς σημείων και αυξάνοντας την ακρίβεια των δεδομένων εισαγωγής στον

αλγόριθμο. Δεδομένου ότι τέτοιοι στόχοι χρησιμεύουν και στη συρραφή νεφών, η ίδρυση τους δεν είναι επιφέρει αναγκαστικά παραπάνω εργασία στο πεδίο. Στην περίπτωση του ναού Ηφαίστου, πραγματοποιήθηκε ίδρυση τέτοιων στόχων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην μετέπειτα συρραφή των νεφών, ωστόσο, καθώς η λήψη των εικόνων έγινε σε διαφορετική χρονική στιγμή από τη σάρωση, οι στόχοι αυτοί είχαν αφαιρεθεί και δεν υπήρχε δυνατότητα εντοπισμού τους στις εικόνες.

3.7.3 Στροφή γεωδαιτικού συστήματος

Ένα από τα σημαντικά προβλήματα που προέκυψαν στον προσδιορισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού αφορά στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του αντικειμένου.

Αρχικά έγινε προσπάθεια υλοποίησης του αλγορίθμου χωρίς να στραφεί το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς XYZ. Το επίγειο αυτό σύστημα μπορεί να στραφεί έτσι ώστε ο άξονας των Z να είναι περίπου παράλληλος με τον άξονα λήψης και ο άξονας X να είναι παράλληλος με το κύριο επίπεδο του αντικειμένου. Στην περίπτωση των επίγειων λήψεων ως το πιο κατάλληλο επίπεδο προβολής θεωρείται το παράλληλο επίπεδο με το κύριο επίπεδο του αντικειμένου. Αν χρησιμοποιηθούν δύο κατάλληλα φωτοσταθερά στο αντικείμενο για την εύρεση της γωνίας στροφής, τότε μπορεί να πραγματοποιηθεί η παραπάνω στροφή του συστήματος. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι εύκολο να καθοριστεί το εν λόγω επίπεδο, όπως για παράδειγμα στις περιπτώσεις αντικειμένων με περίπλοκο ανάγλυφο (κίονες, αγάλματα κ.ά.). Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός ενός κύριου επιπέδου στο αντικείμενο δεν είναι δυνατή και η στροφή του συστήματος συντεταγμένων.

Η αρχική φιλοδοξία ήταν να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνει τις παραπάνω περιπτώσεις περίπλοκων αντικειμένων. Παρόλα αυτά, η παραπάνω μέθοδος δεν λειτούργησε σε όλες τις περιπτώσεις. Ο υλοποιούμενος αλγόριθμος αντιμετώπισε δυσκολίες στον σωστό προσδιορισμό των τιμών των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Η ύπαρξη μεγάλων στροφών (ω,φ ή κ) που προέκυπταν καθιστούσαν το πρόγραμμα αρκετά ευαίσθητο στον προσδιορισμό σωστής λύσης. Προβλήματα υπήρχαν τόσο στον προσδιορισμό των προσωρινών τιμών όσο και στην επίλυση της οπισθοτομίας. Οι εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου η σχέση των συστημάτων της εικόνας και του αντικειμένου είναι παράλληλα, είναι δηλαδή ανάλογη των περιπτώσεων των αεροφωτογραφιών. Ως εκ τούτου η διατήρηση του αρχικού συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων γωνιών στροφής ω, φ ή κ που προκαλούν προβλήματα στην επίλυση της οπισθοτομίας . Γι' αυτόν τον λόγο στις περιπτώσεις των επίγειων λήψεων αποδεικνύεται βολικότερη η στροφή του γεωδαιτικού συστήματος με οριζόντιο τον άξονα Z περίπου παράλληλο με τον άξονα λήψης.

Ο αλγόριθμος αποδείχτηκε αρκετά ''ευαίσθητος'' στην περίπτωση μη στραμμένου συτήματος με αποτέλεσμα την μη σύγκλιση της διαδικασίας της οπισθοτομίας σε μία ορθή λύση. Ιδιαίτερα προβλήματα υπήρξαν όταν κάποια από τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν καλής ακρίβειας δρώντας κατασταλτικά στον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Για παράδειγμα πολλές φορές οι τιμές των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού που προέκυπταν τοποθετούσαν το σημείο λήψης σε λανθασμένη θέση , συνήθως πίσω από το αντικείμενο ενώ άλλες φορές μόνο με

την αλλαγή της ακρίβειας προσδιορισμού ενός και μόνο σημείου ο αλγόριθμος αδυνατούσε να συγκλίνει σε μία λύση πραγματοποιώντας άπειρες επαναλήψεις.

Με στροφή του συστήματος, ώστε από γεωδαιτικό να στραφεί σε φωτογραμμετρικό σύστημα, λύθηκαν τα παραπάνω προβλήματα και επιτεύχθηκε ορθότερος προσδιορισμός των ζητούμενων στοιχείων. Οπωσδήποτε και σε αυτήν την περίπτωση ο προσδιορισμός των στοιχείων εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των αρχικών μετρήσεων.

3.7.4 Προσεγγιστικές τιμές

Ένα από τα προβλήματα που τίθενται στην φωτογραμμετρική οπισθοτομία είναι ο προσδιορισμός των προσεγγιστικών τιμών. Η γραμμικοποίηση των σχέσων της Συνθήκης Συγραμμικότητας απαιτεί τον προσδιορισμό των προσεγγιστικών τιμών των αγνώστων της συνόρθωσης. Για την επίλυση της οπισθοτομίας, όπως αναλύθηκε παραπάνω, ως άγνωστοι θεωρούνται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας $Xo, Yo, Zo, \omega, \varphi, \kappa$.

Η εξασφάλιση των προσεγγιστικών τιμών είναι μεγάλης σημασίας, δεδομένου ότι ακατάλληλες αρχικές τιμές προκαλούν πρόβλημα στην σύγκλιση της οπισθοτομίας με αποτέλεσμα αδυναμία στην εύρεση λύσης (Πέτσα 2000).

Στην περίπτωση των εναέριων λήψεων η εύρεση των προσωρινών τιμών δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εύρεσης των προσωρινών τιμών που ποικίλλουν ανάλογα με τις διατιθέμενες πληροφορίες κάθε φορά. Ο πιο απλός τρόπος είναι ο υπολογισμός των μέσων όρων των συντεταγμένων των μετρημένων σημείων. Από τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών μπορούν να υπολογιστούν οι προσωρινές τιμές για τα Xo, Yo , παίρνοντας απλώς τον μέσο όρο : $Xo^{(o)} = \bar{X}_i$, $Yo^{(o)} = \bar{Y}_i$. Για το Zo εκτός από τον μέσο όρο των Z των φωτοσταθερών, πρέπει να εκτιμηθεί και το ύψος πτήσης H . Το ύψος πτήσης προκύπτει από την σχέση $H = c \cdot k$, όπου c η σταθερά της μηχανή και k μια εκτίμηση της κλίμακας της εικόνας. Η κλίμακα θα μπορούσε να υπολογιστεί υποθέτοντας ότι η αεροφωτογραφία είναι αυστηρά κατακόρυφη. Οπότε $Zo^{(o)} = \bar{Z}_i + H$.

Για τις γωνίες ω, φ οι προσωρινές τιμές λαμβάνονται ως μηδέν (0) εφόσον πρόκειται για σχεδόν κατακόρυφες λήψεις και οι τιμές τους είναι μικρές, με εξαίρεση την γωνία κ για την οποία απαιτείται ένας χονδρικός αζιμουθιακός έλεγχος για τον αζιμουθιακό προσανατολισμό της γραμμής πτήσης.

Στην περίπτωση των επίγειων λήψεων τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά. Τα βασικά προβλήματα των επίγειων σε σχέση με τις εναέριες λήψεις είναι τα εξής:

- Αντιμετωπίζονται μεγάλες στροφές των εικόνων ως προς το γεωδαιτικό σύστημα, σε αντίθεση με τις αεροφωτογραφίες που όπως αναφέρθηκε παραπάνω θέτονται μηδενικές οι γωνίες ω, φ και με συγκεκριμένες τεχνικές υπολογίζεται η γωνία κ .
- Η σχέση του συστήματος της εικόνας ως προς το γεωδαιτικό σύστημα είναι άγνωστη και διαφορετική σε κάθε εφαρμογή. Ως γεωδαιτικό σύστημα στις περισσότερες επίγειες εφαρμογές αναφέρεται το τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς στο οποίο

έχει ενταχθεί το αντικείμενο μελέτης. Οι στροφές και η σχέση της εικόνας με το σύστημα αυτό μπορεί να είναι οποιεσδήποτε. Το σύνθετο αυτό πρόβλημα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με μία συγκεκριμένη τεχνική που να καλύπτει όλες τις πιθανές περιπτώσεις λήψεων. Ο τρόπος εκτίμησης των προσεγγιστικών τιμών εξαρτάται κάθε φορά από την κατανόηση της γεωμετρίας της λήψης και την εμπειρία του χρήστη (Πέτσα 2003)

Την λύση στο παραπάνω πρόβλημα έδωσε ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός (DLT) , ο οποίος και χρησιμοποιήθηκε στον αλγόριθμο (βλ. Κεφάλαιο 3.5.1).

3.7.4.1 Εύρεση προσεγγιστικών τιμών με τον DLT

Όπως αναφέρθηκε πρωτίστως ο προσδιορισμός των προσεγγιστικών τιμών είναι μεγάλης σημασίας εφόσον ακατάλληλες αρχικές τιμές προκαλούν πρόβλημα στην σύγκλιση της οπισθοτομίας με αποτέλεσμα αδυναμία στην εύρεση λύσης.

Η αρχική προσπάθεια διατήρησης του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς χωρίς στροφή, δημιούργησε προβλήματα στον τρόπο εύρεσης των προσωρινών τιμών εφόσον η σχέση του επίγειου συστήματος με το σύστημα της φωτογραφικής μηχανής ήταν τελείως άγνωστη. Την λύση στο πρόβλημα αυτό έδωσε ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός DLT. Παρόλα αυτά στην περίπτωση του μη στραμμένου συστήματος ο DLT δεν έδινε πάντα κατάλληλες προσωρινές τιμές με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόβλημα στην διαδικασία της οπισθοτομίας. Βέβαια, η ευαισθησία του προγράμματος δεν οφειλόταν μόνο στις ακατάλληλες αρχικές τιμές αλλά κυρίως στην διατήρηση του επίγειου συστήματος αναφοράς ως γεωδαιτικό.

Ωστόσο έγιναν προσπάθειες προσδιορισμού των παραμέτρων του μετασχηματισμού με καλύτερη ακρίβεια ώστε με την σειρά τους να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα στον προσδιορισμό των προσωρινών τιμών του εξωτερικού προσανατολισμού. Οι παράμετροι b_{ij} υπολογίζονται από τις γραμμικές σχέσεις (3.13). Η μέθοδος των Εμμέσων παρατηρήσεων χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση καταχρηστικά καθώς ''απαγορεύεται'' οι παρατηρήσεις x, y να περιέχονται στο δεύτερο μέλος των εξισώσεων παρατήρησης, όπως συμβαίνει σε αυτήν την περίπτωση όπου εμφανίζονται γινόμενα των $b_{31,} b_{32,} b_{33}$ με τα x, y . Γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των b_{ij} που προέκυψαν, ως προσωρινές τιμές για την ελαχιστοτετραγωνική επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων (3.11). Όμως, τα αποτελέσματα στην εφαρμογή των πραγματικών δεδομένων δεν έδειξαν κάποια βελτίωση στην ακρίβεια προσδιορισμού των παραμέτρων ή η βελτίωση ήταν αρκετά μικρή ώστε να μην επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Γι' αυτό τον λόγο απορρίφθηκε η διαδικασία αυτή και ο αλγόριθμος εκτελεί συνόρθωση χρησιμοποιώντας ως εξισώσεις παρατήρησης τις γραμμικές σχέσεις (3.13).

(Καρράς, 1998, Kwon, 1998)

Με την στροφή του συστήματος, από γεωδαιτικό σε φωτογραμμετρικό, θεωρητικά οι προσωρινές τιμές μπορούν να προκύψουν με απλές μεθόδους (εύρεση μέσων όρων) χωρίς να χρειάζεται ο Άμεσος Γραμμικός Μετασχηματισμός. Οι δοκιμές που έγιναν, με εφαρμογή πραγματικών δεδομένων, έδειξαν ότι ο DLT υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια προσωρινές τιμές και δεν δημιουργείται κανένα πρόβλημα στην διαδικασία της οπισθοτομίας. Από την

άλλη μεριά, δοκιμές που έγιναν να προσδιοριστούν οι τιμές αυτές με μέσους όρους δεν ήταν πάντα επιτυχής δημιουργώντας σε κάποιες περιπτώσεις προβλήματα στην σύγκλιση της οπισθοτομίας.

4 Φωτογραμμετρική Αναγωγή

Φωτογραμμετρική αναγωγή καλείται ο 2D μετασχηματισμός της εικόνας ενός επίπεδου αντικειμένου σε ορθή προβολή. Ο μετασχηματισμός που εφαρμόζεται είναι ο προβολικός μετασχηματισμός ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την προβολικότητα που εμφανίζουν οι προοπτικές εικόνες επίπεδων αντικειμένων. Είναι γνωστό ότι η κεντρική προβολή ενός επίπεδου αντικειμένου στην εικόνα συνδέεται με το επίπεδο του χώρου μέσω ενός προβολικού μετασχηματισμού. Η αποκατάσταση των μετρητικών ιδιοτήτων της εικόνας λόγω της εξάλειψης των προοπτικών παραμορφώσεων, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του προσδιορισμού του αντίστροφου προβολικού μετασχηματισμού. Η διαδικασία της φωτογραμμετρικής αναγωγής είναι ακριβώς η εφαρμογή του αντίστροφου προβολικού μετασχηματισμού που συνδέει το επίπεδο του χώρου με το επίπεδο της εικόνας. Αποτέλεσμα είναι η επανασύσταση μιας νέας εικόνας η οποία είναι απαλλαγμένη από τις παραμορφώσεις λόγω της κλίσης ως προς το επίγειο επίπεδο της αρχικής εικόνας.

