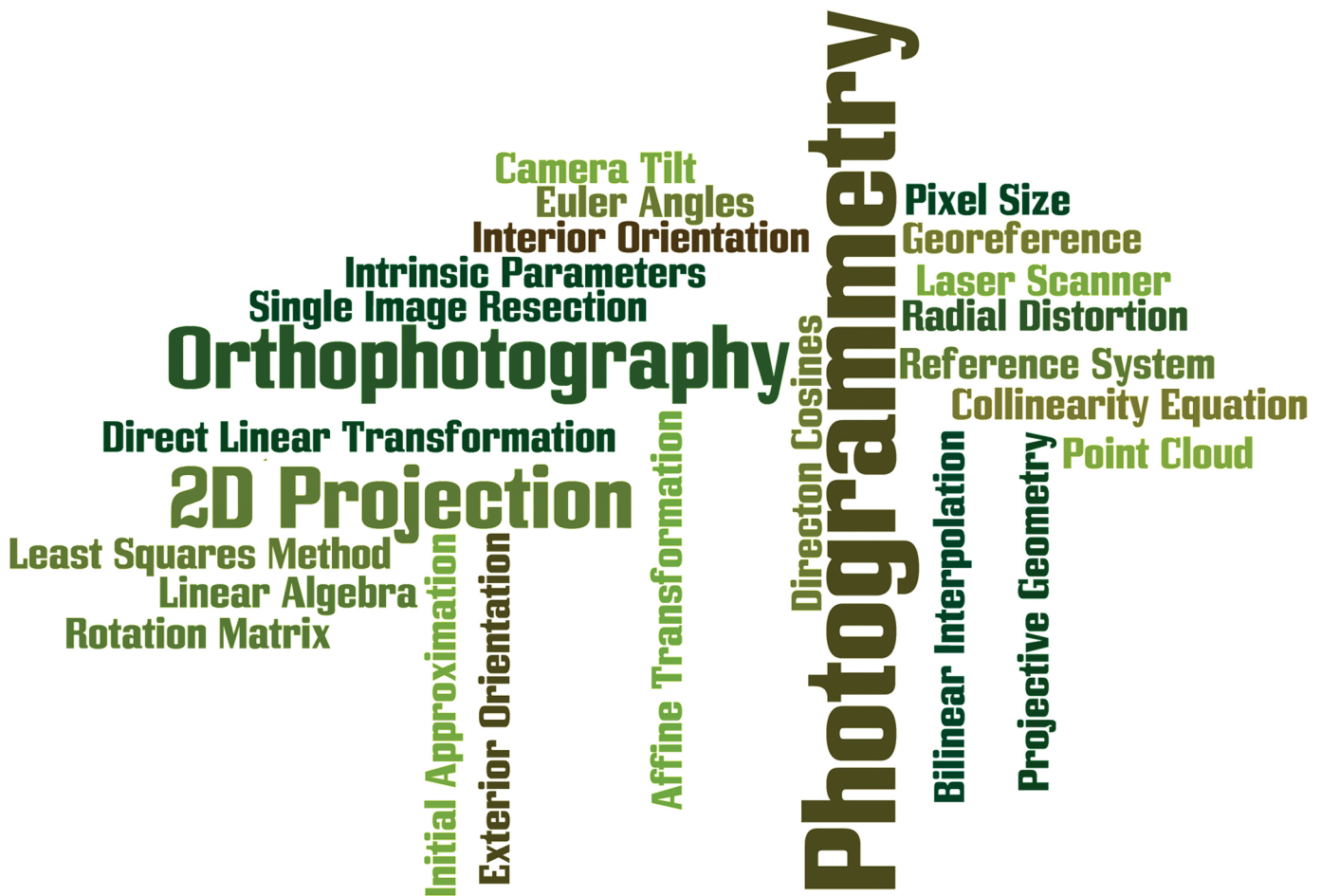


“Ανάπτυξη Λογισμικού για την Παραγωγή
Ορθοφωτογραφίας χωρίς Γεωδαιτικές μετρήσεις”



Διπλωματική Εργασία
Γεωργία Σταυροπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής:
Ανδρέας Γεωργόπουλος

Αθήνα 2013

“...Όρθρος η ώρα η πρώτη. Πίσω της, η λαγαρή πρωία με δείκτες ρόδινους που γρήγορα (θα πω, ανέλπιστα σχεδόν) γυρίζουν και χρυσίζουν. Ένας φακός με απίστευτον φωτοφράκτη αρπάζει την πιο γοργή στιγμή και την απλώνει στην επιφάνεια μιας πλάκας λείας, ευαισθησίας εξαισίας. Και τώρα που άνοιξε και έκλεισε ο φωτοφράκτης σαν μάτι αδέκαστο και συνελήφθη ο χρόνος, ο ρεμβασμός αυξάνει την ζωή και δίδει στην κάθε εικόνα την κίνησι και την ευελιξία που φέρνει από τα βάθη μιας πηγής (της ιδικής του) ζεστό το πιο κρυφό της νόημα...”

Ανδρέας Εμπειρικός
Απόσπασμα από το ποίημα “ Φωτοφράκτης”

Ευχαριστίες

Το κομμάτι των ευχαριστιών αποτελεί για μένα όχι μόνο ένα τρόπο για να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στα άτομα που συνέβαλλαν έμμεσα ή άμεσα στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και μία ευκαιρία για να δώσω μία προσωπική νότα σε ένα κείμενο που αφορά κάτι καθαρά επιστημονικό-τεχνικό. Κάνοντας λοιπόν μία ανασκόπηση όλης αυτής της πορείας, που μου δίδαξε πολλά, δεν θα μπορούσα παρά να θυμηθώ και να ευχαριστήσω τα εξής άτομα.

Αρχικά τον κ. Αντρέα Γεωργόπουλο, που δεν έχασε την υπομονή του και την ψυχραιμία του και που η βοήθεια που μου παρείχε ξεπέρασε μακράν τις προσδοκίες μου και τις υποχρεώσεις του ως υπεύθυνου καθηγητή. Πέρα όμως από το πλαίσιο αυτής της διπλωματικής θα ήθελα να τον ευχαριστήσω γιατί μου απέδειξε, τόσο με λόγια όσο και με πράξεις, πως το επάγγελμα του μηχανικού δεν είναι κάτι το αποστειρωμένο και απόμακρο από την δημιουργία και έτσι με επηρέασε θετικά στις αποφάσεις που είχαν να κάνουν με τις κατευθύνσεις που ακολούθησα.

Το κύριο Γιώργο Καρρά και τον κύριο Χαράλαμπο Ιωαννίδη για τις χρήσιμες συμβουλές τους αλλά και για τα μαθήματα της φωτογραμμετρίας, καθώς οι γνώσεις που μου προσέφεραν αποτέλεσαν τον πυρήνα αυτής της διπλωματικής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τις Σοφία Σοϊλέ και Σεβαστή Ταπεινάκη για την άμεση βοήθεια που μου παρείχαν - ακόμα και την τελευταία στιγμή.

Πέρα όμως από τα άτομα του τομέα της φωτογραμμετρίας θα ήθελα να ευχαριστήσω και άτομα από το κοντινό μου περιβάλλον που συνέβαλλαν -ο καθένας με τον τρόπο του- στο να φέρω εις πέρας αυτήν την εργασία. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν, και που όλη αυτή την περίοδο ανέχονταν τα νεύρα μου. Από τους φίλους μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Νίκο Διαμαντόπουλο για τη λεπτή ειρωνεία και τις προγραμματιστικές συμβουλές καθώς και τον Σταμάτη Γεωργόπουλο για τις οξυδερκείς παρατηρήσεις και τη φιλολογική επιμέλεια. Επίσης τους φίλους μου Ζαχαρία Κανδυλάκη, Χριστίνα Καρακίζη και Δημήτρη Φίλιππα που μου θύμιζαν τις τελευταίες μέρες ότι “υπάρχει ακόμα ζωή εκεί έξω”, αλλά και για την τελική πρόβα.

Τέλος και πάνω απ'όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Γωγώ Τζοβλά, συνεργό μου σε αυτό το εγχείρημα. Όχι μόνο για την άφογη συνεργασία, αλλά και γιατί ξέρει στις δύσκολες στιγμές “να με κλειδώνει στο μπαλκόνι”. Την ευχαριστώ επίσης που υπήρξε φίλη μου όλα αυτά τα υπέροχα χρόνια της φοιτητικής μας ζωής. Άλλωστε χωρίς αυτή δεν θα έπαιρνα ποτέ το πτυχίο μου.

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. Για έλεγχο του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα και συγκεκριμένα στο ναό του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά Αθηνών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην παραγωγή ορθοφωτογραφίας και συγκεκριμένα στις διαδικασίες που επακολουθούν του υπολογισμού του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας. Σε πρώτο στάδιο παρουσιάζεται η αλγοριθμική υλοποίηση των απαιτούμενων βημάτων που οδηγούν σε μία γεωαναφερμένη ορθοφωτογραφία. Συγκεκριμένα αναλύονται η διαδικασίες του καθορισμού του επιπέδου προβολής, της ορθοαναγωγής καθώς και της γεωαναφοράς των τελικών προϊόντων. Σε επόμενο στάδιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου, αναλύονται οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν και γίνεται μία σύντομη αναφορά σε πιθανές βελτιώσεις του αλγορίθμου. Τέλος γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των συμπερασμάτων αυτής της προσπάθειας καθώς και η παρουσίαση των συγκεκριμένων προδιαγραφών που απαιτούνται για την επίτευξη βέλτιστης ακρίβειας μέσω της προτεινόμενης μεθόδου.