Ο μετασχηματισμό που συνδέει τις εικονοσυντεταγμένες x, y με τις αντίστοιχες συντεταγμένες στον χώρο X, Y περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

(4.1)

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

Για τον υπολογισμό των 8 παραμέτρων του μετασχηματισμού χρειάζονται τουλάχιστον τέσσερα σημεία μετρημένα στην εικόνα και στο επίπεδο του χώρου καθώς κάθε σημείο δίνει δύο εξισώσεις. Ο μετασχηματισμός όπως αναφέρθηκε είναι αμφιμονοσήμαντος, δηλαδή είναι εφικτή η μεταφορά από την εικόνα στον χώρο, υπολογίζοντας συντεταγμένες X, Y από τις μετρημένες εικονοσυντεταγμένες x, y . Επειδή ο χώρος θεωρείται επίπεδος ο μετασχηματισμός 4.1 και ο αντίστροφός του θεωρούνται ισοδύναμοι. Οι εξισώσεις του αντίστροφου προβολικού μετασχηματισμού είναι:

$$X=\frac{A_{11}x+A_{12}y+A_{13}}{A_{31}x+A_{32}y+1}, \qquad Y=\frac{A_{21}x+A_{22}y+A_{23}}{A_{31}x+A_{32}Y+1} \tag{4.2}$$

Οι σχέσεις μεταξύ των συντελεστών α_{ij}, A_{ij} είναι:

$$A_{11}=\frac{(a_{22}-a_{23}a_{32})}{A} \qquad A_{12}=-\frac{(a_{12}-a_{13}a_{32})}{A} \qquad A_{13}=\frac{(a_{12}a_{23}-a_{13}a_{22})}{A} \tag{4.3}$$

$$A_{21}=\frac{-(a_{21}-a_{23}a_{31})}{A} \qquad A_{22}=\frac{(a_{11}-a_{13}a_{31})}{A} \qquad A_{23}=-\frac{(a_{11}a_{21}-a_{13}a_{21})}{A}$$

$$A_{31}=-\frac{(a_{21}a_{32}-a_{21}a_{31})}{A} \qquad A_{32}=\frac{(a_{12}a_{31}-a_{11}a_{31})}{A}$$

$$A=a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21}$$

Ένα από τα πλεονεκτήματα του προβολικού μετασχηματισμού έναντι της ΣΣ είναι ότι τα μετρημένα x, y μπορούν να αναφέρονται σε οποιοδήποτε σύστημα και όχι κατ' ανάγκη στο σύστημα το ορισμένο από το πρωτεύον σημείο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της Συνθήκης Συγγραμμικότητας. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητο να έχουν διορθωθεί οι συντεταγμένες από τα γραμμικά σφάλματα της εικόνας αφού ο ίδιος ο προβολικός ενέχει στις παραμέτρους του τις γραμμικές αυτές παραμορφώσεις. Σημειώνεται ότι οι μη γραμμικές παραμορφώσεις, όπως η ακτινική διαστροφή του φακού, δεν διορθώνεται από τον μετασχηματισμό.

Είναι απαραίτητο σε αυτό το σημείο να διευκρινιστεί ότι για την απόδοση του αντικειμένου σε ορθή προβολή και όχι σε πλάγια πρέπει το επίπεδο του αντικειμένου να είναι εκφρασμένο σε σύστημα τέτοιο ώστε να είναι παράλληλο ή να ταυτίζεται με το επίπεδο ΧΥ του συστήματος αναφοράς του χώρου.

(Καρράς, 1998, Hartley and Zisserman, 2006)

Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν τα στάδια του αλγορίθμου για την αναγωγή της εικόνας. Να σημειωθεί ότι για την επιλογή των σημείων στην εικόνα και στο 3D νέφος ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως στην περίπτωση του πρώτου αλγορίθμου εύρεσης των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού (βλ Κεφάλαια 3.1, 3.2) . Η μοναδική διαφορά έγκειται στον αριθμό των σημείων όπου στην περίπτωση της αναγωγής χρειάζονται περισσότερα από 4 σημεία όπως αναφέρθηκε πρωτύτερα.

4.1 Στροφές Συστήματος

Εφόσον είναι διαθέσιμα τα αρχεία των συντεταγμένων (του χώρου και της εικόνας) των σημείων καθώς και η ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου, το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι η στροφή των γεωδαιτικών συντεταγμένων. Αυτό γίνεται καθώς το επίπεδο του αντικειμένου πρέπει να είναι εκφρασμένο σε σύστημα τέτοιο ώστε να είναι παράλληλο ή να ταυτίζεται με το επίπεδο ΧΥ του συστήματος αναφοράς του χώρου.

Οι στροφές που πραγματοποιούνται είναι δύο. Η πρώτη πραγματοποιείται γύρω από τον άξονα Z του τρισδιάστατου συστήματος του χώρου XYZ , ώστε το αντικείμενο να είναι παράλληλο είτε με τον άξονα των X είτε με τον άξονα των Y και η δεύτερη στροφή πρόκειται για μία αντιμετάθεση αξόνων. Αναλυτικά οι στροφές περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.4

4.2 Υπολογισμός Παραμέτρων Προβολικού Μετασχηματισμού

Για την εύρεση των παραμέτρων του προβολικού μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων που μετρήθηκαν στην ψηφιακή εικόνα (συντεταγμένες pixel) και οι αντίστοιχες γεωδαιτικές τους συντεταγμένες εφόσον σε αυτές εφαρμοστούν οι δύο παραπάνω στροφές. Επομένως προκύπτουν συντεταγμένες εικόνας στο σύστημα ij και συντεταγμένες στον χώρο στο σύστημα $X'Y'$ της όψης του αντικειμένου.

Ο αλγόριθμος υπολογίζει με την Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων τις παραμέτρους του αντίστροφου προβολικού. Οι εξισώσεις (4.2) δεν είναι γραμμικές ως προς τους αγνώστους

συντελεστές αλλά μπορούν να γραφούν στην μορφή:

$$X + v_x = A_{11}x + A_{12}y + A_{13} - A_{31}Xx - A_{32}Xy$$
$$Y + v_y = A_{21}x + A_{22}y + A_{23} - A_{31}xY - A_{32}Yy \quad (4.4)$$

Τα v_x, v_y, αποτελούν σφάλματα κλεισίματος των εξισώσεων.

Οι εξισώσεις (4.4) χρησιμοποιούνται ως εξισώσεις παρατήρησης για την επίλυση της συνόρθωσης με την Μέθοδο των Εμμέσων Παρατηρήσεων. Δεδομένων των μετρημένων σημείων στην εικόνα και στο επίπεδο του χώρου πραγματοποιείται συνόρθωση χρησιμοποιώντας ως εξισώσεις παρατήρησης τις σχέσεις (4.4).

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι 8 παράμετροι A_{ij} του αντίστροφου μετασχηματισμού, υπολογίζονται στην συνέχεια οι παράμετροι του α_{ij} από τις σχέσεις (4.3) μέσω των οποίων μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες εικόνας x, y δεδομένων των συντεταγμένων X, Y . (Καρράς 1998), (Rhody, 2005)

4.3 Επανασύσταση Εικόνας

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας της αναγωγής και κατ' επέκταση του αλγορίθμου αρκεί να θεωρηθεί η τελική ψηφιακή εικόνα ως ένας κενός κάναβος χωρίς χρώμα αλλά με γνωστές διαστάσεις και αριθμό εικονοψηφίδων (pixel). Ο προσδιορισμός των διαστάσεων του κανάβου -ύψος (height) και πλάτος (width)- βασίζεται σε δύο παράγοντες:

1. Τα επίγεια όρια $X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max}$ της αρχικής εικόνας που περικλείουν την περιοχή ενδιαφέροντος που απεικονίζεται στην τελική εικόνα.
2. το μέγεθος της εδαφοψηφίδας, δηλαδή το μέγεθος του pixel στο έδαφος της τελικής εικόνας.

Καθορίζεται αρχικά το μέγεθος της εδαφοψηφίδας, δηλαδή το μέγεθος του εικονοστοιχείου –pixel- της εικόνας που αντιστοιχεί στην πραγματικότητα. Το μέγεθος αυτό καθορίζεται από την κλίμακα του τελικού προϊόντος που ο χρήστης έχει επιλέξει και προσδιορίζεται από την σχέση: $εδαφοψηφίδα = 0.1\,mm \cdot Συντελεστή\ Κλίμακας$

Για παράδειγμα αν η ζητούμενη κλίμακα της τελικής εικόνας είναι 1:50 τότε το μέγεθος της εδαφοψηφίδας θα είναι: $εδαφοψηφίδα = 0.1\,mm \cdot 50 = 5\,mm = 0.005\,mm$.

Από τα τέσσερα όρια της αρχικής εικόνας δηλαδή τα $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$ και μέσω των προβολικών παραμέτρων A_{ij} υπολογίζονται οι συντεταγμένες των ορίων αυτών στο σύστημα XY του αντικειμένου, δηλαδή τα $X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max}$ μέσω των σχέσεων:

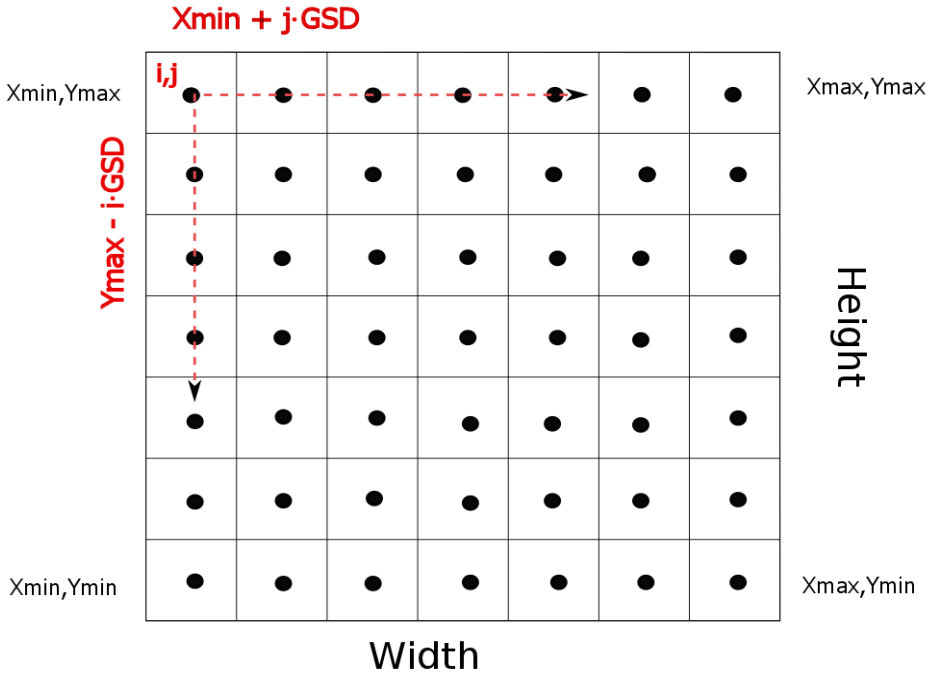
$$X = \frac{A_{11}x + A_{12}y + A_{13}}{A_{31}x + A_{32}y + 1}, \qquad Y = \frac{A_{21}x + A_{22}y + A_{23}}{A\alpha_{31}x + A_{32}Y + 1}$$

Εφόσον έχουν βρεθεί τα όρια του κανάβου στο σύστημα του επιπέδου του αντικειμένου, υπολογίζεται εύκολα ο αριθμός των ψηφίδων της εικόνας όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$Height = \frac{max\,Y - min\,Y}{\mu\acute{\varepsilon}\gamma\varepsilon\theta o\varsigma\ \varepsilon\delta\alpha\phi o\psi\eta\phi\acute{\iota}\delta\alpha\varsigma} \quad , \quad Width = \frac{max\,X - min\,X}{\mu\acute{\varepsilon}\gamma\varepsilon\theta o\varsigma\ \varepsilon\delta\alpha\phi o\psi\eta\phi\acute{\iota}\delta\alpha\varsigma}$$

$$A\rho\iota\theta\mu\acute{o}\varsigma\ \varepsilon\iota\kappa o\nu o\psi\eta\phi\acute{\iota}\delta\omega\nu = Height \cdot Width$$

Τώρα πλέον υπάρχει η κενή ψηφιακή εικόνα με γνωστό το μέγεθός της αλλά και τις συντεταγμένες X_{ij}, Y_{ij} του κάθε pixel, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Σε αυτό το σημείο προσδιορίζεται με πιο χρώμα θα γεμίσει η κάθε εικονοψηφίδα ώστε να δημιουργηθεί η τελική ανηγμένη εικόνα.



Εικόνα 4.1: Κενή εικόνα με γνωστά XY των κέντρων των pixel, με βήμα ίσο με την εδαφοψηφίδα

Με αφετηρία την πάνω αριστερή ψηφίδα της εικόνας η κάθε κενή ψηφίδα αντιστοιχίζεται με συντεταγμένες x, y της αρχικής εικόνας μέσω των προβολικών εξισώσεων (4.1), εφόσον οι παραμέτροι α_{ij} που συνδέουν τα δύο συστήματα έχουν υπολογιστεί καθώς επίσης και τα X_{ij}, Y_{ij} των κενών ψηφίδων

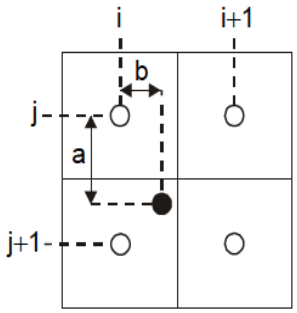
(Σπάρταλης, 2007).