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. Additionally, 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. In order to validate both the algorithm and the aforementioned method, data gathered from the Temple of Hephaestus in the Ancient Agora of Athens were used.

This dissertation focuses on the production of the orthophoto and specifically on the procedure following the image resection. Initially we introduce the realization of the necessary steps leading to a georeferenced orthophoto. We specifically explain the procedures of defining the projection surface, of orthophoto generation and of georeferencing the final outcome. Furthermore we include a method of approximately limiting the point cloud. 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.

Κατάλογος περιεχομένων

Εισαγωγή.....	1
1. Νέφη Σημείων στο Χώρο.....	5
1.1. Τρισδιάστατα νέφη σημείων και σαρωτές laser.....	5
1.2. Στροφές και συστήματα αναφοράς.....	7
2. Υλοποίηση Αλγορίθμου.....	15
2.1. Καθορισμός επιπέδου προβολής.....	15
2.1.1. Επιλογή από τον χρήστη.....	19
2.1.2. Αυτόματος καθορισμός.....	21
2.1.3. Προβολή νέφους	23
2.1.4. Περίπτωση κεκλιμένου επιπέδου – Στροφή νέφους.....	25
2.2. Επανασύσταση εικόνας – Δημιουργία Ορθοφωτογραφίας.....	29
2.2.1. Καθορισμός έκτασης – Μέγεθος εδαφοψηφίδας.....	30
2.2.2. Παρεμβολή στο νέφος	34
2.2.3. Αντίστροφη Συνθήκη Συγγραμμικότητας, Αφινικός Μετασχηματισμός και Διορθώσεις Διαστροφών.....	43
2.2.4. Ραδιομετρική Παρεμβολή.....	46
2.3. Γεωαναφορά.....	49
2.4. Περιορισμός νέφους σημείων.....	55
3. Εφαρμογή και αποτελέσματα.....	59
4. Προβλήματα και επεκτάσεις.....	74
4.1. Επιλογή σημείων και εξωτερικός προσανατολισμός εικόνας.....	74
4.2. Σφάλματα μεθόδου παρεμβολής στο νέφος.....	77
4.3. Ανομοιογένεια τόνων.....	79
4.4. Αντιμετώπιση αυξημένου χρόνου λειτουργίας.....	81
5. Συμπεράσματα.....	83
6. Εγχειρίδιο χρήσης.....	86
6.1. Βασικές προϋποθέσεις λειτουργίας.....	87
6.2. Εισαγωγή Δεδομένων.....	88
6.2.1. Εισαγωγή εικόνας.....	89
6.2.2. Εισαγωγή συντεταγμένων pixel.....	90
6.2.3. Εισαγωγή 3D συντεταγμένων.....	91

6.2.4.Εισαγωγή νέφους σημείων.....	92
6.2.5.Εισαγωγή στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού.....	94
6.3.Λειτουργίες και αποθήκευση.....	95
6.4.Κατάλογος συνοδευτικών συναρτήσεων.....	98
Βιβλιογραφία.....	100
Παράρτημα.....	102

Εισαγωγή

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, 1991]. 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, μιας και 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

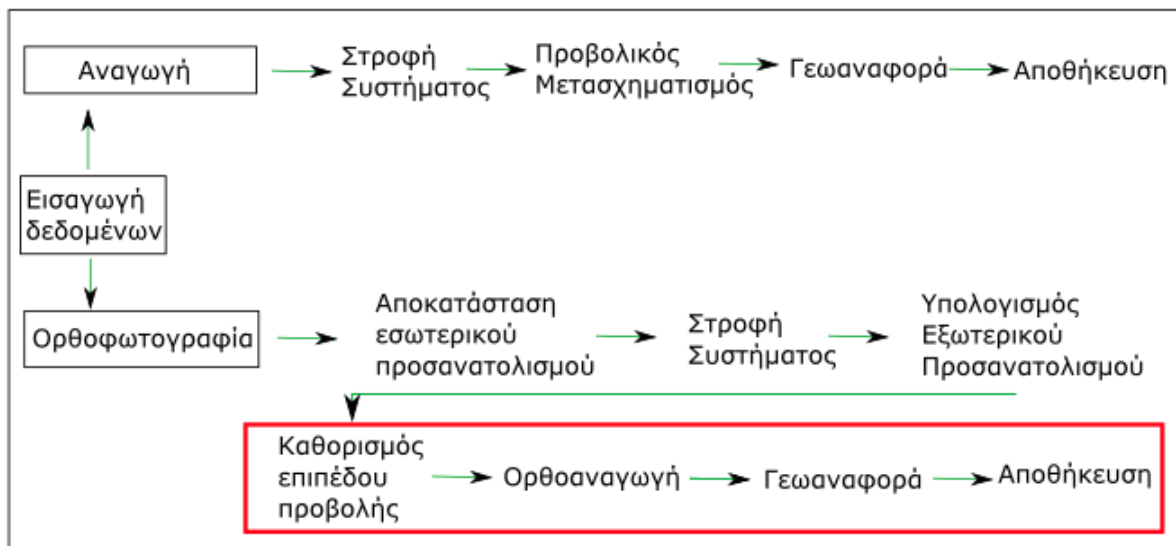
θεωρούνται αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων συμβάλλοντας επιβαρυντικά στον απαιτούμενο χρόνο.

Στο πλαίσιο συνεργασίας με τη Γεωργία Τζοβλά αποφασίστηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα απαλλαγής από γεωδαιτικές μετρήσεις με σκοπό την απλοποίηση των εργασιών υπαίθρου. Με εφιαλτήριο 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 ενδεδεγμένος 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.

Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού έγινε με γνώμονα την ευκολία χειρισμού και

την ήδη υπάρχουσα εξοικείωση, έτσι τόσο ο αλγόριθμος όσο και το διαδραστικό παράθυρο υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab. Το Matlab αποτελεί ουσιαστικά ένα συνδυαστικό λογισμικό πακέτο το οποίο προσφέρει την δυνατότητα αριθμητικών υπολογισμών και οπτικοποίησης δεδομένων αλλά και την δυνατότητα προγραμματισμού στην δική του γλώσσα. Δεδομένου ότι το λογισμικό του Matlab δεν διακινείται δωρεάν, ενδεικτικά αναφέρεται η Octave, η οποία αποτελεί ελεύθερη γλώσσα προγραμματισμού παρεμφερή με αυτή που προσφέρεται στο πακέτο του Matlab. Το Matlab δεν προσφέρει κάποια έτοιμη βιβλιοθήκη λειτουργιών για την διαχείριση νέφους σημείων, ωστόσο, εξειδικεύεται στη διαχείριση και επεξεργασία πινάκων, γεγονός που βοήθησε στην υλοποίηση του αλγορίθμου. Η διάρθρωση του συνολικού αλγορίθμου παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 1: Διάγραμμα διάρθρωσης αλγορίθμου

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο κομμάτι της παραγωγής ορθοφωτογραφίας και συγκεκριμένα στα στάδια που ακολουθούν τον προσδιορισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της εκάστοτε εικόνας. Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται εκτενώς οι αλγοριθμικές διαδικασίες με τις οποίες

πραγματοποιήθηκε ο καθορισμός του επιπέδου προβολής, η ορθοαναγωγή και η γεωαναφορά των εικόνων, και τέλος παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου στο Ναό του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά των Αθηνών. Οι υπόλοιπες διαδικασίες του αλγορίθμου αναπτύσσονται στην διπλωματική εργασία “*Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις*”, της Γ. Τζοβλά [2013].

1. Νέφη Σημείων στο Χώρο

Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης διπλωματικής έγκειται στην διαχείριση ενός νέφους σημείων ως μοντέλο επιφανείας εδάφους. Έτσι θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στους τρόπους παραγωγής τρισδιάστατων νεφών σημείων και μία περιγραφή της γεωμετρίας των συστημάτων αναφοράς και των στροφών που αφορούν στην φωτογραμμετρία.

1.1. Τρισδιάστατα νέφη σημείων και σαρωτές Laser

Ως νέφος σημείων ορίζεται ένα σύνολο διακριτών δεδομένων μέσα σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στους τομείς της στατιστικής και της χωρικής ανάλυσης αλλά και στην αρχιτεκτονική και τις γραφιστικές τέχνες. Τα τρισδιάστατα νέφη σημείων συνήθως χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των εξωτερικών επιφανειών αντικειμένων, με αποτέλεσμα να αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο των φωτογραμμετρικών διαδικασιών, ως ψηφιακά μοντέλα επιφανείας. Η χρησιμότητά τους όμως αυτή, ιδιαίτερα όσον αφορά στην γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων, αυξάνει τις απαιτήσεις σε ακρίβεια και πυκνότητα.