Η διαδικασία με την οποία προσδιορίζεται το χρώμα ονομάζεται παρεμβολή. Εφόσον εντοπιστούν οι συντεταγμένες pixel της αρχικής εικόνας στις οποίες αντιστοιχεί η εικονοψηφίδα της ανηγμένης εικόνας, πρέπει να υπολογιστεί η κατάλληλη τιμή χρώματος που θα αποδοθεί. Οι συντεταγμένες, ωστόσο, που υπολογίστηκαν δεν είναι ακέραιοι αριθμοί με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα με τα pixel της αρχικής εικόνας αλλά προκύπτει μία θέση ανάμεσα στα κέντρα τεσσάρων εικονοψηφίδων, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή μίας μεθόδου παρεμβολής (Καρράς & Πέτσα, 1998). Οι βασικές μέθοδοι παρεμβολής που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις επανασύστασης εικόνας είναι τρεις:

- Εγγύτερου γείτονα (Nearest neighbor)
- Διγραμμική παρεμβολή (Bilinear interpolation)
- Δικυβική συνέλιξη (Bicubic convolution)

Η παρεμβολή του εγγύτερου γείτονα αποδίδει στο pixel την τιμή του χρώματος της πλησιέστερης εικονοψηφίδας, διατηρώντας τους τόνους της αρχικής εικόνας. Είναι η ταχύτερη από τις τρεις μεθόδους, καθώς δεν απαιτεί πολλούς υπολογισμούς, ωστόσο προσφέρει μειωμένη αξιοπιστία. Ιδιαίτερα σε εικόνες με μικρή ανάλυση το αποτέλεσμα αυτής της παρεμβολής έχει ορατές ατέλειες, όπως οδοντωτές ακμές και ασυνέχειες. Με την διγραμμική παρεμβολή το κατάλληλο χρώμα υπολογίζεται βάσει των 4 γειτονικών ψηφίδων με βάρη ανάλογα της απόστασης, μεταβάλλοντας τις τιμές χρώματος της αρχικής εικόνας. Οι υπολογισμοί αυξάνονται σε αυτή την περίπτωση αλλά το αποτέλεσμα είναι ποιοτικά καλύτερο. Τέλος, η δικυβική παρεμβολή υπολογίζει την τιμή του χρώματος βάσει των 16 γειτονικών ψηφίδων και έχει τις πιο αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στον αλγόριθμο είναι αυτή της διγραμμικής παρεμβολής. Έτσι η ορθή τιμή του χρώματος υπολογίστηκε με τον κεντροβαρικό μέσο όρο των 4 γειτονικών εικονοψηφίδων, με βάρη ανάλογα των αποστάσεών τους από το σημείο, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:



$$g' = (1-a)(1-b)\times g_{i,j} + (1-a)b\times g_{i+1,j} + a(1-b)\times g_{i,j+1} + ab\times g_{i+1,j+1}$$

Εικόνα 4.2: Διγραμμική παρεμβολή

Αλγοριθμικά η εικόνα αναγνωρίζεται ως ένας δισδιάστατος πίνακας $M\ x\ N$ στοιχείων, αλλά στην περίπτωση της έγχρωμης εικόνας, η χρωματική πληροφορία εκφράζεται ως μία τρίτη διάσταση του πίνακα. Ουσιαστικά πρόκειται για 3 εικόνες, μία για κάθε κανάλι, συγχωνευμένες σε μία, ενώ οι διαστάσεις του πίνακα είναι $M\ x\ N\ x\ 3$. Δεδομένου ότι η διαθέσιμη αρχική εικόνα είναι έγχρωμη, η διαδικασία της παρεμβολής εφαρμόζεται σε κάθε ένα από τα κανάλια R,G,B ξεχωριστά και έπειτα ακολουθεί συγχώνευσή τους στην τελική έγχρωμη ορθοφωτογραφία.

4.4 Γεωαναφορά

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία της αναγωγής πραγματοποιείται η γεωναφορά της ανηγμένης εικόνας. Κατά την διαδικασία της γεωαναφοράς προσδίδονται συντεταγμένες του χώρου στην τελική εικόνα με αποτέλεσμα να αποδίδεται η σωστή θέση και γεωμετρία της όταν εισαχθεί σε κατάλληλα λογισμικά. Η γεωαναφορά δεν γίνεται σε κάποιο γνωστό σύστημα συντεταγμένων αλλά σε ένα αυθαίρετο, με σκοπό την εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας καθώς και την συσχέτιση τους με άλλες εικόνες για τη δημιουργία ενός ενιαίου φωτομωσαϊκού.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι απόδοσης γεωαναφοράς σε μία εικόνα. Ένα από τα πλέον διαδεδομένα πρότυπα είναι οι εικόνες τύπου Geotiff. Τα συγκεκριμένα αρχεία αποτελούν μία διαφορετική μορφή των αρχείων Tiff και εμπεριέχουν την γεωαναφορά τους στην επικεφαλίδα τους (“header”). Αν και αυτή η μορφή γεωαναφοράς είναι αναγνωρίσιμη από τα περισσότερα λογισμικά, η δημιουργία αυτών των αρχείων αποτελεί μία εξειδικευμένη διαδικασία. Λόγω των προγραμματιστικών δυσκολιών δημιουργίας και αποθήκευσης τέτοιων αρχείων σε περιβάλλον Matlab, δεν προτιμήθηκε αυτή η μέθοδος για την γεωαναφορά των ορθοφωτογραφιών. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι εκδόσεις του Matlab που περιέχουν την βιβλιοθήκη “Mapping Toolbox” δίνουν την δυνατότητα, εισαγωγής, διαχείρισης, επεξεργασίας και αποθήκευσης τέτοιου είδους αρχείων-εικόνων.

Η μέθοδος της γεωαναφοράς που υλοποιείται από τον αλγόριθμο πραγματοποιείται με συνοδευτικά αρχεία, γνωστά με την ονομασία world files. Πρόκειται για αρχεία ascii τα οποία αναγιγνώσκονται παράλληλα με το αρχείο της εικόνας, εφόσον διαθέτουν το ίδιο όνομα. Ανάλογα με τον τύπο της εικόνας αυτά τα αρχεία έχουν και ανάλογη κατάληξη. Για παράδειγμα εικόνες τύπου Tiff/Tif συνοδεύονται από αρχεία με κατάληξη .*tfw ή *.tifw, ενώ εικόνες τύπου Jpg συνοδεύονται από αρχεία με κατάληξη *.jgw ή *.jpgw. Αυτή η μέθοδος γεωαναφοράς εμφανίζει ορισμένα μειονεκτήματα, καθώς δεν είναι πάντα αναγνωρίσιμη από λογισμικά που διαθέτουν διαφορετικούς τρόπους μετασχηματισμών των εικόνων. Ωστόσο, η ευκολία δημιουργίας αυτών των αρχείων ακόμη και σε ένα απλό “notepad” (λογισμικό δημιουργίας ascii αρχείων), κάνει τη χρήση τους ιδιαίτερα διαδεδομένη.

Τα συγκεκριμένα αρχεία περιέχουν ένα πίνακα 6 στοιχείων, το ένα κάτω από το άλλο και εισάγονται με την εξής σειρά:

1. Βήμα ανά pixel κατά την X διεύθυνση
2. Απόκλιση γραμμών εικόνας ως προς άξονα X του συστήματος
3. Απόκλιση στηλών εικόνας ως προς άξονα Y του συστήματος
4. Βήμα ανά pixel κατά την Y διεύθυνση
5. Συντεταγμένη X του κέντρου του πάνω αριστερά pixel
6. Συντεταγμένη Y του κέντρου του πάνω αριστερά pixel

Στον αλγόριθμο, κατά την γεωαναφορά των εικόνων αποδίδονται στην άνω αριστερά εικονοψηφίδα της εικόνας οι συντεταγμένες 100,100, ενώ για βήμα κατά X άξονα εισάγεται το μέγεθος της εκάστοτε εδαφοψηφίδας, όπως αυτή έχει καθοριστεί από τον συντελεστή κλίμακας που έχει ορίσει ο χρήστης. Το βήμα κατά τον Y άξονα έχει πάλι το ίδιο μέγεθος εδαφοψηφίδας δεδομένου ότι τα pixel είναι τετράγωνα, αλλά με αρνητικό πρόσημο. Καθώς το σύστημα είναι αυθαίρετο, θεωρήθηκε παράλληλο με αυτό της εικόνας και έτσι κατά την

γεωαναφορά εισάγονται μηδενικές αποκλίσεις. Τα τελικά αρχεία είναι της παρακάτω μορφής:

```
0.020000
0.000000
0.000000
-0.02000
100.00000
100.00000
```

Εικόνα 4.3 Μορφή αρχείου tfw

Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται αυτόματα, παράλληλα με την αποθήκευση των εικόνων, διατηρώντας το επιλεγμένο όνομα και προσθέτοντας την κατάληξη .tfw. Όπως προαναφέρθηκε, τα αρχεία με τη συγκεκριμένη κατάληξη συνοδεύουν εικόνες τύπου Tif, επομένως σε περίπτωση επιλογής αποθήκευσης εικόνας σε διαφορετικό format τα αρχεία αυτά δεν έχουν καμία χρηστικότητα.

(Σταυροπούλου, 2013)

4.5 Έλεγχος αναγωγής

Πραγματοποιήθηκαν δύο εφαρμογές του αλγορίθμου σε πραγματικά δεδομένα ώστε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά του. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον δυτικό εσωτερικό τοίχο του ναού του Ηφαίστου στο Θησείο και της βόρειας όψης του ναού του Τιμίου Σταυρού στο Πελένδρι Κύπρου.

4.5.1 Έλεγχος με δεδομένα από 3D νέφος

Ο πρώτος έλεγχος πραγματοποιήθηκε με δεδομένα από τον ναό του Ηφαίστου στο Θησείο. Συγκεκριμένα εισήχθησαν στο πρόγραμμα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου δηλαδή μία ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου και ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων. Η ψηφιακή εικόνα που χρησιμοποιήθηκε και απεικονίζει τον εσωτερικό δυτικό τοίχο του σηκού του ναού είναι εικόνα HDR ενώ το τρισδιάστατο νέφος που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από σάρωση του εσωτερικού ναού με τον σαρωτή Scan Station 2 με ακρίβεια μέτρησης των σημείων 5mm και βήμα σάρωσης 1cm στα 8m. Στην συνέχεια μέσω του προγράμματος έγινε σκόπευση στην εικόνα 8 χαρακτηριστικών σημείων κατάλληλα επιλεγμένων ώστε να καλύπτουν όσο το δυνατόν περισσότερο την επιφάνεια του αντικειμένου (Εικόνα 4.4) . Επίσης επιλέχθηκαν οι αντίστοιχες γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων αυτών. Η επιλογή των XYZ συντεταγμένων έγινε στο τρισδιάστατο νέφος μέσω του Matlab, το οποίο προσφέρει την δυνατότητα αυτή στο χρήστη. Αφού καθορίστηκε η κλίμακα απόδοσης του τελικού προϊόντος 1:50, πραγματοποιήθηκε στροφή του συστήματος αναφοράς έτσι ώστε το σύστημα να είναι παράλληλο με το επίπεδο της αναγωγής. Ένας πρώτος έλεγχος για να αποφευχθούν

χονδροειδή λάθη κατά την επιλογή των γεωδαιτικών συντεταγμένων από το νέφος σημείων είναι να ελεγχθούν οι Z συντεταγμένες των σημείων όπως αυτές προέκυψαν μετά την στροφή του συστήματος. Καθώς το αντικείμενο θεωρείται επίπεδο οι συντεταγμένες κατά την Z διεύθυνση θα πρέπει να είναι περίπου ίδιες. Αν η τιμή Z κάποιου σημείου διαφέρει πολύ από τα υπόλοιπα αυτό αμέσως υποδεικνύει την λάθος επιλογή του από το 3D νέφος. Για παράδειγμα στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι συντεταγμένες τεσσάρων σημείων μετά την στροφή των συστημάτων, όπου τα δύο πρώτα έχουν διαφορά στην τιμή των Z περίπου 4 cm και 6 cm αντίστοιχα σε σχέση με τα άλλα σημεία. Οι τιμές αυτές δεν θα έπρεπε να έχουν τόσο μεγάλη απόκλιση καθώς το αντικείμενο θεωρείται επίπεδο, υποδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο την λάθος επιλογή των σημείων από το νέφος.

X(m)	Y(m)	Z(m)
70.8419	2.5557	-103.3671
77.0236	1.683	-103.3431
73.3243	8.3513	-103.4031
71.5121	6.1395	-103.3911

Πίνακας 4.1: Γεωδαιτικές συντεταγμένες XYZ μετά την στροφή του συστήματος

Διαλέγοντας πιο προσεκτικά τα σημεία από το νέφος και πραγματοποιώντας ξανά την στροφή του συστήματος προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

X (m)	Y(m)	Z(m)
73.3243	8.3513	-103.4031
71.5121	6.1396	-103.3911
72.8291	4.891	-103.3923
75.0388	4.851	-103.3835
75.1637	2.527	-103.3867

Ωστόσο και αυτήν την φορά παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των τιμών κατά την διεύθυνση Z που φτάνουν τα 2 cm.

Εικόνα 4.4: Αρχική Εικόνα- Δυτικός εσωτερικός τοίχος του ναού

Εικόνα 4.5: Ανηγμένη εικόνα

Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου και την δημιουργία της τελικής εικόνας υπολογίστηκαν οι παράμετροι του προβολικού και του αντίστροφου μετασχηματισμού καθώς και τα εναπομένοντα σφάλματα των xy εικονοσυντεταγμένων σε pixel και των ΧΥ γεωδαιτικών συντεταγμένων σε εκατοστά, όπως φαίνονται στους Πίνακες 4.2, 4.3.

x (pixel)	y (pixel)
-1.083	-3.821
-3.117	-1.083
1.588	-3.332
-2.377	0.399
3.581	5.611
-2.053	-5.459
3.463	7.692

Πίνακας 4.2: Εναπομένοντα σφάλματα xy

X (cm)	Y(cm)
0.276	-0.684
0.641	-0.199
-0.342	-0.707
0.486	0.125
-0.809	1.179
0.436	-1.187
-0.684	1.467

Πίνακας 4.3: Εναπομένοντα σφάλματα ΧΥ

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγάλα υπόλοιπα και κυρίως στην διεύθυνση των Υ όπου φτάνουν το 1.4 cm.

4.5.1.1 Έλεγχος με προσημασμένα φωτοσταθερά

Στην ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου υπάρχουν προσημασμένα τρία φωτοσταθερά σημεία οι συντεταγμένες των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Σημειώνεται ότι το τρισδιάστατο νέφος που χρησιμοποιήθηκε για την επιλογή των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων είναι γεωαναφερμένο στο ίδιο γεωδαιτικό σύστημα στο οποίο έχουν μετρηθεί τα τρία αυτά φωτοσταθερά.