Η παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου επιφανείας μπορεί να γίνει με πολλές μεθόδους. Μία από αυτές είναι με τοπογραφικές μετρήσεις, οι οποίες απαιτούν αρκετό χρόνο στο πεδίο και δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές για την απόκτηση μεγάλου όγκου πληροφορίας. Μία άλλη μέθοδος είναι η φωτογραμμετρική στερεοαπόδοση, δηλαδή η εξαγωγή υψομετρικής πληροφορίας από προσανατολισμένα ζεύγη φωτογραφιών του αντικειμένου. Αυτή η μέθοδος, αν και δεν απαιτεί εκτεταμένη εργασία υπαίθρου, είναι αρκετά χρονοβόρα όσον αφορά την μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Προφανώς καμία από τις δύο μεθόδους δεν είναι κατάλληλη για συλλογή ενός πυκνού ψηφιακού μοντέλου επιφανείας, ιδιαίτερα σε αντικείμενα με έντονο ανάγλυφο. Ωστόσο, έναν καινούργιο δρόμο για την παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων ανοίγει η αυτόματη παραγωγή ψηφιακών μοντέλων επιφανείας με χρήση τεχνικών αυτόματης συνταύτισης εικόνων [Πέτσα & Καρράς, 1998]. Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας είναι το

ελεύθερο λογισμικό 123D Catch, της Autodesk [1]. Το συγκεκριμένο λογισμικό δέχεται ως δεδομένα επικαλυπτόμενες φωτογραφικές λήψεις του επιθυμητού αντικειμένου και, ακολουθώντας διαδικασίες συνταύτισης ψηφιακών εικόνων και αξιοποιώντας τις ιδιότητες των στερεοσκοπικών μοντέλων, παράγει άμεσα ένα έγχρωμο μοντέλο επιφανείας. Η ακρίβεια του προϊόντος, όμως, είναι αμφίβολη και η χρήση του δεν συνίσταται για τις μετρήσεις ακριβείας που απαιτούνται κατά τη γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων.

Η συνηθέστερη μέθοδος γρήγορης παραγωγής νεφών σημείων είναι με ειδικούς σαρωτές, οι οποίοι ανάλογα με το αν απαιτούν ή όχι την επαφή με το αντικείμενο, χωρίζονται σε σαρωτές επαφής και μη επαφής. Οι σαρωτές μη επαφής μπορούν να χωριστούν και αυτοί σε δύο κατηγορίες: σε ενεργητικούς και παθητικούς. Οι ενεργητικοί σαρωτές, για τον προσδιορισμό της επιφάνειας του αντικειμένου, εκπέμπουν κάποιο είδος ακτινοβολίας και καταμετρούν την λαμβανόμενη ανάκλαση, λειτουργώντας παράλληλα ως πομποί και ως δέκτες. Αντίθετα οι παθητικοί σαρωτές, λειτουργούν μόνο ως δέκτες καταμετρώντας ανακλώμενη ακτινοβολία που προέρχεται από το περιβάλλον. Οι γνωστοί σαρωτές laser ανήκουν στους ενεργητικούς σαρωτές και προσδιορίζουν την θέση του αντικειμένου χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LiDAR (Light Detection and Ranging). Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην εκπομπή μίας ακτίνας laser, και στην ανάλυση της ανάκλασης της επάνω στο αντικείμενο. Η παραγωγή του επιθυμητού νέφους σημείων πραγματοποιείται ταχύτατα, μέσω ενός μηχανισμού κατόπτρων που εκτρέπει την ακτίνα κατάλληλα ώστε να σαρωθεί συνολικά το αντικείμενο. Το μέγεθος του παραγόμενου νέφους μπορεί κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες σημείων με συντεταγμένες X, Y, Z στο σύστημα αναφοράς του σαρωτή.

Ο τρόπος καταμέτρησης της ανακλώμενης ακτινοβολίας διαχωρίζει τους σαρωτές laser σε σαρωτές παλμού (Time of Flight) και σαρωτές διαφοράς φάσης (Phase Shift). Η διαφοροποίηση ανάμεσα σε αυτούς τους δύο τύπους σαρωτών έγκειται στο ότι οι πρώτοι πραγματοποιούν μέτρηση διαφοράς χρόνου μεταξύ εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος, ενώ αντίθετα οι δεύτεροι καταμετρούν τη διαφοράς φάσης. Προφανώς οι δύο αυτές μέθοδοι προσδίδουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στα δύο είδη

σαρωτών. Οι σαρωτές παλμού προσφέρουν σχετικά μεγάλη εμβέλεια, ωστόσο είναι αρκετά αργοί. Από την άλλη, οι σαρωτές διαφοράς φάσης είναι ταχύτεροι, έχουν όμως μειωμένη εμβέλεια. Η κυριότερη διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη σαρωτών είναι η ακρίβεια μέτρησης των συντεταγμένων, δεδομένου ότι οι σαρωτές διαφοράς φάσης είναι αρκετά πιο ακριβείς από τους σαρωτές παλμού.

Αν και πλέον οι σαρωτές laser, και ιδιαίτερα οι σαρωτές διαφοράς φάσης, προσφέρουν πολύ καλή ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων, η μέθοδος της σάρωσης έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι επιφάνειες των αντικειμένων είναι συνεχείς, η ακτίνα του σαρωτή σαρώνει το αντικείμενο με ένα συγκεκριμένο βήμα το οποίο εξαρτάται από την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού των σημείων που θα μετρηθούν. Ακόμα και σε περιπτώσεις πολύ πυκνής σάρωσης είναι πιθανό η ακτίνα να προσπεράσει κάποια από τις βασικές ακμές του αντικειμένου, προσδίδοντας ανακρίβεια στον μετέπειτα προσδιορισμό τους κατά την διαχείριση του νέφους. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερα πυκνή σάρωση από κοντινή απόσταση ώστε να μειωθεί το βήμα και κατά συνέπεια να αυξηθεί η αξιοπιστία απόδοσης ακμών.

Είναι σαφές πως η σάρωση του αντικειμένου είναι η βέλτιστη λύση για αντικείμενα με έντονο ανάγλυφο. Ιδιαίτερα όσον αφορά στην γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων, η χρήση σαρωτών laser είναι πλέον αρκετά διαδεδομένη, καθώς παράγουν γρήγορη τρισδιάστατη πληροφορία χωρίς να είναι απαραίτητη η επαφή με το αντικείμενο μελέτης. Ωστόσο για την επίτευξη της βέλτιστης ακρίβειας είναι προτιμότερη η χρήση σαρωτών διαφοράς φάσης.

1.2. Στροφές και συστήματα αναφοράς

Στην επιστήμη της φωτογραμμετρίας ο όρος “σύστημα αναφοράς” μπορεί να αναφέρεται σε τέσσερα κυρίως συστήματα, 2 δισδιάστατα και 2 τρισδιάστατα. Καθώς η συγκεκριμένη επιστήμη ασχολείται με την εξαγωγή μετρητικής πληροφορίας από εικόνες, βασικότερο σύστημα αναφοράς είναι το σύστημα συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου. Πρόκειται για ένα δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων (x,y)

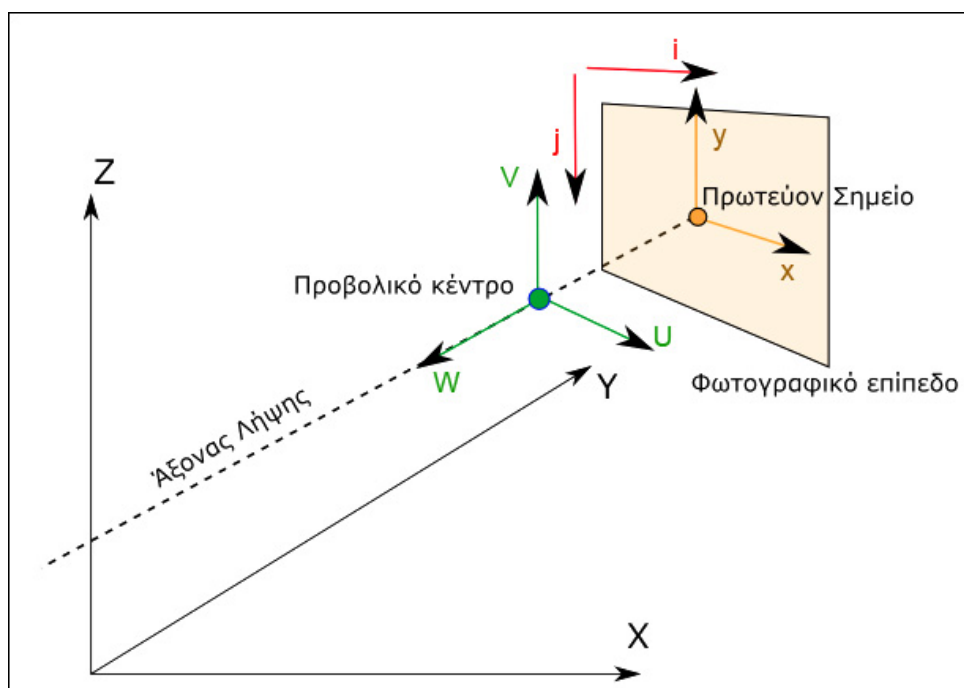
που έχει ως αρχή την προβολή του κέντρου των φακών της φωτομηχανής στο επίπεδο του αρνητικού, γνωστή ως πρωτεύον σημείο (x_0, y_0) . Οι άξονες είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους και οι μονάδες μέτρησης των συντεταγμένων είναι συνήθως σε χιλιοστά (mm) [Πατιάς, 1991].

Για τις διαδικασίες της ψηφιακής φωτογραμμετρίας καθορίζεται ένα ακόμη δισδιάστατο σύστημα, αυτό της ψηφιακής εικόνας. Μια ψηφιακή εικόνα είναι συνήθως αρχείο της μορφής raster και προσφέρει διακριτή και όχι συνεχή πληροφορία όπως οι αναλογικές, δημιουργώντας ουσιαστικά ένα ψηφιδωτό από εικονοστοιχεία (pixel). Τα εικονοστοιχεία, ή εικονοψηφίδες, αποτελούν την μικρότερη υποδιαίρεση (μονάδα) πληροφορίας σε αυτή τη μορφή αρχείων και ο αύξων αριθμός τους μπορεί να προσδιοριστεί ως ένα σύστημα συντεταγμένων με αρχή το κέντρο της άνω αριστερής ψηφίδας της εικόνας ($i = 0, j = 0$). Έτσι, σε αυτό το σύστημα τα κέντρα των εικονοψηφίδων έχουν ακέραιες τιμές.

Το πιο σημαντικό εργαλείο της φωτογραμμετρίας είναι η μηχανή φωτογράφισης, η οποία διαθέτει το δικό της σύστημα αναφοράς. Πρόκειται για ένα τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων U, V, W που έχει ως αρχή το προβολικό κέντρο O των φακών, με τον άξονα W κάθετο προς το φωτογραφικό επίπεδο και τους άξονες U, V παραλλήλους προς τους άξονες x, y του συστήματος συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου [Πατιάς 1991]. Ουσιαστικά ο άξονας W ταυτίζεται με τον άξονα λήψης της κάμερας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την περιγραφή της κίνησης της κάμερας γύρω από το προβολικό κέντρο.

Τέλος 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 τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z με αυθαίρετη αρχή, ενώ ο άξονας Z θεωρείται συνήθως κατακόρυφος [Πατιάς 1991]. Προφανώς αυτό το σύστημα εξαρτάται από την γεωαναφορά των αρχικών δεδομένων. Στη παρούσα διπλωματική εργασία ως τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς αναφέρεται το αυθαίρετο σύστημα στο οποίο γεωαναφέρθηκε το νέφος σημείων.

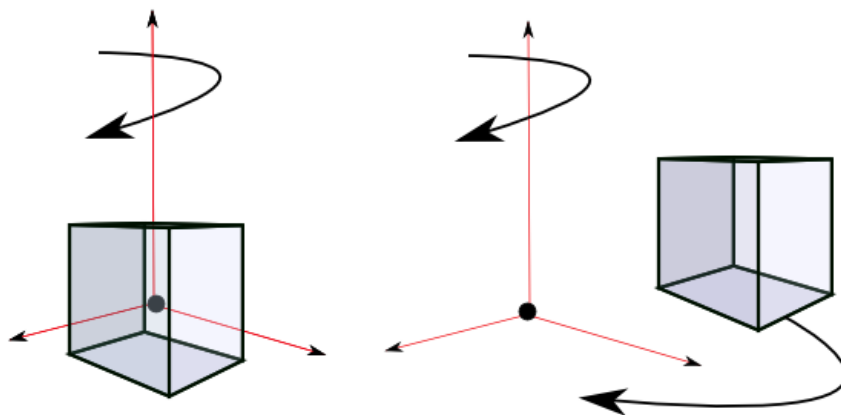
Όπως παρατηρείται και στην παρακάτω εικόνα το δισδιάστατο σύστημα x,y , λόγω της παραλληλίας των αξόνων, αποτελεί την προβολή του συστήματος της κάμερας στο φωτογραφικό επίπεδο. Ουσιαστικά μπορούν να θεωρηθούν ως ένα μόνο σύστημα, με x,y συντεταγμένες στο φωτογραφικό επίπεδο και άξονα z που ταυτίζεται με τον άξονα λήψης. Ωστόσο, προς χάριν κατανόησης, στα επόμενα κεφάλαια διατηρείται ο ξεχωριστός συμβολισμός των δύο συστημάτων.



Εικόνα 1.1: Συστήματα αναφοράς

Καθώς ένα βασικό ζητούμενο της φωτογραμμετρίας είναι ο υπολογισμός της σχετικής θέσης και του σχετικού προσανατολισμού ανάμεσα στα δύο τρισδιάστατα συστήματα, το επίγειο και της φωτομηχανής, θα πρέπει να αναλυθεί τι σημαίνει στροφή στερεού σώματος στο χώρο. Ως “στερεό σώμα” ορίζεται ένα τρισδιάστατο σημειοσύνολο XYZ το οποίο, μετασχηματιζόμενο, δεν μεταβάλλεται κατά σχήμα και μέγεθος [Καρράς, 1998]. Καθορίζοντας ένα σύστημα αναφοράς που έχει αρχή το κέντρο βάρους του στερεού σώματος, ο οποιοσδήποτε προσανατολισμός του μπορεί να περιγραφεί από 3 ακριβώς στροφές γύρω από τους άξονες του συστήματος. Μετακινώντας την αρχή του συστήματος σε άλλο σημείο, εκτός από αλλαγή του προσανατολισμού πραγματοποιείται

και παράλληλη μετάθεση του στερεού. Είναι προφανές ότι για κάθε σημείο ξεχωριστά, δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί προσανατολισμός, καθώς δεν υπάρχει τρίτη διάσταση. Ωστόσο, αν εφαρμοστεί σε αυτό στροφή με κέντρο αξόνων σε ένα διαφορετικό σημείο, αυτό θα επιφέρει μετάθεσή του στο χώρο. Πραγματοποιώντας μία στροφή ενός στερεού με αρχή συστήματος το κέντρο βάρους, τα επιμέρους σημεία που το αποτελούν μετατίθενται, ωστόσο το κέντρο βάρους μένει σταθερό, με αποτέλεσμα να μην θεωρείται ότι επήλθε μετάθεση του σώματος, παρά μόνο μεταβολή του προσανατολισμού. Αντίθετα, με αλλαγή της θέσης της αρχής του συστήματος, το κέντρο βάρους μετακινείται μαζί με τα υπόλοιπα σημεία, μεταβάλλοντας και τη θέση του στερεού στο χώρο.



Εικόνα 1.2: Στροφή στερεού με αρχή αξόνων στο κέντρο βάρους και εκτός κέντρου βάρους

Οι 3 απαραίτητες στροφές είναι γνωστές ως γωνίες Euler και χρησιμοποιούνται είτε για να περιγράψουν τον προσανατολισμό ενός στερεού στο τρισδιάστατο χώρο ή για να περιγράψουν την σχετική θέση δύο συστημάτων αναφοράς. Έτσι στην περίπτωση που στροφές αναφέρονται σε ένα σύστημα με αρχή στο κέντρο βάρους του στερεού περιγράφουν τον προσανατολισμό στην συγκεκριμένη θέση (εσωτερικός προσανατολισμός), ενώ αν αναφέρονται σε διαφορετικό σύστημα περιγράφουν τον σχετικό προσανατολισμό των δύο συστημάτων (εξωτερικός προσανατολισμός). Οι γωνίες

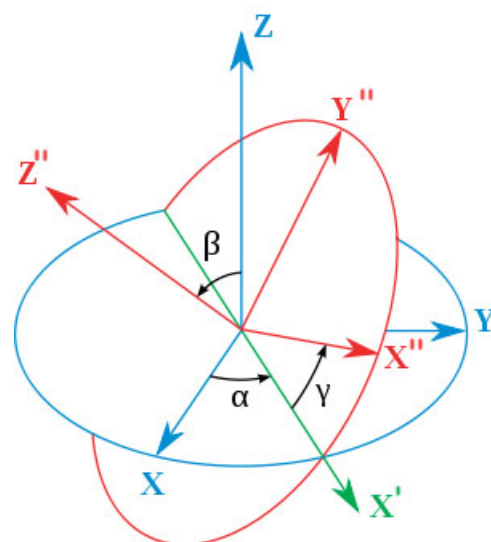
Euler εκφράζουν ουσιαστικά τις στροφές γύρω από τους άξονες του συστήματος, είτε με τη σειρά, γύρω από τον κάθε ένα από αυτούς, είτε με στροφή πρώτα στον ένα , μετά σε έναν άλλο και μετά πάλι γύρω από τον πρώτο, δίνοντας τους παρακάτω πιθανούς συνδυασμούς [Diebel, 2006]:

Cardan ή Tait–Bryan:

(X-Y-Z, Y-Z-X, Z-X-Y, X-Z-Y, Z-Y-X, Y-X-Z).