	X(m)	Y(m)	Z(m)
1.	71.188	103.70	2.241
2.	72.469	109.211	2.301
3.	72.052	107.474	3.833

Πίνακας 4.4: Συντεταγμένες φωτοσταθερών

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε στροφή των συντεταγμένων αυτών ώστε να αναφέρονται στο σύστημα του αντικειμένου. Από την στροφή αυτήν προέκυψαν τα Χ'Υ' των σημείων που αναφέρονται στο στραμμένο σύστημα.

	$X_{στραμμένο}(m)$	$Y_{στραμμένο}(m)$
1.	71.188	2.241
2.	76.839	2.301
3.	75.053	3.833

Πίνακας 4.5: Συντεταγμένες των φωτοσταθερών στο στραμμένο σύστημα

Στην ψηφιακή εικόνα του αντικειμένου μετρήθηκαν οι εικονοσυντεταγμένες των τριών φωτοσταθερών σε pixel.

	$x\ (pixel)$	$y\ (pixel)$
1.	376.718	4084.343
2.	3263.656	4100.2812
3.	2382.937	3315.8125

Πίνακας 4.6: Εικονοσυντεταγμένων των τριών φωτοσταθερών σημείων στην εικόνα

Μέσω των σχέσεων του προβολικού μετασχηματισμού (Εξ. 4.18) και των υπολογισμένων παραμέτρων A_{ij} -που συνδέουν το επίπεδο προβολής και το επίπεδο της εικόνας- υπολογίστηκαν τα $X'Y'$ των σημείων. Σε πρώτη φάση χρησιμοποιούνται οι παράμετροι όπως αυτές προέκυψαν από την επιλογή των αρχικών σημείων. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

	$X'(m)$	$Y'(m)$
1.	71.196	2.206
2.	76.856	2.291
3.	75.052	3.824

Πίνακας 4.7: Τα X, Y όπως προκύπτουν από την εφαρμογή του προβολικού μετασχηματισμού

Η διαφορά των μετρημένων συντεταγμένων $X_{στραμμένο}(m)$, $Y_{στραμμένο}(m)$ με τα X' , Y' που προέκυψαν από την εφαρμογή του προβολικού μετασχηματισμού φαίνεται στον Πίνακα 4.8

$[X'-X_{στραμμένο}(m)]$	$[Y'-Y_{στραμμένο}(m)]$
0.00856	-0.0343
0.0174	-0.0106
-0.00083	-0.0093

Πίνακας 4.8: Εναπομένοντα σφάλματα X, Y

Τα σφάλματα αυτά αποτελούν ένα μέτρο ελέγχου της διαδικασίας της αναγωγής. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα κυμαίνονται από 8 mm έως 3.4 cm. Σύμφωνα με την κλίμακα απόδοσης που επιλέχθηκε (1:50) η αναμενόμενη ακρίβεια είναι 1.25 cm οποία ξεπερνάται κυρίως κατά την διεύθυνση των Y .

4.5.1.2 Έλεγχος γεωαναφερμένης εικόνας

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία της αναγωγής η τελική εικόνα που προκύπτει είναι γεωαναφερμένη σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Μέσω της γεωαναφοράς, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής μετρητικής πληροφορίας (Κεφ. 4.4) .Εισάγοντας την εικόνα σε κατάλληλο λογισμικό ώστε να αναγνωρίζει το αρχείο της γεωαναφοράς είναι δυνατή η μέτρηση χαρακτηριστικών αποστάσεων στο αντικείμενο οι πραγματικές διαστάσεις των οποίων είναι γνωστές.

Μετρήθηκαν στην εικόνα αποστάσεις μεταξύ των τριών φωτοσταθερών και συγκρίθηκαν με τις πραγματικές αποστάσεις των σημείων. Οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ τους είναι:

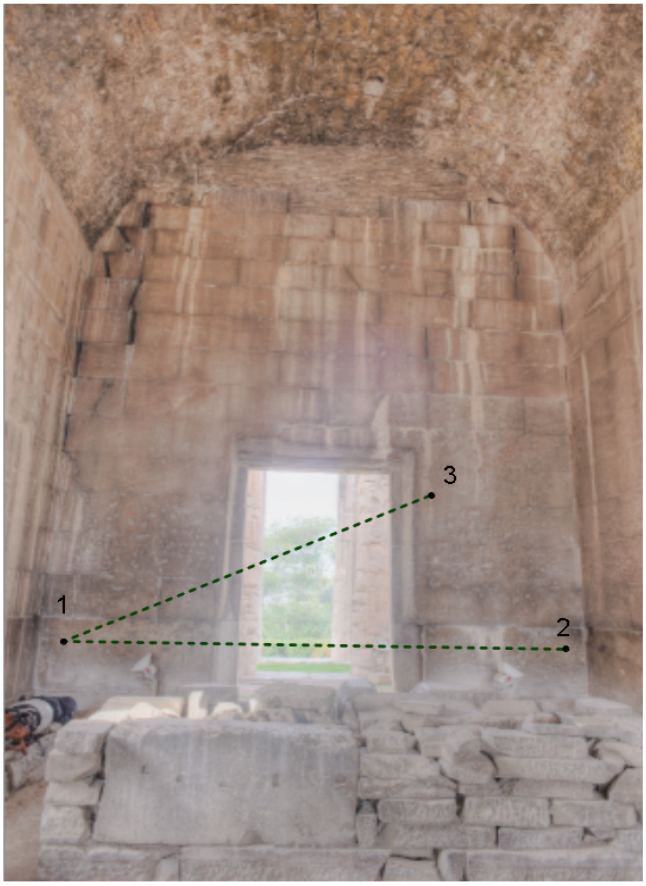
	Απόσταση 1-2 (m)	Απόσταση 1-3 (m)	Απόσταση 2-3 (m)
Διαφορά	**-0,0253**	**-0,00102**	**-0,0259**

Ο έλεγχος αυτός παρουσιάζει σφάλματα της τάξης των 2.5 cm, επομένως δεν καλύπτεται η ζητούμενη ακρίβεια.

4.5.2 Επίπεδο αντικείμενο υπό κλίση

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η αναγωγή που πραγματοποιήθηκε δεν καλύπτει τις απαιτήσεις σε ακρίβεια που τέθηκαν.

Παρότι επιλέχθηκαν ξανά σημεία από το τρισδιάστατο νέφος, προέκυπταν αποτελέσματα της ίδιας ακρίβειας όπως προηγουμένως. Για να διαπιστωθεί το σφάλμα στην διαδικασία συμπεριλήφθηκαν στα μετρημένα σημεία τα τρία γνωστά φωτοσταθερά και πραγματοποιήθηκε στροφή του συστήματος σύμφωνα με το αζιμούθιο που σχηματίζουν τα φωτοσταθερά 1 και 2 (Εικόνα 4.6) . Μετά την στροφή προέκυψαν οι παρακάτω συντεταγμένες (Πίνακας 4.9). Τα τρία πρώτα σημεία του πίνακα είναι αντίστοιχα τα φωτοσταθερά 1,2 και 3. Όπως φαίνεται το τρίτο φωτοσταθερό παρουσιάζει απόκλιση στην διεύθυνση των Z 1.2 cm σε σχέση με τα φωτοσταθερά 1 και 2. Δεδομένου ότι τα φωτοσταθερά είναι μετρημένα με γεωδαιτικές μεθόδους δεν δικαιολογείται η απόκλιση αυτή.



Εικόνα 4.6: Μετρημένες αποστάσεις

	$X(m)$	$Y(m)$	$Z(m)$
1.	71.188	2.241	-103.707
2.	76.839	2.301	-103.707
3.	75.053	3.833	-103.719
4.	71.512	6.139	-103.728
5.	72.829	4.892	-103.730
6.	75.0388	4.851	-103.721
7.	75.1637	2.527	-103.724

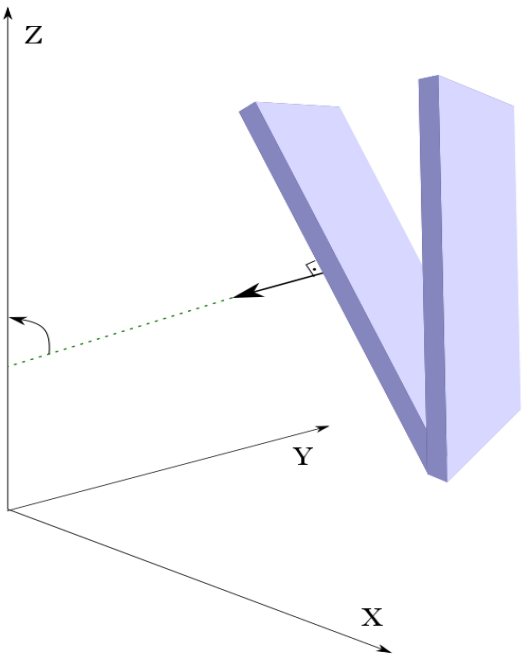
Πίνακας 4.9: Συντεταγμένες σημείων μετά την στροφή γύρω από το σημείο 1

Μετά από τους παραπάνω ελέγχους προκύπτει ότι ο συγκεκριμένος τοίχος υπάρχει πιθανότητα να έχει κλίση και μην είναι κατακόρυφος όπως αρχικά θεωρήθηκε. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ακολουθήθηκε μία διαφορετική προσέγγιση. Στην μέχρι τώρα διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος το αντικείμενο μελέτης θεωρείται κατακόρυφο και ως εκ τούτου παράλληλο με το επίπεδο XY του συστήματος (εφόσον

έχουν πραγματοποιηθεί οι στροφές). Σε περίπτωση αντικειμένου που δεν είναι κατακόρυφο αλλά υπάρχει κλίση η παραπάνω διαδικασία δεν είναι σωστή καθώς το επίπεδο του αντικειμένου δεν είναι πλέον παράλληλο με το XY του συστήματος με αποτέλεσμα η τελική εικόνα να απεικονίζεται με παραμόρφωση.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τον εξής τρόπο. Αρχικά επιλέχθηκαν τρία σημεία στο αντικείμενο (κατάλληλα επιλεγμένα ώστε να καλύπτουν όλη επιφάνεια) από τα οποία βρέθηκε το επίπεδο του. Στην συνέχεια υπολογίστηκε το κάθετο διάνυσμα σε αυτό το επίπεδο και η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα με τον άξονα Z. Η γωνία αυτή δείχνει την κλίση του αντικειμένου ως προς την κατακόρυφο. Γνωρίζοντας λοιπόν την κλίση αυτή, πραγματοποιήθηκε μία στροφή γύρω από άξονα που είναι κάθετος ως προς το διάνυσμα και οριζόντιος ως προς το αντικείμενο, ώστε αυτό να κατακορυφωθεί. Η στροφή αυτή είναι διαφορετική από τις συνήθεις στροφές γύρω από τους άξονες XYZ. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται Rodrigues' Rotation Formula (ονομασμένη από τον δημιουργό της, Olinde Rodrigues) και περιγράφει την στροφή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου γύρω από έναν επιλεγμένο άξονα στροφής.

(Σταυροπούλου, 2013, Brannon, 2002, McGlone, 2004).



Εικόνα 4.7: Κεκλιμένο επίπεδο αντικείμενο

Τώρα πλέον το αντικείμενο είναι κατακόρυφο και υλοποιούνται σε αυτό οι στροφές του συστήματος όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Ο αλγόριθμος στην συνέχεια εκτελεί την διαδικασία της αναγωγής κανονικά και προκύπτει η τελική ανηγμένη γεωαναφερμένη εικόνα.

Για τον έλεγχο της καινούριας εικόνας μετρήθηκαν στην εικόνα οι ίδιες αποστάσεις με αυτές της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή οι αποστάσεις μεταξύ των γνωστών φωτοσταθερών 1,2 και 3. Η διαφορά των αποστάσεων αυτών με τις πραγματικές τους αποστάσεις είναι της τάξης των χιλιοστών σε αντίθεση με την πρώτη εφαρμογή που η διαφορά φτάνει τα 2.5cm.

Ωστόσο, ακόμα κι αυτή η στροφή θα μπορούσε να αναλυθεί και να εκφραστεί με 3 στοιχειώδεις στροφές στο χώρο, ο προσδιορισμός όμως των γωνιών είναι αρκετά περίπλοκος. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται Rodrigues' Rotation Formula (ονομασμένη από τον δημιουργό της, Olinde Rodrigues) και περιγράφει την στροφή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου γύρω από έναν επιλεγμένο άξονα στροφής (Brannon, 2002, McGlone, 2004). Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητα το μοναδιαίο διάνυσμα διεύθυνσης $\hat{v}=(v_{1,}v_{2,}v_{3})$ του αυθαίρετου άξονα γύρω από τον οποίο θα στραφεί το αντικείμενο, ένα σημείο επί του άξονα, ώστε να προσδιορίζεται η θέση του, καθώς και η γωνία $\hat{\theta}$ κατά την οποία θα στραφεί το αντικείμενο. Έτσι ο πίνακας στροφής υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

	$\Delta r_{12}(m)$	$\Delta r_{13}(m)$	$\Delta r_{23}(m)$
Εφαρμογή με επίπεδο προβολής παράλληλο του αντικειμένου	-0.00551	-0.0046	-0.0039
Εφαρμογή με επίπεδο προβολής κατακόρυφο	-0.0253	-0.00102	-0.0259

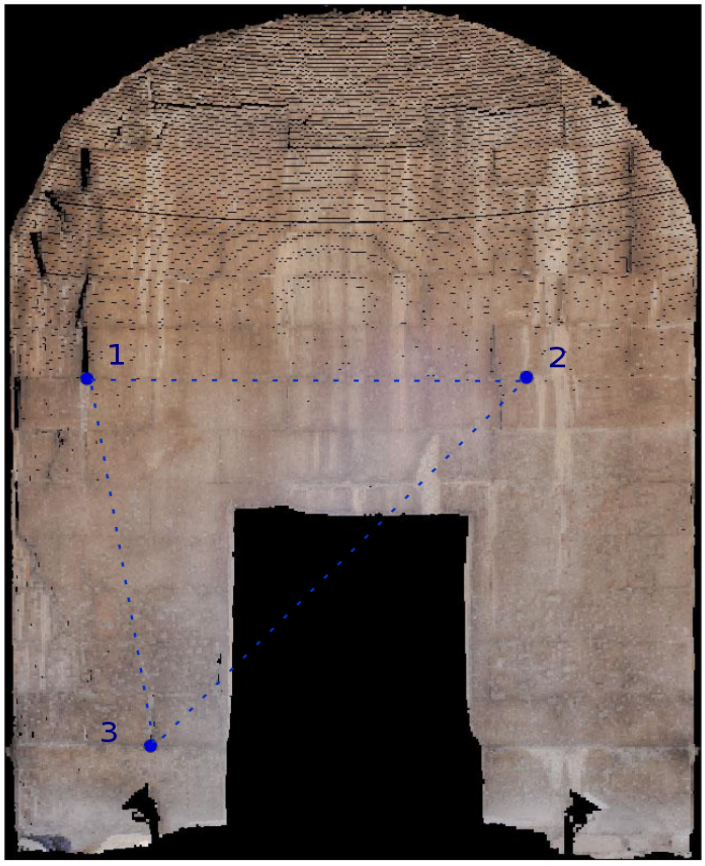
Πίνακας 4.10: Σύγκριση αποστάσεων μεταξύ των δύο ανηγμένων εικόνων

4.5.2.1 Σύγκριση τελικής ανηγμένης εικόνας και ορθοφωτογραφίας

Η ίδια εικόνα που χρησιμοποιήθηκε στην διαδικασία της αναγωγής χρησιμοποιήθηκε επίσης για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας από το λογισμικό που συντάχθηκε στα πλαίσια της διπλωματική εργασίας *"Ανάπτυξη Λογισμικού Παραγωγής Ορθοφωτογραφίας χωρίς την χρήση Γεωδαιτικών Μετρήσεων"* (Σταυροπούλου, 2013). Το επίπεδο προβολής της ορθοφωτογραφίας ορίστηκε από τρία σημεία στο αντικείμενο, όπως φαίνονται στην Εικόνα 6.7. Επομένως το επίπεδο προβολής ορίστηκε παράλληλο με το επίπεδο του αντικειμένου και όχι κατακόρυφο. Η τελική ορθοφωτογραφία και η ανηγμένη εικόνα προέκυψαν με τα ίδια δεδομένα και την ίδια κλίμακα και συγκρίθηκαν μεταξύ τους μετρώντας δύο αποστάσεις. Τα αποτελέσματα (Πίνακας 4.11) έδειξαν διαφορές μερικών χιλιοστών, γεγονός που επιβεβαιώνει την θεώρηση της μη κατακορυφότητας του συγκεκριμένου τοίχου.

	Απόσταση $1^{\eta}(m)$	Απόσταση $2^{\eta}(m)$	Απόσταση $3^{\eta}(m)$
Ανηγμένη εικόνα	3,7000	3,6102	4,8017
Ορθοφωτογραφία	3,6930	3,6082	4,7944
Διαφορά	**0,0075**	**0.0019**	**0,0073**

Πίνακας 4.11: Σύγκριση αποστάσεων Ορθοφωτογραφίας - Ανηγμένης εικόνας



Εικόνα 4.8: Μετρημένες αποστάσεις στην ορθοφωτογραφία

4.5.3 Έλεγχος με δεδομένα από γεωδαιτικές μετρήσεις

Στην δεύτερη εφαρμογή του αλγορίθμου, χρησιμοποιήθηκε μία ψηφιακή εικόνα που απεικονίζει την βόρεια όψη του ναού του Τιμίου Σταυρού στο Πελένδρι της Κύπρου. Η διαφορά με την πρώτη εφαρμογή έγκειται στον τρόπο απόκτησης των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων. Αυτήν την φορά δεν χρησιμοποιείται τρισδιάστατο νέφος σημείων για την εξαγωγή των XYZ συντεταγμένων των σημείων αλλά οι τελευταίες έχουν προέλθει από γεωδαιτικές μετρήσεις με Total Station. Επιπλέον έξι από τα φωτοσταθερά που μετρήθηκαν είναι προσημασμένα με στόχους πάνω στο αντικείμενο καθιστώντας ευκολότερη την σκόπευσή τους στην εικόνα.

Στις Εικόνες 4.9, 4.10 φαίνονται η αρχική εικόνα του αντικειμένου και η τελική ανηγμένη εικόνα.

Εικόνα 4.9: Αρχική εικόνα

Εικόνα 4.10: Τελική ανηγμένη εικόνα

Μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου υπολογίστηκαν οι παράμετροι του προβολικού μετασχηματισμού καθώς και τα εναπομένοντα σφάλματα των xy συντεταγμένων (σε pixel) και των XY γεωδαιτικών συντεταγμένων σε cm .

x (pixel)	*y(pixel)*
0.833	2.0170
-4.026	-2.510
0.462	0.582
4.109	-2.411
-0.607	2.076
-0.778	0.244

Πίνακας 4.12: Υπόλοιπα xy

X (m)	Y(m)
0.00308	-0.007801
-0.0155	0.009789
0.00177	-0.00228
0.0160	0.009172
-0.00230	-0.00794
-0.00299	-0.000932

Πίνακας 4.13: Υπόλοιπα XY

Παρατηρείται ότι τα σημεία 2 και 3 παρουσιάζουν μεγαλύτερα εναπομένοντα σφάλματα από τα τα υπόλοιπα σημεία.
Εκτός από τα 6 προσημασμένα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των παραμέτρων του προβολικού μετασχηματισμού, χρησιμοποιήθηκαν δύο επιπλέον σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά σημεία του αντικειμένου και είναι μετρημένα με reflectorless. Οι αρχικές τους συντεταγμένες αλλά και οι συντεταγμένες τους μετά την στροφή του συστήματος φαίνονται στους Πίνακες 4.14, 4.15

	GCP1	*GCP2*	*GCP3*
1.	91.9533	102.869	102.1908
2.	93.6306	102.0510	104.4076

Πίνακας 4.14: Γεωδαιτικές συντεταγμένες 2 σημείων του αντικειμένου

$GCP1_{\sigma\tau\rho o\phi\acute{\eta}}$	$GCP2_{\sigma\tau\rho o\phi\acute{\eta}}$	$GCP3_{\sigma\tau\rho o\phi\acute{\eta}}$
102.4025	102.1908	-100.342
100.536	104.4076	-100.3162

Πίνακας 4.15: Οι συντεταγμένες XYZ των 2 σημείων μετά την στροφή

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων του προβολικού μετασχηματισμού (Εξ. 4.18). Για να γίνει αυτό μετρούνται οι εικονοσυντεταγμένες (pixel) των δύο αυτών σημείων στην εικόνα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με τις γνωστές γεωδαιτικές τους συντεταγμένες.

$\Delta X\,(m)$	$\Delta Y\,(m)$
0.011697	0.00425
0.00864	-0.00170

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα τα εναπομένοντα σφάλματα κυμαίνονται περίπου από 2 mm μέχρι 1.2 cm.

4.5.3.1 Έλεγχος γεωαναφερμένης εικόνας

Στην γεωαναφερμένη εικόνα που προέκυψε από το λογισμικό μετρήθηκαν 10 αποστάσεις μεταξύ των 6 φωτοσταθερών και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες αποστάσεις στην πραγματικότητα.

Εικόνα 4.11: Έξι φωτοσταθερά μετρημένα με γεωδαιτικές μετρήσεις

Αποστάσεις	*Δr (m)*
1-2	0.0203
1-3	0.0036
1-5	0.0042
1-6	0.0071
2-3	0.0045
2-5	-0.0141
3-5	0.0059
3-6	0.0065
4-5	0.0193
4-6	0.0075
5-6	0.0029

Πίνακας 4.16: Έλεγχος ανηγμένης εικόνας - *Διαφορές μετρημένων αποστάσεων στην εικόνα από τις πραγματικές*

Από τις παραπάνω διαφορές προκύπτει το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα

RMS = 0.008978 m , $RMS = \sqrt{\frac{\sum (\Delta r_i - \overline{\Delta r})^2}{n-1}}$

Οι διαφορές στις αποστάσεις κυμαίνονται από 3 mm έως 2 cm ενώ το RMS σφάλμα προκύπτει 0.009 m δηλαδή κάτω από το όριο του 1.25 cm που ορίστηκε από την κλίμακα του τελικού προϊόντος.

4.5.3.2 Έλεγχος μέσω του Λογισμικού MPT

Το MPT (Matlab Photogrammetric Toolbox) είναι ένα λογισμικό που πραγματοποιεί βασικές φωτογραμμετρικές διαδικασίες. Ανάμεσα στις δυνατότητες που προσφέρει περιλαμβάνεται και η μονοεικονική απόδοση επίπεδων αντικειμένων μέσω φωτογραμμετρικής αναγωγής. Το MPT χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου της αναγωγής που συντάχθηκε στην παρούσα διπλωματική. Καθώς το λογισμικό έχει αναπτυχθεί στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab, χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις που εκτελούν την φωτογραμμετρική αναγωγή για την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο αλγορίθμων. Η υλοποίηση της αναγωγής με τα δύο προγράμματα και με δεδομένα των δύο παραπάνω εφαρμογών, έδειξαν τα ίδια αποτελέσματα. Αρχικά, συγκρίθηκαν οι παράμετροι του προβολικού μετασχηματισμού που προέκυψαν από την κάθε εφαρμογή, όπως επίσης και η αβεβαιότητα υπολογισμού τους και στην συνέχεια μετρήθηκαν χαρακτηριστικές αποστάσεις στις δύο ανηγμένες εικόνες, όπως αυτές προέκυψαν από τα δύο λογισμικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν αμελητέες διαφορές μεταξύ των δύο λογισμικών στις διάφορες τιμές που συγκρίθηκαν, αποδεικνύοντας την ορθότητα της σύνταξης του υλοποιημένου αλγορίθμου (Kalisperakis et al. 2006)

4.6 Αξιολόγηση -Προβλήματα

Στην πρώτη εφαρμογή -ναός Ηφαίστου- χρησιμοποιήθηκαν γεωδαιτικές συντεταγμένες που προέκυψαν από την επιλογή σημείων στο τρισδιάστατο νέφος ενώ στην δεύτερη εφαρμογή -εκκλησία Πελενδρίου- οι συντεταγμένες των σημείων προέκυψαν από γεωδαιτικές μετρήσεις. Στην πρώτη περίπτωση εκτός από το σφάλμα μέτρησης του σαρωτή εισάγεται και το σφάλμα του βήματος σάρωσης του αντικειμένου καθώς επίσης και το σφάλμα της αναγνώρισης των σημείων από τον χρήστη στο 3D νέφος, σφάλματα που δεν εισάγονται στην περίπτωση των γεωδαιτικών μετρήσεων.

Επίσης, η ύπαρξη προσημασμένων στόχων στην εικόνα αυξάνει την ακρίβεια σκόπευσής τους από τον χρήση σε αντίθεση με την σκόπευση χαρακτηριστικών σημείων στο αντικείμενου -χαρακτηριστικές γωνίες, ρωγμές κ.α.- όπως συμβαίνει στην περίπτωση του ναού του Ηφαίστου.

Τα αποτελέσματα των δύο εφαρμογών (με και χωρίς γεωδαιτικές μετρήσεις) είναι ισάξια σε ακρίβεια. Ένα από τα σημαντικότερα σφάλματα που εισάγεται στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται γεωδαιτικές μετρήσεις είναι το σφάλμα επιλογής σημείων από τον χρήστη

είτε πρόκειται για την σκόπευση σημείων στην εικόνα είτε για την επιλογή σημείων στο 3D νέφος. Στην πρώτη εφαρμογή, όπου αφαιρέθηκε από τα αρχικά δεδομένα ένα από τα σημεία που είχε επιλεχθεί λανθασμένα η ακρίβεια υπολογισμού του προβολικού μετασχηματισμού βελτιώθηκε αισθητά και κατά συνέπεια η τελική ακρίβεια της ανηγμένης εικόνας.

Επομένως η επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας του τελικού προϊόντος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των αρχικών δεδομένων εισόδου από τον χρήστη που με την σειρά της απαιτεί την εξοικείωση του χρήστη με την διαδικασία αυτή.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν είναι η επιλογή των σημείων από το τρισδιάστατο νέφος. Η επιλογή που προσφέρει το Matlab για την οπτικοποίηση του νέφους και την εξαγωγή των γεωδαιτικών συντεταγμένων δεν είναι εύκολη στην διαχείρισή της. Γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε το λογισμικό Geomagic το οποίο προσφέρει εύκολη διαχείριση του τρισδιάστατου νέφους και αυτόματη εξαγωγή των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων σε αρχείο κειμένου .txt. Όσο καλύτερη είναι η οπτικοποίηση και η διαχείριση του νέφους τόσο περισσότερο μειώνονται τα σφάλματα επιλογής των σημείων από τον χρήστη. Το μειονέκτημα στην παραπάνω διαδικασία έγκειται στο γεγονός ότι το Geomagic είναι ένα εμπορικό λογισμικό επομένως για την απόκτησή του απαιτείται η αγορά του.

Δεδομένης της ακρίβειας των αρχικών δεδομένων, ο υλοποιούμενος αλγόριθμος μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει περιπτώσεις όπου το αντικείμενο μελέτης δεν είναι κατακόρυφο αλλά υπό κλίση.

5 Συμπεράσματα

5.1 Σχόλια

Οι εφαρμογές του αλγορίθμου σε πραγματικά δεδομένα φανέρωσε τα πλεονεκτήματα αλλά και τις αδυναμίες του.

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι αλγόριθμος εκτελείται μέσω παραθυρικού περιβάλλοντος κάνοντας το λογισμικό φιλικό προς τον χρήστη χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση προγραμματισμού για τον χειρισμό του.

Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου που χρειάζονται για την εκτέλεση του αλγορίθμου αποτελούν εξαρχής ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου. Απαλλάσσοντας τον χρήστη από την αναγκαιότητα των γεωδαιτικών μετρήσεων, που θεωρούνται αναπόσπαστο κομμάτι για την παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων, συμβάλλει στην μείωση του χρόνου αλλά και της δυσκολίας των εργασιών πεδίου.

Η αντικατάσταση των γεωδαιτικών μετρήσεων όμως δεν πρέπει να οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης ακρίβειας. Οι εφαρμογές του αλγορίθμου σε πραγματικά δεδομένα (με και χωρίς γεωδαιτικές μετρήσεις) έδειξαν ότι η επιθυμητή ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας όμως παράλληλα κάποιους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί προσπαθούν να ελαττώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τα σφάλματα που ενέχονται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας και που συμβάλλουν καταλυτικά στην ακρίβεια του τελικού προϊόντος.