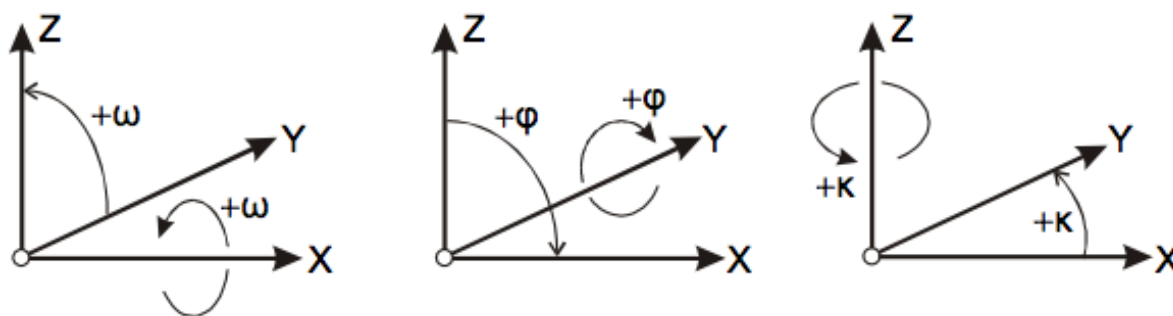
Euler:

(Z-X-Z, X-Y-X, Y-Z-Y, Z-Y-Z, X-Z-X, Y-X-Y)



Εικόνα 1.3: Γωνίες Euler ZXZ

Εφόσον καθοριστεί η σειρά των αξόνων γύρω από τους οποίους πραγματοποιούνται οι στροφές, οι τιμές τους δίνουν ένα και μόνο προσανατολισμό του στερεού, ενώ επίσης, κάθε προσανατολισμός του στερεού μπορεί να περιγραφεί με μόνο μία τριάδα στροφών. Στην φωτογραμμετρία η πιο συνηθισμένη σειρά στροφής ακολουθεί το σύστημα Cardan και είναι: πρώτα η θετική στροφή ω γύρω από τον άξονα X, έπειτα η στροφή ϕ γύρω από τον άξονα Y και τέλος η κ γύρω από τον Z. Η σειρά με την οποία πραγματοποιούνται οι στροφές είναι ιδιαίτερως σημαντική, καθώς δεν έχουν αντιμεταθετική ιδιότητα και μία διαφορετική σειρά σημαίνει ή διαφορετικό προσανατολισμό του συστήματος ή διαφορετικές τιμές των γωνιών. Έτσι, αν έχει προηγηθεί μία στροφή ω , μια επόμενη στροφή ϕ θα πραγματοποιηθεί γύρω από τον στραμμένο άξονα Y' και όχι τον αρχικό Y.



Εικόνα 1.4: Η σειρά στροφών, όπως ορίζεται στην φωτογραμμετρία. Κάθε μία επακολουθεί της προηγούμενης. [Πηγή: Πέτσα, 2000]

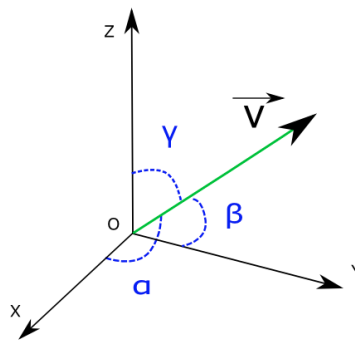
Οι στροφές ω, ϕ, κ χρησιμοποιούνται στην φωτογραμμετρία για να εκφράσουν τον προσανατολισμό του συστήματος UVW της φωτομηχανής ως προς το σύστημα αναφοράς XYZ του χώρου τη στιγμή που έγινε η λήψη, δηλαδή για να εκφράσουν τον εξωτερικό προσανατολισμό της λήψης. Κάθε μία από τις στροφές ω, ϕ, κ αποτελεί ουσιαστικά μία στροφή στα YZ, XZ και XY επίπεδα αντίστοιχα, δημιουργώντας τους παρακάτω στοιχειώδεις πίνακες στροφής:

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} R_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για την συγκεκριμένη σειρά στροφών X-Y-Z, προκύπτει ο παρακάτω γενικός πίνακας στροφής, μετά από συνδυασμό των στοιχειωδών πινάκων:

$$R_{\omega\phi\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \sin\kappa + \sin\omega \cdot \sin\phi \cdot \cos\kappa & \sin\omega \cdot \sin\kappa - \cos\omega \cdot \sin\phi \cdot \cos\kappa \\ -\cos\phi \cdot \sin\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa - \sin\omega \cdot \sin\phi \cdot \sin\kappa & \sin\omega \cdot \cos\kappa + \cos\omega \cdot \sin\phi \cdot \sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega \cdot \cos\phi & \cos\omega \cdot \cos\phi \end{bmatrix}$$

Σε αυτό το σημείο θα ήταν σκόπιμο να δοθούν οι ορισμοί των συνημιτόνων και των γωνιών διεύθυνσης. Έστω διάνυσμα $\hat{v}=(a, b, c)$ και α, β, γ οι γωνίες που σχηματίζει με τους θετικούς ημιάξονες OX, OY, OZ του συστήματος αναφοράς αντίστοιχα. Αυτές οι γωνίες ονομάζονται γωνίες διεύθυνσης του \hat{v} , και οι αριθμοί $\cos(\alpha)$, $\cos(\beta)$ και $\cos(\gamma)$ ονομάζονται συνημίτονα διεύθυνσης (direction cosines) του \hat{v} . Αντίθετα διανύσματα έχουν ίδια συνημίτονα διεύθυνσης και παραπληρωματικές γωνίες διεύθυνσης [Deakin, 2005], [Γκαρούτσος, 2008].



Εικόνα 1.5: Γωνίες Διεύθυνσης

Τα συνημίτονα αυτά έχουν την ιδιότητα ότι το άθροισμα των τετραγώνων τους ισούται με 1 ($\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$) και δίνονται από τους τύπους:

$$l = \cos \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

$$m = \cos \beta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

$$n = \cos \gamma = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

Μία σημαντική ιδιότητα των στοιχείων του πίνακα στροφής R ισοδυναμούν με τα συνημίτονα διεύθυνσης των αξόνων UVW του συστήματος της κάμερας σε σχέση με τους άξονες XYZ του τρισδιάστατου συστήματος του χώρου. [Μπαντέκας, 1980] Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των γωνιών διεύθυνσης που σχηματίζονται ανάμεσα στους άξονες των δύο συστημάτων:

$$R_{\omega\phi\kappa} = \begin{bmatrix} \cos(a_{UX}) & \cos(a_{UY}) & \cos(a_{UZ}) \\ \cos(a_{VX}) & \cos(a_{VY}) & \cos(a_{VZ}) \\ \cos(a_{WX}) & \cos(a_{WY}) & \cos(a_{WZ}) \end{bmatrix}$$

Λόγω των ιδιοτήτων των συνημιτόνων διεύθυνσης το άθροισμα των τετραγώνων των στοιχείων κάθε γραμμής και στήλης του πίνακα R ισούται με την μονάδα:

$$\begin{array}{ll} r_{1,1}^2 + r_{1,2}^2 + r_{1,3}^2 = 1 & r_{1,1}^2 + r_{2,1}^2 + r_{3,1}^2 = 1 \\ r_{2,1}^2 + r_{2,2}^2 + r_{2,3}^2 = 1 & r_{1,2}^2 + r_{2,2}^2 + r_{3,2}^2 = 1 \\ r_{3,1}^2 + r_{3,2}^2 + r_{3,3}^2 = 1 & r_{1,3}^2 + r_{2,3}^2 + r_{3,3}^2 = 1 \end{array}$$

Ο πίνακας R που δημιουργείται από τις γωνίες ω, ϕ, κ εκφράζει τις απαιτούμενες στροφές που πρέπει να υποστεί το επίγειο σύστημα αναφοράς ώστε να παραλληλιστεί με το σύστημα της μηχανής. Για την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή για την στροφή του συστήματος της κάμερας, και συνεπώς της εικόνας, ως προς το επίγειο σύστημα χρησιμοποιείται ο αντίστροφος πίνακας R^T . [Καρράς, 1998]

2. Υλοποίηση Αλγορίθμου

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μία προσπάθεια κατασκευής ενός αλγορίθμου για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών χωρίς γεωδαιτικές μετρήσεις, με μοναδικά στοιχεία εισόδου μία εικόνα, ένα νέφος σημείων και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί προέκταση και συμπλήρωση του αλγορίθμου για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας, που αναπτύσσεται στην διπλωματική εργασία “*Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις*”, της Γ. Τζοβλά [2013]. Συγκεκριμένα έχουν προηγηθεί οι διαδικασίες αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού και υπολογισμού του εξωτερικού προσανατολισμού. Ο εξωτερικός προσανατολισμός κάθε εικόνας υπολογίζεται μονοεικονικά με την διαδικασία της οπισθοτομίας ενώ οι απαιτούμενες προσωρινές τιμές υπολογίζονται με εφαρμογή του άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού. Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται τα υπόλοιπα στάδια παραγωγής της ορθοφωτογραφίας, τα οποία περιλαμβάνουν τις διαδικασίες του καθορισμού του επιπέδου προβολής, της επανασύστασης της εικόνας καθώς και της γεωαναφοράς των τελικών ορθοφωτογραφιών.

2.1. Καθορισμός επιπέδου προβολής

Η διαδικασία δημιουργίας μίας ορθοφωτογραφίας αποτελεί την μετάβαση από την κεντρική προβολή μίας εικόνας σε μία νέα εικόνα όπου τα αντικείμενα προβάλλονται στις ορθές τους θέσεις, διορθωμένα από τις εκτροπές του αναγλύφου και τις παραμορφώσεις λόγω του φακού της κάμερας. Συνήθως η προβολή της ορθοφωτογραφίας γίνεται σε επίπεδο παράλληλο με το κύριο επίπεδο (δλδ την μεγαλύτερη επίπεδη επιφάνεια) του προς αποτύπωση αντικειμένου. Η σύμβαση αυτή βασίζεται στο ότι οι τελικές ορθοφωτογραφίες θα πρέπει να προσφέρουν και μετρητική πληροφορία, δηλαδή οι διαστάσεις του αντικειμένου να μπορούν να αναχθούν στις πραγματικές με χρήση της κλίμακας της εικόνας. Στις εναέριες λήψεις το επιθυμητό επίπεδο προβολής προσδιορίζεται εύκολα ως το παράλληλο προς το XY επίπεδο του

τριδιάστατου συστήματος αναφοράς, δηλαδή ένα οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, για επίγειες εφαρμογές δεν μπορεί να θεωρηθεί ένα και μόνο επίπεδο κατάλληλο, καθώς ο καθορισμός του εξαρτάται από το σχήμα και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου αλλά και από το ποιο είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ως συνέπεια, κάθε ειδική περίπτωση απαιτεί και ένα διαφορετικό επίπεδο προβολής, δυσχεραίνοντας τη δημιουργία μίας γενικευμένης και αυτοματοποιημένης μεθόδου καθορισμού.

Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, ο καθορισμός του επιπέδου έπεται της διαδικασίας της οπισθοτομίας και δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε δύο μεθόδους, μία αυτοματοποιημένη και μία μη αυτοματοποιημένη. Η πρώτη μέθοδος εξαρτάται από τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού που προέκυψαν από την οπισθοτομία, ενώ ορίζει ως επίπεδο προβολής το κάθετο στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει τον άξονα λήψης. Αντίθετα η δεύτερη μέθοδος απαιτεί από τον χρήστη την επιλογή σημείων από το νέφος για τον καθορισμό του επιπέδου και είναι ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό της εικόνας.

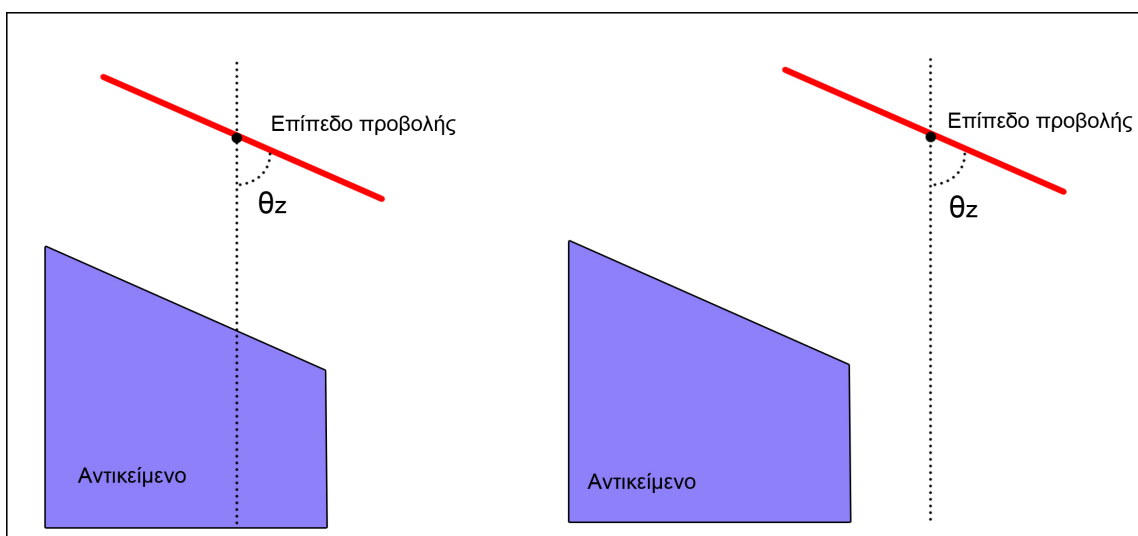
Για την αυτοματοποιημένη μέθοδο, το συγκεκριμένο επίπεδο προβολής επιλέχθηκε με κριτήριο την βέλτιστη αξιοποίηση της πληροφορίας της αρχικής εικόνας αλλά και την ευκολία καθορισμού, λόγω της εξάρτησής του από τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού που το συνδέουν με την αρχική εικόνα. Η κατακορυφότητά του θεωρήθηκε προτιμότερη λόγω του ότι η πλειονότητα των ορθοφωτογραφιών στις επίγειες εφαρμογές προβάλλονται σε κατακόρυφα επίπεδα. Λόγω, όμως, της συγκεκριμένης γεωμετρίας, δημιουργούνται αρκετοί περιορισμοί στην επιλογή των σημείων λήψης των φωτογραφιών. Έτσι για την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, οι λήψεις και η κύρια επιφάνεια του αντικειμένου θα πρέπει να είναι περίπου παράλληλες κατά την οριζόντια διεύθυνση, ανεξαρτήτως της γωνίας ω γύρω από τον άξονα U του συστήματος της κάμερας. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η αυτοματοποιημένη μέθοδος εφαρμόζεται καλύτερα σε κατακόρυφα αντικείμενα, όπως όψεις κτιρίων, ωστόσο έχει το πλεονέκτημα της μεταβλητότητας της γωνίας ω της κάμερας αν το ύψος του αντικειμένου το απαιτεί. Επίσης, σε περιπτώσεις που οι λήψεις έχουν πραγματοποιηθεί ήδη και δεν έχουν την επιθυμητή παραλληλία με το αντικείμενο

είναι προτιμότερη η μη αυτοματοποιημένη μέθοδος.

Εκτός από συγκεκριμένες προδιαγραφές λήψης, ένα ακόμη πρόβλημα της αυτοματοποιημένης μεθόδου είναι ότι οι ορθοφωτογραφίες από διαφορετικές λήψεις δεν μπορούν να συνδυαστούν άμεσα σε ένα ενιαίο φωτομωσαϊκό, καθώς έχουν δημιουργηθεί σε διαφορετικά επίπεδα προβολής. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε διατηρώντας για όλες τις επόμενες φωτογραφίες του ίδιου αντικειμένου το ίδιο επίπεδο προβολής που προσδιορίστηκε για την πρώτη ορθοφωτογραφία. Έτσι δίνεται στο χρήστη η επιλογή μετά το τέλος της διαδικασίας κάθε ορθοφωτογραφίας να επιλέξει αν θα συνεχίσει με προβολή της επόμενης στο επίπεδο της πρώτης. Συγκεκριμένα τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της πρώτης ορθοφωτογραφίας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του επιπέδου προβολής και έπειτα χρησιμοποιούνται σε κάθε επόμενη εικόνα για την προβολή των σημείων του νέφους πάνω στο επίπεδο. Αντίθετα, για τον υπολογισμό των εικονοσυντεταγμένων με την χρήση της αντίστροφης συνθήκης συγγραμμικότητας χρησιμοποιούνται κάθε φορά τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε ξεχωριστής λήψης. Ως αρχική εικόνα είναι προτιμότερο να επιλέγεται εκείνη που είναι όσο το δυνατόν πιο παράλληλη με την κύρια επιφάνεια του αντικειμένου.

Η μη αυτοματοποιημένη μέθοδος, αν και δίνει λύση στα παραπάνω προβλήματα και διευκολύνει τον χρήστη στο να καθορίσει ελεύθερα το επίπεδο προβολής, απαιτεί μία επιπλέον επιλογή σημείων από το νέφος, η οποία είναι αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Επίσης, σε περιπτώσεις εξαιρετικά έντονου και περίπλοκου αναγλύφου, η επιλογή των σημείων γίνεται αρκετά δύσκολη καθώς δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός ενός κύριου επιπέδου. Το προτέρημα όμως αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν προϋποθέτει συγκεκριμένες προδιαγραφές λήψης των φωτογραφιών, καθώς είναι ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό της εικόνας. Πιο συγκεκριμένα είναι ανεξάρτητη από τις στροφές της κάμερας, ωστόσο για τον καθορισμό της θέσης του στο χώρο χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου, ώστε να μην συμπίπτει με το νέφος. Ο χρήστης μπορεί επομένως να επιλέξει κάθε φορά το επίπεδο ανάλογα με τις ανάγκες του αντικειμένου.