Η αντιμετώπιση ιδιαίτερων αντικειμένων και επιφανειών (κίονες) περιορίζουν κατά πολύ την επιλογή κατάλληλων σημείων από τον χρήστη. Η δυσκολία εύρεσης χαρακτηριστικών σημείων παράλληλα στην εικόνα και στο 3D νέφος μειώνει την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων δρώντας καταλυτικά στην ακρίβεια των τελικών προϊόντων. Όσον αφορά στον υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού, η πυκνότητα του νέφους σημείων δεν επηρέασε τόσο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο έδρασε καταλυτικά η ελλιπής κατανομή των σημείων στην επιφάνεια του αντικειμένου.

Ένας από τους περιορισμούς που τίθενται από τον αλγόριθμο που υπολογίζει τον εξωτερικό προσανατολισμό είναι η στροφή του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς σε φωτογραμμετρικό ώστε ο άξονας των Z να είναι σχεδόν παράλληλος με τον άξονα λήψης. Για την στροφή αυτήν είναι αναγκαίο ο χρήστης να καθορίσει, μέσω κατάλληλα επιλεγμένων σημείων, το κύριο επίπεδο του εκάστοτε αντικειμένου. Αμέσως από την διαδικασία απορρίπτονται αντικείμενα με ιδιαίτερη μορφή στα οποία είναι δύσκολος έως αδύνατος ο καθορισμός ενός κύριου επιπέδου (π.χ. Αγάλματα).

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που προκύπτουν από τα παραπάνω προβλήματα, είναι εφικτό να παραχθούν προϊόντα ικανοποιητικής ακρίβειας για την υλοποίηση των φωτογραμμετρικών διαδικασιών. Σημειώνεται ότι οι προδιαγραφές αυτές καθορίζονται κάθε φορά από το προς μελέτη αντικείμενο και τον σκοπό χρήσης των τελικών προϊόντων.

5.2 Προτάσεις για το μέλλον

Το λογισμικό διατίθεται ελεύθερα μαζί με τον κώδικα, δίνοντας την δυνατότητα βελτιστοποίησης του. Παρακάτω παρατίθενται προτάσεις για πιθανές βελτιώσεις.

- Βελτίωση χρόνου εκτέλεσης αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος εκτελεί σε λίγο χρόνο την παραγωγή ορθοφωτογραφίας και αναγωγής. Συγκεκριμένα χρειάζεται 1 έως 3 λεπτά για παραγωγή προϊόντων κλίμακας 1:50 και τρισδιάστατο νέφος 200.000 σημείων. Ωστόσο θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν επιμέρους κομμάτια του κώδικα. Προτείνεται η βελτιστοποίηση του αλγορίθμου της οπισθοτομίας καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων που επιλέγονται από τον χρήστη αυξάνεται και ο χρόνος εκτέλεσής του.

- Δυνατότητα μη καθορισμού του επιπέδου του αντικειμένου

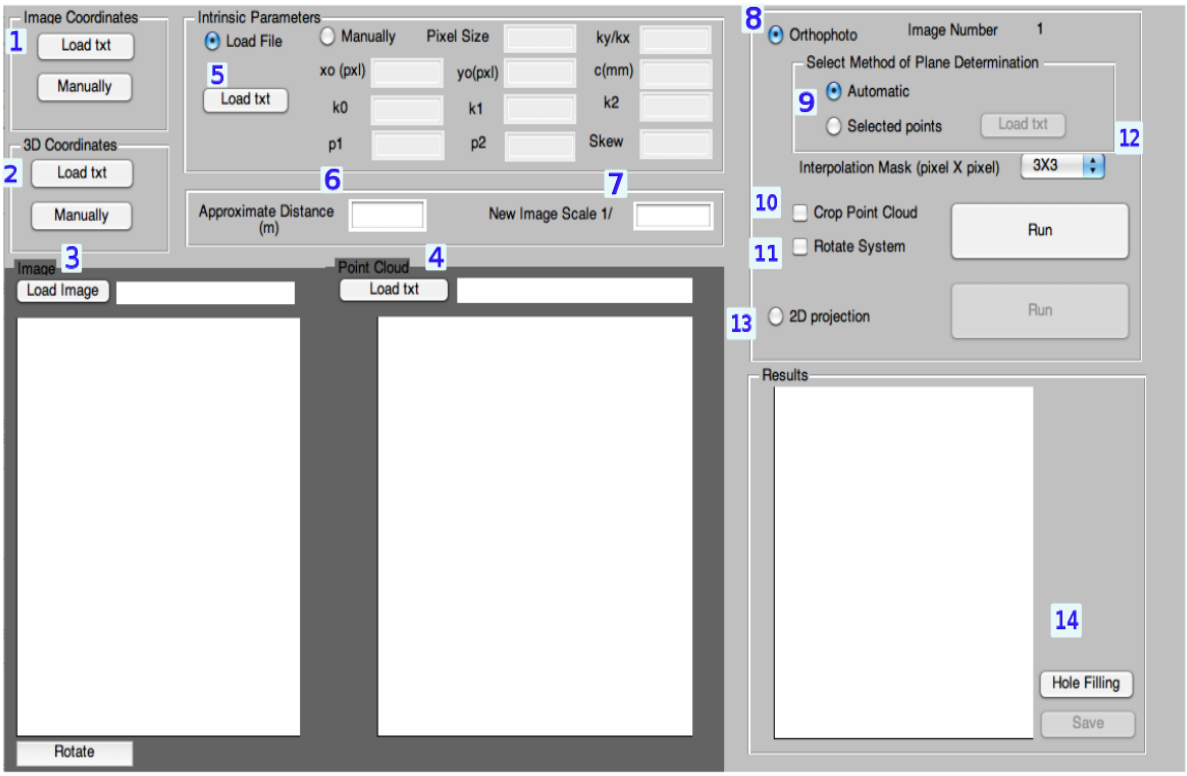
Δεδομένης της αδυναμίας του προγράμματος να εκτελέσει σωστά τι επιμέρους διαδικασίες όταν το σύστημα αναφοράς είναι ένα αυθαίρετο επίγειο σύστημα, προτείνεται η διερεύνηση του προβλήματος ώστε να μην χρειάζεται στροφή του συστήματος αναφοράς, είτε με περαιτέρω βελτίωση των αλγορίθμων είτε με τελείως διαφορετική προσέγγιση, αλγοριθμικά, του προβλήματος.

- Αυτόματος εντοπισμός φωτοσταθερών

Ένα σημαντικό βήμα προς την αυτοματοποίηση της μεθόδου είναι ο αυτόματος εντοπισμός φωτοσταθερών σημείων. Στην περίπτωση στερεοζευγών εικόνων μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες αντικειμένου στον χώρο καθώς και η 3D ανακατασκευή του αντικειμένου (Karras, 2005, Χριστοδούλου 2005)

6 Εγχειρίδιο χρήσης

Η δημιουργία ενός διαδραστικού παραθύρου (interface) προσδίδει σε έναν αλγόριθμο αρκετά πλεονεκτήματα, με βασικότερα την αμεσότητα και την φιλικότητα προς το χρήστη καθώς και την γρήγορη και εύκολη εναλλαγή των στοιχείων εισαγωγής. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, καθώς και της διπλωματικής εργασίας *"Ανάπτυξη Λογισμιού για την Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις"* της Σταυροπούλου Γ. (2013), αναπτύχθηκε ένα κοινό διαδραστικό παράθυρο μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να εισαγάγει τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να πραγματοποιηθούν οι διαδικασίες της ορθοαναγωγής και της δισδιάστατης αναγωγής, βάσει ενός νέφους σημείων και χωρίς γεωδαιτικές μετρήσεις. Το διαδραστικό παράθυρο του αλγόριθμου κατασκευάστηκε σε περιβάλλον Matlab GUI (Graphical User Interface) και έχει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 6.1: Διαδραστικό παράθυρο αλγορίθμου

1. Εισαγωγή συντεταγμένων pixel
2. Εισαγωγή τρισδιάστατων συντεταγμένων
3. Εισαγωγή εικόνας
4. Εισαγωγή τρισδιάστατου νέφους σημείων
5. Εισαγωγή παραμέτρων εσωτερικού προσανατολισμού
6. Εισαγωγή απόστασης λήψης
7. Εισαγωγή κλίμακας
8. Επιλογή ορθοαναγωγής
9. Επιλογή επιπέδου προβολής
10. Επιλογή περιορισμού νέφους
11. Επιλογή στροφής συστήματος
12. Επιλογή μάσκας παρεμβολής στο νέφος
13. Επιλογή φωτογραμμετρικής αναγωγής
14. Παράθυρο αποτελεσμάτων

6.1 Βασικές προϋποθέσεις λειτουργίας

Η συλλογή του νέφους σημείων θα πρέπει να πραγματοποιείται με ένα σαρωτή ακριβείας, με μικρό βήμα και από μικρή σχετικά απόσταση. Είναι επίσης σημαντικό, πριν τη σάρωση του αντικειμένου ο σαρωτής να έχει κατακορυφωθεί, ώστε ο άξονας Z του συστήματος του να θεωρείται παράλληλος με την τοπική κάθετο στο ελλειψοειδές. Η συρραφή νεφών δεν καλύπτεται από τον αλγόριθμο και πρέπει να πραγματοποιείται σε κατάλληλα λογισμικά. Ωστόσο δεν απαιτείται η γεωαναφορά του νέφους, καθώς ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει με το σύστημα αναφοράς του σαρωτή laser. Το νέφος σημείων πριν την εισαγωγή του πρέπει να είναι απαλλαγμένο από θόρυβο, ιδιαίτερα στην περιοχή ανάμεσα στο αντικείμενο και στο σημείο λήψης, ώστε να μην επηρεάζεται η μέθοδος παρεμβολής.

Η πυκνότητα του νέφους είναι άμεσα συνδεδεμένη με την επιθυμητή κλίμακα της τελικής ορθοφωτογραφίας. Για κλίμακα 1:50 το βήμα της σάρωσης θα πρέπει να είναι μικρότερο από 1cm στην απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο Αραιότερο νέφος από αυτό δημιουργεί κενές ψηφίδες στην τελική ορθοφωτογραφία.

Για την σωστή λειτουργία του αλγορίθμου απαιτείται η προσεχτική και ακριβής επιλογή χαρακτηριστικών σημείων από το νέφος, τα οποία να μπορούν να εντοπιστούν με ευκολία και στην εικόνα. Η προσεχτική σκόπευση των εικονοσυντεταγμένων είναι επίσης αρκετά σημαντική ώστε να υπολογιστεί σωστά ο εξωτερικός προσανατολισμός της εικόνας.

Οι προδιαγραφές για την λήψη των εικόνων εξαρτώνται από το επιθυμητό επίπεδο προβολής. Εάν είναι επιθυμητός ο αυτόματος καθορισμός τότε οι εικόνες θα πρέπει να ληφθούν με τέτοιο τρόπο το κύριο επίπεδο του αντικειμένου να είναι παράλληλο με τον άξονα x της (μη στραμμένης) κάμερας. Επίσης η επιλογή καθορισμού του επιπέδου προβολής

από δύο μόνο σημεία είναι καταλληλότερη για κατακόρυφα αντικείμενα. Σε διαφορετική περίπτωση το επίπεδο θα πρέπει να καθορίζεται από 3 σημεία. Ανεξάρτητα από το επίπεδο προβολής η εικόνα δεν θα πρέπει να λαμβάνεται κατακόρυφα επάνω από το αντικείμενο.

Καταλληλότερα αντικείμενα για την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι αντικείμενα με έντονο ανάγλυφο ώστε να είναι δυνατή η εύρεση χαρακτηριστικών σημείων τόσο στην εικόνα όσο και στο νέφος.

6.2 Εισαγωγή Δεδομένων

Η εισαγωγή των δεδομένων δεν απαιτεί κάποια συγκεκριμένη σειρά, ωστόσο για την ορθή απεικόνιση στα βοηθητικά παράθυρα είναι προτιμότερο να εισάγονται πρώτα οι συντεταγμένες 3D και μετά το νέφος σημείων. Τα αρχεία .txt τα οποία εισάγονται στον λογισμικό είναι της μορφής ascii και απαιτούν ως διαχωριστικό δεκαδικών μία τελεία ('.'), ενώ ως διαχωριστικό στηλών ένα κόμμα (','). Οποιαδήποτε αλλαγή στα αρχεία txt απαιτεί την επαναεισαγωγή τους στο πρόγραμμα. Τα ονόματα των αρχείων που εισάγονται θα πρέπει υποχρεωτικά να είναι σε λατινικό αλφάβητο, καθώς το ελληνικό αλφάβητο δεν αναγνωρίζεται.

Για παραγωγή ορθοφωτογραφίας απαιτείται η εισαγωγή της αρχικής εικόνας, των τρισδιάστατων συντεταγμένων, των συντεταγμένων pixel, του νέφους σημείων, των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού και μίας προσεγγιστικής απόστασης από το αντικείμενο. Για την διαδικασία της αναγωγής ως στοιχεία εισαγωγής είναι απαραίτητα μόνο η εικόνα, οι τρισδιάστατες συντεταγμένες και οι συντεταγμένες pixel. Και για τις δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητη η επιθυμητή κλίμακα της νέας εικόνας. Αν κάποιο από τα απαραίτητα στοιχεία δεν έχει εισαχθεί, με το πάτημα του κουμπιού “Run” σε οποιαδήποτε από τις δύο διαδικασίες, εμφανίζεται βοηθητικό μήνυμα που ενημερώνει τον χρήστη για την εισαγωγή των στοιχείων που λείπουν. Επίσης σε περιπτώσεις που από λάθος εισαχθεί διαφορετικός αριθμός συντεταγμένων pixel και τρισδιάστατων συντεταγμένων, η διαδικασία σταματά και ο χρήστης ενημερώνεται ώστε να αλλαχθούν τα δεδομένα κατάλληλα.