Εξαιτίας του τρόπου που έχει κατασκευαστεί ο αλγόριθμος, εισάγεται ένας περιορισμός στην λήψη των φωτογραφιών, ο οποίος αφορά σε όλες τις μεθόδους καθορισμού που προαναφέρθηκαν. Για την σωστή λειτουργία του αλγορίθμου, το επίπεδο προβολής δεν πρέπει τέμνει το νέφος σημείων αλλά να βρίσκεται σε κάποια απόσταση από αυτό. Επειδή όμως η θέση του επιπέδου προβολής στο χώρο καθορίζεται από τις συντεταγμένες του προβολικού κέντρου, ο περιορισμός αυτός αφορά άμεσα στη θέση της κάμερας κατά την λήψη. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, η κατακόρυφη ευθεία που περνά από το προβολικό κέντρο θα πρέπει να μην τέμνει το αντικείμενο. Ακόμα και στην περίπτωση που το επίπεδο καθορίζεται από 3 σημεία της επιλογής του χρήστη, πάλι δεν καλύπτεται αυτή η περίπτωση, καθώς το επίπεδο μπορεί να μην τέμνει το αντικείμενο άμεσα αλλά η μετέπειτα στροφή κατά $\hat{\theta}$ του προβεβλημένου νέφους να δημιουργεί το ίδιο πρόβλημα.



Εικόνα 2.1: Σχήμα 1: Λάθος σημείο λήψης, Σχήμα 2: Σωστό σημείο λήψης

Εξαιτίας αυτού του περιορισμού, ο αλγόριθμος δεν καλύπτει περιπτώσεις όπου οι λήψεις έχουν γίνει κατακόρυφα πάνω από το αντικείμενο, καθιστώντας την εφαρμογή δύσχρηστη για εναέριες λήψεις.

2.1.1. Επιλογή από τον χρήστη

Εφόσον ο χρήστης επιλέξει να προχωρήσει στον καθορισμό του επιπέδου με την μη αυτοματοποιημένη μέθοδο, καλείται να εισαγάγει στο πρόγραμμα τις τρισδιάστατες συντεταγμένες μερικών σημείων από το νέφος τα οποία θα ανήκουν στο κύριο επίπεδο του αντικειμένου. Ανάλογα με τον αριθμό των σημείων που θα εισαχθεί διαφοροποιείται και ο τρόπος καθορισμού στον αλγόριθμο. Έτσι ο χρήστης είναι απαραίτητο να γνωρίζει εξ αρχής ποιο είναι το αποτέλεσμα που επιθυμεί ώστε να επιλέξει τα σημεία με ορθό τρόπο.

Όπως είναι γνωστό, ένα επίπεδο καθορίζεται από τουλάχιστον 3 σημεία. Ωστόσο, με την επιλογή μονάχα 2 σημείων από το νέφος, ο χρήστης μπορεί να καθορίζει μία ευθεία στο χώρο, η προβολή της οποίας στο επίπεδο XY ισοδυναμεί με το ίχνος ενός κατακόρυφου επιπέδου. Έτσι ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα κατακόρυφο επίπεδο το οποίο περιέχει την ευθεία που καθορίζεται από τα 2 σημεία. Τα σημεία αυτά είναι απαραίτητο να βρίσκονται πάνω στην κύρια επιφάνεια του αντικειμένου της οποίας είναι επιθυμητή η προβολή. Η υψομετρική τους διαφορά δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα καθώς χρησιμοποιείται η προβολή της ευθείας, η οποία είναι απαλλαγμένη από την τρίτη διάσταση. Ωστόσο θα πρέπει τα δύο σημεία να μην έχουν κοινές X και Y συντεταγμένες, να μην δημιουργούν δηλαδή μία κατακόρυφη ευθεία, καθώς αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα η προβολή της να είναι μονάχα ένα σημείο χωρίς καμία πληροφορία διεύθυνσης.

Έστω τα σημεία $P1(X1,Y1,Z1)$ και $P2(X2,Y2,Z2)$. Τότε το διάνυσμα διεύθυνσης της ευθείας που δημιουργούν θα είναι:

$$\hat{r}=(a,b,c)=(X_2-X_1,Y_2-Y_1,Z_2-Z_1)$$

Η εξίσωση του επιπέδου ορίζεται ως εξής:

$$A\cdot(X-X_o)+B\cdot(Y-Y_o)+C\cdot(Z-Z_o)=0$$

Για τον προσδιορισμό ενός επιπέδου χρειάζεται ένα σημείο του για τον καθορισμό της θέσης του καθώς και ένα κάθετο σε αυτό διάνυσμα, γνωστό ως κάθετο διάνυσμα

επιφανείας $\hat{n}=(A, B, C)$ (normal vector). Για το κατακόρυφο επίπεδο που καθορίζεται από τον αλγόριθμο ως γνωστό σημείο χρησιμοποιείται το προβολικό κέντρο της εικόνας $P(X_0, Y_0, Z_0)$, εξασφαλίζοντας έτσι ότι δεν τέμνει το νέφος σημείων. Το διάνυσμα \hat{n} έχει την ιδιότητα να είναι κάθετο στο διάνυσμα διεύθυνσης κάθε ευθείας που περιέχεται στο επίπεδο, και κατά συνέπεια στο διάνυσμα \hat{r} της ευθείας που υπολογίστηκε. Επίσης, τα κάθετα διανύσματα δύο κάθετων επιπέδων είναι και κάθετα μεταξύ τους επομένως το διάνυσμα \hat{n} είναι κάθετο με το αντίστοιχο κάθετο διάνυσμα $\hat{c}=(0,0,1)$ του επιπέδου XY του τρισδιάστατου χώρου. Το διάνυσμα που προκύπτει από το εξωτερικό γινόμενο (Cross Product) δύο άλλων διανυσμάτων είναι πάντα κάθετο και στα 2 προηγούμενα. Επομένως για τον υπολογισμό του \hat{n} αρκεί να βρούμε το εξωτερικό γινόμενο των \hat{r} και \hat{c} :

$$\hat{n}=\hat{c} \times \hat{r}=\begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \\ a & b & c \end{bmatrix}=-b \cdot i+a \cdot j+0 \cdot k \Rightarrow \hat{n}=(-b, a, 0)$$

Έτσι εξίσωση του επιπέδου προσδιορίζεται άμεσα από 2 σημεία ως εξής:

$$-b \cdot X+a \cdot Y+0 \cdot Z=-b \cdot X_0+a \cdot Y_0+0 \cdot Z_0$$

Θέτοντας: $D=-b \cdot X_0+a \cdot Y_0+0 \cdot Z_0$, η τελική εξίσωση του επιπέδου είναι:

$$-b \cdot X+a \cdot Y=(Y_1-Y_2) \cdot X+(X_2-X_1) \cdot Y=D$$

Η χρήση της μεθόδου καθορισμού του επιπέδου με επιλογή μόνο δύο σημείων, ωστόσο, εισάγει κάποιους περιορισμούς. Η κατακορυφότητα του επιπέδου, όπως και στην αυτοματοποιημένη διαδικασία, κάνει την μέθοδο καταλληλότερη για κατακόρυφα αντικείμενα. Επίσης, σε περίπτωση που το νέφος σημείων που έχει στην διάθεσή του ο χρήστης δεν είναι γεωαναφερμένο, υπάρχει η πιθανότητα ο άξονας Z του συστήματος αναφοράς του σαρωτή laser να μην είναι κατακόρυφος και κατά συνέπεια να μην είναι παράλληλος με κατακόρυφα αντικείμενα. Το επίπεδο που δημιουργείται για την προβολή, λοιπόν, μπορεί να είναι κατακόρυφο με βάση το σύστημα του νέφους όχι όμως και με βάση το τρισδιάστατο σύστημα γεωδαιτικών συντεταγμένων της πραγματικότητας. Αν ο σαρωτής laser είχε οριζοντιωθεί κατάλληλα τότε η διαφορά των 2 συστημάτων

μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν επιθυμεί ένα κατακόρυφο επίπεδο, τότε είναι απαραίτητη η επιλογή 3 μη συνευθειακών σημείων, ώστε να καθορίζεται η κύρια επιφάνεια του αντικειμένου. Και σε αυτή την περίπτωση η θέση του επιπέδου προσδιορίζεται βάσει του προβολικού κέντρου $P(X_0, Y_0, Z_0)$. Το κάθετο διάνυσμα του επιπέδου θα είναι κάθετο σε όλα τα διανύσματα μεταξύ των 3 σημείων επομένως καθορίζεται ως εξής:

$$\hat{n} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ (X_3 - X_1) & (Y_3 - Y_1) & (Z_3 - Z_1) \\ (X_2 - X_1) & (Y_2 - Y_1) & (Z_2 - Z_1) \end{bmatrix}$$

Με επιλογή 3 σημείων το επίπεδο της προβολής που δημιουργείται δεν είναι απαραίτητα κατακόρυφο κι έτσι κάποιες από τις λειτουργίες του αλγόριθμου τροποποιούνται κατάλληλα. Οι τροποποιήσεις αυτές αναλύονται εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.