6.2.1 Εισαγωγή εικόνας

Η εικόνα εισάγεται στην πρωτογενή της μορφή της, όπως προήλθε από την κάμερα χωρίς να στραφεί ή να αλλαχτεί το format της. Έπειτα, με πάτημα του κουμπιού “Rotate”, η εικόνα στρέφεται κατά 90 μοίρες κάθε φορά, έως ότου έρθει στην ορθή μορφή με την οποία πραγματοποιήθηκε η λήψη και σύμφωνα με την οποία έγινε η επιλογή των σημείων. Αυτό πραγματοποιείται ώστε να υπολογιστεί η ορθή θέση του πρωτεύοντος σημείου σε σχέση με τα αρχικά στοιχεία που δίδονται από την βαθμονόμηση της κάμερας. Το format της εικόνας είναι πολύ σημαντικό να ανταποκρίνεται στις αρχικές προδιαγραφές και τον εσωτερικό προσανατολισμό της κάμερας και να μην έχει μεταβληθεί ο αριθμός των στηλών και των γραμμών. Προσοχή πρέπει να δίδεται επίσης κατά την επιλογή των συντεταγμένων pixel. Η εικόνα πρέπει να στρέφεται και να επαναποθηκεύεται σε κατάλληλα λογισμικά που δεν αλλάζουν το format της.

Εικόνα 6.2: Παράθυρο απεικόνισης εισαγόμενης εικόνας

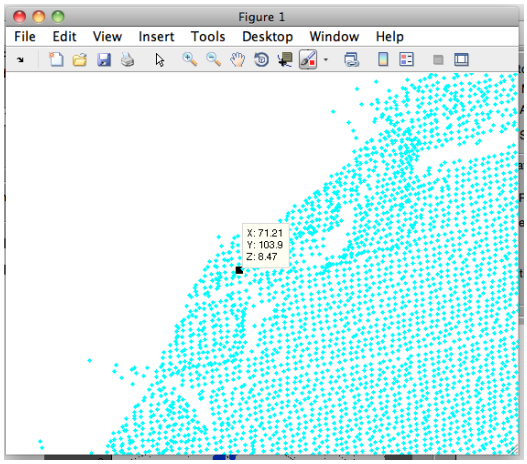
6.2.2 Εισαγωγή συντεταγμένων pixel

Οι συντεταγμένες pixel μπορούν να εισαχθούν με 2 τρόπους στο πρόγραμμα. Ο ένας είναι με απλή εισαγωγή ενός αρχείου txt, με τις προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν, το οποίο θα περιέχει τις συντεταγμένες pixel όπως αυτές μετρήθηκαν πάνω στην εικόνα με αφετηρία την πάνω αριστερά γωνία. Η πρώτη στήλη του πίνακα θα περιέχει τις γραμμές (rows) της εικόνας όπου εμφανίζονται τα σημεία, ενώ η δεύτερη τις στήλες (cols).

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα μέτρησης και εισαγωγής των εικονοσυντεταγμένων μέσω του διαδραστικού παραθύρου, με την επιλογή Manually. Για να λειτουργήσει σωστά αυτή η επιλογή θα πρέπει να έχει ήδη εισαχθεί και στραφεί κατάλληλα η εικόνα. Για την σκόπευση των συντεταγμένων η εικόνα εμφανίζεται σε ξεχωριστό παράθυρο με την παράλληλη εμφάνιση ενός δρομέα. Με ένα αριστερό κλικ του ποντικιού πραγματοποιείται η μεγέθυνση της εικόνας προς την επιθυμητή περιοχή, ενώ με δύο γρήγορα αριστερά κλικ, η εικόνα επανέρχεται στις αρχικές της διαστάσεις. Τα σημεία εισάγονται πατώντας το δεξί κλικ του ποντικιού και σημειώνονται με μία μαύρη κουκκίδα. Σε περίπτωση που πρέπει να καταργηθεί το τελευταίο σημείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εντολή Delete από το πληκτρολόγιο. Μετά το πέρας της διαδικασίας το παράθυρο κλείνει με την εντολή Enter. Οι εικονοσυντεταγμένες έχουν ήδη εισαχθεί στο πρόγραμμα και παράλληλα στον ίδιο φάκελο που βρίσκεται η εικόνα αποθηκεύεται ένα αρχείο με το ίδιο όνομα με την εικόνα την κατάληξη *_xy.txt, ώστε να μην χρειαστεί επανάληψη της διαδικασίας. Χρειάζεται προσοχή, σε περιπτώσεις που επαναλαμβάνεται η διαδικασία για την ίδια εικόνα (στον ίδιο φάκελο), να μετονομάζεται το αρχείο της πρώτης σειράς μετρήσεων, ώστε να μην πραγματοποιηθεί αντικατάσταση.

6.2.3 Εισαγωγή 3D συντεταγμένων

Οι τρισδιάστατες συντεταγμένες, εισάγονται στον αλγόριθμο με ένα αρχείο txt, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν, το οποίο θα περιέχει τρεις στήλες με τις X,Y,Z συντεταγμένες των σημείων αντίστοιχα. Η επιλογή τους από το νέφος δεν καλύπτεται από τον αλγόριθμο έτσι είναι απαραίτητη η σκόπευση να πραγματοποιηθεί εκ των προτέρων σε κατάλληλα λογισμικά όπως το Geomagic. Η επιλογή Manually χρησιμεύει για έλεγχο των συντεταγμένων, καθώς εμφανίζει ολόκληρο το νέφος σε ξεχωριστό παράθυρο και υπάρχει η δυνατότητα σκόπευσης σημείων και απεικόνισης των 3D συντεταγμένων τους. Ωστόσο, οι τιμές αυτές δεν εισάγονται στον αλγόριθμο.Τα δύο πρώτα σημεία που εισάγονται θα πρέπει να καθορίζουν την κλίση του κύριου επιπέδου του αντικειμένου, επομένως θα πρέπει να είναι επιλεγμένα από αριστερά προς τα δεξιά, κοιτάζοντας το αντικείμενο, και να μην σχηματίζουν μία κατακόρυφη ευθεία.

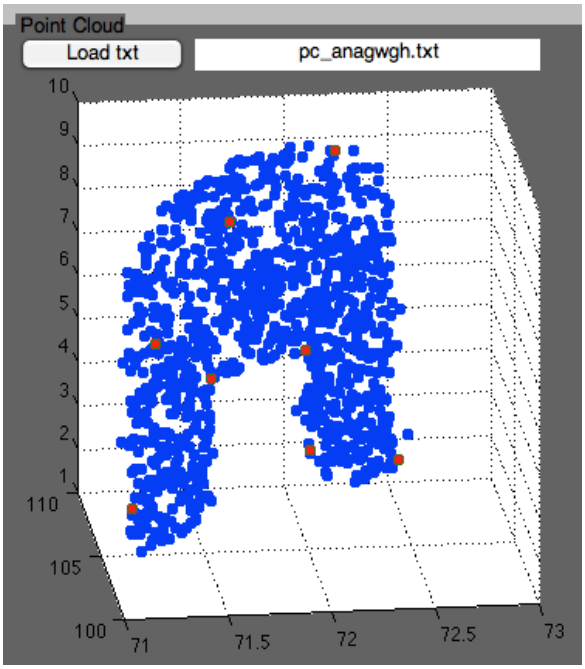


Εικόνα 6.3: Βοηθητικό παράθυρο σκόπευσης στο νέφος.

6.2.4 Εισαγωγή νέφους σημείων

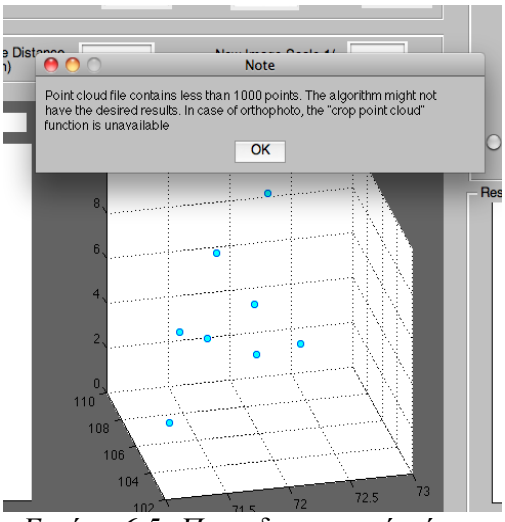
Το νέφος σημείων εισάγεται στο πρόγραμμα σε μορφή txt. Οι συντεταγμένες των σημείων θα πρέπει να σχηματίζουν ένα πίνακα nX3, n είναι ο αριθμός των διαθέσιμων σημείων. Οι τρεις στήλες περιέχουν τις συντεταγμένες X,Y,Z. Ο αλγόριθμος αναγνωρίζει και πίνακα nX4 σε περίπτωση που το αρχικό αρχείο περιέχει αρίθμηση των σημείων. Ωστόσο η αρίθμηση αυτή δεν διατηρείται. Σε περίπτωση που ο πίνακας έχει περισσότερες στήλες από τις απαιτούμενες εμφανίζεται προειδοποιητικό μήνυμα, ενώ δεν εισάγεται ως πληροφορία στο σύστημα. Με την εισαγωγή του νέφους στο σύστημα εμφανίζεται ενδεικτικό κομμάτι του νέφους στο δεύτερο παράθυρο του interface. Κατά την εμφάνιση του νέφους στο ανάλογο παράθυρου του interface, για λόγους ευκολίας και ταχύτητας εμφανίζεται μόνο ένα ενδεικτικό μέρος από τα σημεία του νέφους, αποτελούμενο από 1000 σημεία ικανά να περιγράψουν όλη την επιφάνεια του αντικειμένου. Το μειωμένο νέφος εμφανίζεται με μπλε χρώμα. Σε περίπτωση που οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων έχουν εισαχθεί πριν από το νέφος τότε κατά την εμφάνιση του νέφους εμφανίζονται και αυτές με κόκκινο χρώμα ώστε να εντοπίζεται ενδεικτικά την θέση τους. Σε περίπτωση που το αρχείο των τρισδιάστατων

συντεταγμένων αλλαχθεί τότε για να προβληθούν στο παράθυρο σωστά θα πρέπει να εισαχθεί εκ νέου το νέφος.



Εικόνα 6.4: Απεικόνιση νέφους με περισσότερα από 1000 σημεία. Με κόκκινο εμφανίζονται τα σημεία που επιλέχθηκαν ως φωτοσταθερά

Σε περίπτωση που το αρχείο φέρει λιγότερα από 1000 σημεία, τότε εμφανίζονται όλα στο παράθυρο, ωστόσο εμφανίζεται προειδοποιητικό μήνυμα το οποίο αναφέρει ότι ο αριθμός των σημείων είναι λιγότερα από 1000. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση των συγκεκριμένων νεφών καθώς δεν θα έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η απεικόνιση με γαλάζιο χώμα συμβολίζει ναι μεν την εμφάνιση όλων των σημείων του νέφους, ωστόσο προειδοποιεί ότι είναι πιθανό η πυκνότητα των σημείων να μην επαρκεί.



Εικόνα 6.5: Προειδοποιητικό μήνυμα για νέφος μικρότερο από 1000 σημεία

6.2.5 Εισαγωγή στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού.

Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού μπορούν να εισαχθούν και αυτά με 2 τρόπους. Είτε με την εισαγωγή ενός αρχείου txt, είτε με την επιλογή Manually και την εισαγωγή των τιμών στα κατάλληλα "κουτιά". Και στις 2 περιπτώσεις είναι απαραίτητη η εισαγωγή όλων των στοιχείων. Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν διαθέτει κάποιο από τα στοιχεία τότε εισάγει μηδενικές τιμές. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εισάγεται η σταθερά της κάμερας σε mm καθώς και το μέγεθος του pixel. Στην περίπτωση εισαγωγής με αρχείο txt τα στοιχεία πρέπει να δημιουργούν ένα πίνακα 1X11 με την εξής σειρά:

$$xo(pxl)$$
$$yo(pxl)$$
$$C(mm)$$
$$Μέγεθος\ pixel$$
$$λόγος\ κλιμάκων\ ky/kx$$
$$Pixel\ Skewness$$
$$Συντελεστές\ ακτινικής\ διαστροφής\ k0, k1, k2$$
$$συντελεστές\ εφαπτομενικής\ διαστροφής\ p1, p2.$$

6.3 Λειτουργίες και αποθήκευση

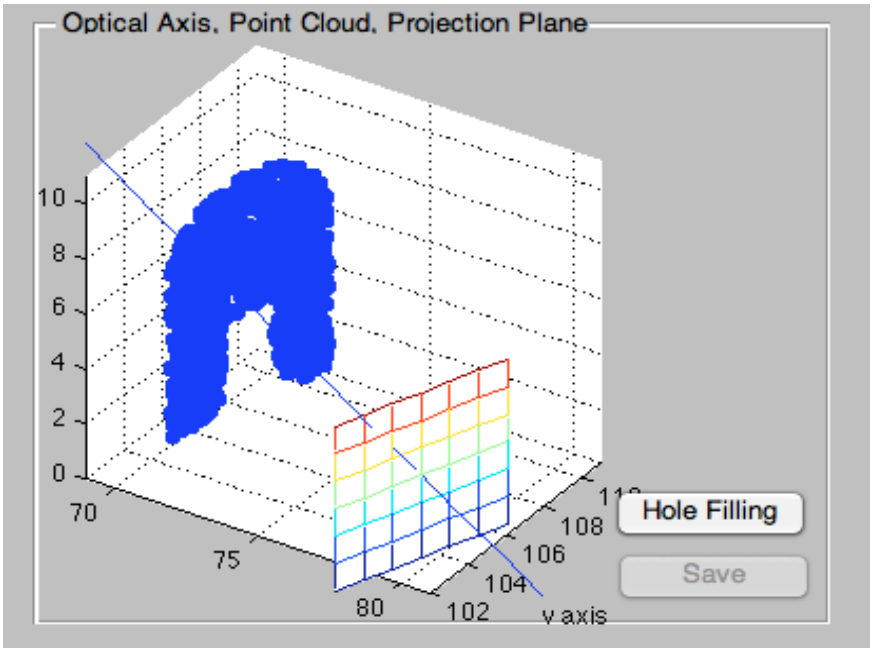
Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στην παραγωγή μίας ορθοφωτογραφίας ή μίας ανηγμένης εικόνας. Εφόσον εισαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα η διαδικασία της αναγωγής μπορεί να ξεκινήσει κατευθείαν με πάτημα του κουμπιού Run. Για την διαδικασία της ορθοφωτογραφίας χρειάζονται μερικές ακόμα διευκρινήσεις από τον χρήστη. Αρχικά πρέπει να επιλεχθεί ο τρόπος καθορισμού του επιπέδου. Με την επιλογή Automatic το επίπεδο καθορίζεται αυτόματα ως το κάθετο στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει τον άξονα λήψης. Εναλλακτικά ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το "Selected points" και να εισαγάγει ένα txt που θα περιέχει 2 ή 3 σημεία επάνω στην κύρια επιφάνεια του αντικειμένου, ώστε να καθορίσει ο ίδιος το επιθυμητό επίπεδο. Με εισαγωγή 2 σημείων το επίπεδο καθορίζεται ως ένα κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει το ευθύγραμμο τμήμα που σχηματίζεται από τα δύο σημεία. Με χρήση 3 σημείων μπορεί να καθοριστεί ένα κεκλιμένο επίπεδο. Καθώς κατά την επιλογή των τρισδιάστατων συντεταγμένων τα δύο πρώτα σημεία έχουν ληφθεί αναγκαστικά επάνω στην κύρια επιφάνεια του αντικειμένου, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, σε νέο αρχείο txt, για τον καθορισμό του επιπέδου, με την προσθήκη ενός ακόμα σημείου στην περίπτωση που είναι επιθυμητό ένα κεκλιμένο επίπεδο.

Έπειτα πρέπει να καθοριστεί το μέγεθος της μάσκας παρεμβολής στο νέφος για τον προσδιορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των κέντρων των εικονοψηφίδων της ορθοφωτογραφίας. Το μέγεθος της μάσκας επηρεάζει άμεσα το τελικό αποτέλεσμα και πρέπει να επιλέγεται βάσει της πυκνότητας του νέφους. Οι επιλογές που έχει ο χρήστης είναι οι μάσκες 3X3, 5X5, και 7X7. Σε περιπτώσεις αραιού νέφους, η επιλογή μεγαλύτερης μάσκας ναι μεν αυξάνει την οπτική ποιότητα της εικόνας αλλά παράλληλα μειώνει την γεωμετρική ακρίβεια, επομένως καλό θα ήταν να αποφεύγεται.

Η επιλογή "Crop point cloud" αναφέρεται στον προσεγγιστικό περιορισμό του νέφους

σημείων και καλό θα ήταν να επιλέγεται σε περιπτώσεις που το νέφος είναι αρκετά μεγαλύτερο από κομμάτι του αντικειμένου που περιλαμβάνεται στην εικόνα. Η επιλογή "Rotate system" αναφέρεται στον τρόπο υπολογισμού του εξωτερικού προσανατολισμού. Δεδομένου ότι ο εξωτερικός προσανατολισμός υπολογίζεται ορθότερα εφόσον έχει στραφεί το τρισδιάστατο σύστημα, το συγκεκριμένο κουτί πρέπει να παραμένει επιλεγμένο.

Εφόσον ξεκινήσει η διαδικασία της παραγωγής της ορθοφωτογραφίας μετά από τον υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού, ο αλγόριθμος σταματά και στο τρίτο παράθυρο του interface εμφανίζεται η γεωμετρία που δημιουργήθηκε βάσει των στοιχείων εισόδου. Συγκεκριμένα εμφανίζονται το ενδεικτικό νέφος 1000 σημείων, το οποίο ενδέχεται να είναι περιορισμένο αν έχει επιλεχθεί το "crop point cloud", ο άξονας λήψης και το προβολικό επίπεδο. Το επίπεδο αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με το επίπεδο της εικόνας και δεν είναι απαραίτητα κάθετο στον άξονα λήψης. Ο χρήστης καλείται, εφόσον ελέγξει την συγκεκριμένη γεωμετρία, να επιλέξει αν θα συνεχίσει ή όχι με την διαδικασία της ορθοαναγωγής.



Εικόνα 6.6: Εμφάνιση γεωμετρίας σε βοηθητικό παράθυρο

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία της αναγωγής ή της ορθοφωτογραφίας τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο τρίτο παράθυρο του interface και παράλληλα ενεργοποιείται η εντολή "Save". Τα αρχεία μπορούν να αποθηκευτούν με οποιοδήποτε όνομα ενώ οι διαθέσιμες μορφές είναι .tif (default) και .jpg. Μαζί με το αρχείο της νέας εικόνας αποθηκεύεται και το αρχείο .tfw που περιέχει την γεωαναφορά της εκάστοτε εικόνας. Σε περίπτωση που επιλεχθεί μορφή αρχείου από .jpg, η κατάληξη του αρχείου γεωαναφοράς θα πρέπει να μεταβάλλεται χειροκίνητα από .twf σε .jpw ώστε να συμβαδίζει με την επιλεγμένη μορφή εικόνας.

Αν το νέφος είναι αραιό και έχει επιλεχθεί μεγάλη κλίμακα τελικού προϊόντος, στην περίπτωση της ορθοφωτογραφίας είναι πιθανό να εμφανίζονται πολλές μαύρες ψηφίδες στη τελική εικόνα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος και την οπτική βελτίωση της εικόνας μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος πλήρωσης κενών με την επιλογή "Hole filling". Η εικόνα

μπορεί να αποθηκευτεί πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου για σύγκριση αποτελεσμάτων.

Μετά το πέρας της διαδικασίας της πρώτης ορθοφωτογραφίας ο χρήστης καλείται να επιλέξει αν η προβολή της επόμενης θα πραγματοποιηθεί στο ίδιο επίπεδο με την πρώτη. Αν επιλέξει την διατήρηση του ίδιου επιπέδου προβολής τότε ο αριθμός “Image number” στην άνω δεξιά γωνία αυξάνεται σε 2, ενημερώνοντας το χρήστη για την επανάληψη της διαδικασίας. Έτσι, εφόσον αποθηκευτεί η νέα εικόνα, μπορούν να εισαχθούν τα στοιχεία για την επόμενη. Βασικός στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η κατασκευή ενός συνολικού φωτομωσαϊκού, το οποίο για να επιτευχθεί χρειάζεται να υπάρχει κοινή γεωαναφορά μεταξύ των εικόνων. Στην περίπτωση της προβολής στο ίδιο επίπεδο, δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται η επιλεγμένη κλίμακα ούτε η μάσκα παρεμβολής, το κουτί “Rotate system” πρέπει να παραμένει επιλεγμένο, ενώ απενεργοποιείται το κουτί καθορισμού του επιπέδου. Ο χρήστης πρέπει να εισαγάγει εκ νέου τις συντεταγμένες pixel και τις τρισδιάστατες συντεταγμένες, καθώς και την επιθυμητή εικόνα. Η επαναεισαγωγή των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού είναι απαραίτητη μόνο σε περίπτωση που οι εικόνες δεν έχουν ληφθεί με την ίδια κάμερα. Το νέφος σημείων μπορεί να μείνει αμετάβλητο, ωστόσο μπορεί εισαχθεί εκ νέου ώστε να προβάλλονται στο αντίστοιχο παράθυρο και οι τρισδιάστατες συντεταγμένες. Αν εισαχθεί νέο νέφος σημείων βασική προϋπόθεση αποτελεί το κοινό σύστημα αναφοράς με την προηγούμενη εισαγωγή. Τέλος η επιλογή “crop point cloud” δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Εφόσον προβληθούν όλες οι επιθυμητές εικόνες στο ίδιο επίπεδο ο αριθμός “Image Number” επανέρχεται στο 1.

6.4 Κατάλογος συνοδευτικών συναρτήσεων

Οι παρακάτω βοηθητικές συναρτήσεις εκτελούν βασικές λειτουργίες ενδιαμέσως του κυρίως κορμού του αλγορίθμου και συνοδεύουν το κυρίως αρχείο. Οι συγκεκριμένες συναρτήσεις αναφέρονται στην τελευταία έκδοση του αλγορίθμου (Ιούνιος 2013) και ενδέχεται αργότερα να μεταποιηθούν:

affine_no_distrortion	Εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού χωρίς αποκατάσταση ακτινικής και ασύμμετρης διαστροφής
affine_transformation	Εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού και αποκατάσταση ακτινικής και ασύμμετρης διαστροφής
angle_calculation	Διερεύνηση γωνίας
axis_margin	Υπολογισμός ορίων αξόνων στο παράθυρο εμφάνισης των δεδομένων
crop_pointcloud	Προσεγγιστικός περιορισμός νέφους σημείων
distortion_inverse_affine	Εφαρμογή Αντίστροφου αφινικού μετασχηματισμού
dlt_initial	Εφαρμογή άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού

georeference	Κατασκευή πινάκων για τα αρχεία twf
hole_fill	Μέθοδος πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων
inverse_affine_coefficients	Υπολογισμός συντελεστών αντίστροφου αφινικού μετασχηματισμού
line_direction	Διερεύνηση διεύθυνσης διανύσματος
plane_3points	Υπολογισμός επιπέδου από 3 σημεία
plane_and_pointcloud	Διερεύνηση σχετικής θέσης νέφους και επιπέδου προβολής
plane_line_intersect	Εύρεση σημείου τομής ευθείας με επίπεδο
plot_geometry	Συνάρτηση για την εμφάνιση της γεωμετρίας του συστήματος
projective2D_coefficients	Υπολογισμός συντελεστών προβολικού μετασχηματισμού
r_matrix	Συνάρτηση υπολογισμού του πίνακα στροφής
resection_eop	Υπολογισμός εξωτερικού προσανατολισμού
rotation_and_translation	Εφαρμογή στροφής και μετάθεσης

Επιπροσθέτως στα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω έτοιμες συναρτήσεις, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην κεντρική σελίδα του Matlab υπό την άδεια **BSD**:

Όνομα	**Δημιουργός - Έτος**	**Χρήση**
AxelRot	Matt Jacobson (2011)	Στροφή με τη μέθοδο Rodrigues
ginput2	Carlos Adrian Vargas Aguilera (2009)	Επιλογή συντεταγμένων pixel
saveascii	Carlos Adrian Vargas Aguilera (2009)	Αποθήκευση αρχείων ascii
clickA3DPoint	Babak Taati (2005)	Στόχευση σημείων σε νέφος

Βιβλιογραφία

Αγατζά-Μπαλοδήμου, Α.Μ. (2007), *Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις Ι,* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αγατζά-Μπαλοδήμου, Α.Μ. (2009), *Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις ΙΙ,* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Brannon, R.M. (2002), *Rotation:A review of useful theorems involving proper orthogonal matrices referenced to three-dimensional physical space,* Computational Physics and Mechanics Sandia National Laboratories Albuquerque

Γεωργίου, Γ. και Ξενοφώντος, Χ. (2007), *Εισαγωγή στη Matlab*, Σπουδαστικές Σημειώσεις, Λευκωσία, Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Deakin, R.E. (2005), ''Linearization using Taylor's theorem and derivation of some common surveying observation equations'', *Notes on Least Squares,* RMIT University.

El-Manadili, Y. and Kurt, N. (1996), ''Precision Rectification of SPOT Imagery Using the Direct Linear Transforamtion Model '', *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 67-72.

Hager, G. ''2D Projective Geometry'', http://www.cs.jhu.edu/~hager/Teaching/cs461/Notes/Lect5-Homography.pdf, [06/2013]

Hartley, R. αnd Zisserman, A. (2006), ''Projective geometry-2D, Multiple View Geometry in Computer Vision, http://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs395t/slides/L3%28ProjGeom%29.pdf, [06/2013]

Kalisperakis, I., Grammatikopoulos, L., Petsa, E. and Karras, G. (2006)'' An open-source educational oftware for basic photogrammetric tasks'', *Proc. International Symposium "Modern Technologies, Education & Professional Practice in Geodesy & Related Fields",* Sofia, pp. 581-586.

Karras, G. (2005), ''Is it realistic to generate control points from a stereo pair?'', *Proc. XX CIPA International Symposium, Torino*, pp. 399-402.

Καρράς, Γ. (1998). *Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στην Φωτογραμμετρία.* Σπουδαστικές σημειώσεις, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Καρράς Γ., Πέτσα Ε. (1998), *Στοιχεία Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας* (Μετάφραση), Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.

Kraus, K. (2003), *Φωτογραμμετρία*. Τόμος 1, Εκδόσεις ΤΕΕ.

Kwon, Y. (1998), ''DLT Method'',http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html#dlt, [accessed 06/2013].

Μακρής, Γ.Ν., (1999). *Σύγχρονες αντιλήψεις και πρακτικές γεωμετρικής τεκμηρίωσης – αποτυπώσεις κειμηλίων, μηνημείων και συνόλων,* Σημειώσεις ΣΑΤΜ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σελ. 144.

McGlone, J. C. et al., (Editors), (2004), Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Μουντράκης, Γ. (1998), *Προσδιορισμός και διόρθωση της ακτινικής διαστροφής υπερευριγώνιων φακών από λήψεις ευθειογενών αντικειμένων,* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μπαριάμη, Γ. (2011), *Γεωμετρική Τεκμηρίωση Ιερού Ναού στο Πελένδρι της Κύπρου με Εφαρμογή Αυτοματοποιημένου Συστήματος Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας.*

Πατιάς, Π. (1991), *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία,* Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

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

Rhody, H. (2005), '' *Geometric Image Transformations*'', Rochester Institute of Technology, Lecture 2, http://www.cis.rit.edu/class/simg782/lectures/lecture_02/lec782_05_02.pdf, [accessed 06/2013]

Σπάρταλης, Μ. Ι. (2007), *Ανάπτυξη Λογισμικού για την Παραγωγή ορθοφωτογραφίας και την Διεξαγωγή Μονοεικονικής Σχεδίασης,* Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, σελ. 35-36.

Σταυροπούλου, Γ. (2013), *Ανάπτυξη Λογισμικού για την Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας χωρίς την χρήση Γεωδαιτικών Μετρήσεων*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Φάκα, Μ. (2011), *Γεωμετρική Τεκμηρίωση Ιερού Ναού στο Πελένδρι, Κύπρος*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Χριστοδούλου, Χ. (2005), *Έλεγχοι για την δυνατότητα δημιουργίας φωτοσταθερών από στερεοζεύγη ερασιτεχνικών μηχανών*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.