2.1.2. Αυτόματος καθορισμός

Όπως προαναφέρθηκε, το επίπεδο προβολής που επιλέχθηκε για την αυτοματοποιημένη μέθοδο είναι το κάθετο στο κατακόρυφο επίπεδο που περιλαμβάνει τον άξονα λήψης (η κατακορυφότητα του επιπέδου αναφέρεται στο σύστημα του σαρωτή laser). Για τον καθορισμό του πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί η εξίσωση της ευθείας του άξονα λήψης. Η παραμετρική μορφή της εξίσωσης της ευθείας στον τρισδιάστατο χώρο ορίζεται ως εξής:

$$X = X_0 + l \cdot t, \quad Y = Y_0 + m \cdot t, \quad Z = Z_0 + n \cdot t$$

Όπως παρατηρούμε, για τον προσδιορισμό της ευθείας είναι απαραίτητη η γνώση ενός σημείου $P(X_0, Y_0, Z_0)$ που να ανήκει στην ευθεία, καθώς και ενός διανύσματος

$\hat{r} = (l, m, n)$ που να εκφράζει την διεύθυνσή της. Από τα στοιχεία το εξωτερικού προσανατολισμού είναι ήδη γνωστές οι συντεταγμένες X_0, Y_0, Z_0 του προβολικού κέντρου, το οποίο ανήκει στον άξονα λήψης της φωτογραφικής μηχανής, επομένως αρκεί να

προσδιοριστεί το διάνυσμα \hat{r} για να καθοριστεί η ευθεία.

Όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο η διεύθυνση μίας ευθείας στο χώρο δίνεται από τα διευθύνοντα συνημίτονα. Έτσι, δύο παράλληλα διανύσματα έχουν και τα ίδια διευθύνοντα συνημίτονα καθώς σχηματίζουν τις ίδιες γωνίες με τους άξονες. Το διάνυσμα \hat{r} που εκφράζει την διεύθυνση του άξονα λήψης, θα έχει τα ίδια διευθύνοντα συνημίτονα με αυτόν. Έστω ότι το διάνυσμα αυτό είναι μοναδιαίο και ξεκινά από την αρχή των αξόνων. Όπως είναι γνωστό ένα μοναδιαίο διάνυσμα έχει μέτρο 1:

$$|\hat{r}|=1 \Leftrightarrow \sqrt{r_x^2+r_y^2+r_z^2}=1 \Leftrightarrow r_x^2+r_y^2+r_z^2=1$$

Η προβολή r_x του διανύσματος πάνω στον άξονα X ισούται με το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος \hat{r} επί το μοναδιαίο διάνυσμα \hat{x} του άξονα:

$$r_x = \hat{r} \cdot \hat{x} = |\hat{r}| \cdot |\hat{x}| \cdot \cos\theta_x \Rightarrow r_x = \cos\theta_x$$

Ομοίως ισχύει και για του άλλους άξονες: $r_y = \cos\theta_y, r_z = \cos\theta_z$

Όπως παρατηρούμε, η προβολή του διανύσματος σε κάθε άξονα έχει μέτρο ίσο με το αντίστοιχο συνημίτονο διεύθυνσης. Επομένως το διάνυσμα έχει συντεταγμένες τα συνημίτονα διεύθυνσης του άξονα λήψης.

$$\hat{r} = (\cos\theta_x, \cos\theta_y, \cos\theta_z)$$

Επιστρέφοντας στις διαδικασίες του αλγορίθμου είναι πλέον σαφές ότι για τον προσδιορισμό της εξίσωσης του άξονα λήψης αρκεί να υπολογιστούν τα διευθύνοντα συνημίτονα του. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται οι γωνίες στροφής ω, ϕ, κ που υπολογίστηκαν από την οπισθοτομία.

Όπως προαναφέρθηκε, τα στοιχεία του πίνακα R ισοδυναμούν με τα συνημίτονα διεύθυνσης των αξόνων U,V,W του συστήματος της κάμερας σε σχέση με τους άξονες του τρισδιάστατου συστήματος του χώρου. Έτσι η τελευταία σειρά του πίνακα δίνει τα συνημίτονα διεύθυνσης του άξονα W της κάμερας σε σχέση με κάθε έναν από τους X,Y,Z άξονες του συστήματος του χώρου. Ο άξονας λήψης της εικόνας συμπίπτει με τον άξονα W του συστήματος της κάμερας, επομένως έχει τα ίδια συνημίτονα διεύθυνσης. Έτσι, το διάνυσμα διεύθυνσης του άξονα λήψης καθορίζεται άμεσα από την τελευταία σειρά του πίνακα στροφής:

$$\hat{r}=(l, m, n)=(r_{3,1}, r_{3,2}, r_{3,3})=(\cos\theta_{WX}, \cos\theta_{WY}, \cos\theta_{WZ})=(\sin\varphi, -\sin\omega\cdot\cos\varphi, \cos\omega\cdot\cos\varphi)$$

Εφόσον καθορίστηκε η εξίσωση του άξονα είναι εύκολο πλέον να προσδιοριστεί και το επίπεδο προβολής. Αρχικά υπολογίζεται το κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την ευθεία του άξονα. Το κάθετο διάνυσμα \hat{v} αυτού του επιπέδου θα είναι κάθετο στο διάνυσμα διεύθυνσης $\hat{r}=(l, m, n)$ του άξονα αλλά και στο κάθετο διάνυσμα του ΧΥ επιπέδου $\hat{c}=(0,0,1)$. Άρα μπορεί να υπολογιστεί ως το εξωτερικό γινόμενο των δύο διανυσμάτων.

$$\hat{v}=\hat{r}\times\hat{c}=\begin{bmatrix} i & j & k \\ l & m & n \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}=m\cdot i-l\cdot j+0\Rightarrow\hat{v}=(-m, l, 0)$$

Αντίστοιχα το κάθετο διάνυσμα \hat{n} του επιπέδου προβολής θα είναι κάθετο στο διάνυσμα \hat{v} του προηγούμενου επιπέδου αλλά και στο διάνυσμα \hat{c} .

$$\hat{n}=\hat{c}\times\hat{v}=\begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \\ m & -l & 0 \end{bmatrix}=l\cdot i+m\cdot j+0\Rightarrow\hat{n}=(l, m, 0)$$

Η τελική εξίσωση του επιπέδου προβολής θα είναι: $l\cdot X+m\cdot Y=D$

Όπου $D=l\cdot X_o+m\cdot Y_o$, εφόσον η θέση του προσδιορίζεται με το προβολικό κέντρο της εικόνας.

2.1.3. Προβολή νέφους

Εφόσον προσδιοριστεί το επίπεδο προβολής της ορθοφωτογραφίας ακολουθεί η προβολή του νέφους πάνω σε αυτό. Η διαδικασία αυτή διευκολύνει την διαχείριση του τρισδιάστατου νέφους, αφού εξαλείφει την τρίτη διάσταση που εκφράζεται με την απόσταση των σημείων από το επίπεδο, περιορίζοντας τα να κείνται επί του δισδιάστατου επιπέδου. Η προβολή είναι απαραίτητη ώστε να προσδιοριστούν τα σημεία με μέγιστες και ελάχιστες τιμές στην διεύθυνση του επιπέδου, τα οποία θα καθορίσουν

τα όρια της ορθοφωτογραφίας. Επίσης κατά την διαδικασία της παρεμβολής στο νέφος θα χρησιμοποιηθούν τα προβεβλημένα σημεία, ώστε να εντοπιστούν τα σημεία εκείνα που εντός της μάσκας παρεμβολής (βλ. Κεφ. 2.2.2). Ωστόσο, επειδή η παραγωγή της ορθοφωτογραφίας αφορά στις συντεταγμένες του αρχικού και όχι του προβεβλημένου νέφους, κατά την προβολή των σημείων διατηρείται ο αύξων αριθμός τους, δίνοντας έτσι μία ταυτότητα (id) σε κάθε σημείο και διευκολύνοντας τη μετάβαση από το ένα νέφος στο άλλο. Καθώς τα νέφη σημείων αναγνωρίζονται από τον αλγόριθμο ως πίνακες συντεταγμένων προστίθεται σε αυτούς μία στήλη με την αύξουσα αρίθμηση των σημείων. Επίσης, μετά την προβολή των σημείων, προστίθεται στον πίνακα του προβεβλημένου νέφους μία ακόμη στήλη με τις αποστάσεις κάθε προβεβλημένου σημείου από τις αρχικές του συντεταγμένες, η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε επόμενες διαδικασίες.

Η διαδικασία της προβολής γίνεται για κάθε ένα από τα σημεία του νέφους. Έστω $P_a(X_a, Y_a, Z_a)$ ένα σημείο του νέφους του οποίου η προβολή θα υπολογιστεί. Το κάθετο διάνυσμα του επιπέδου είναι $\hat{n}=(A, B, C)$, ενώ η εξίσωση του είναι:

$$A \cdot X + B \cdot Y + C \cdot Z = D$$

Αρχικά υπολογίζεται την κάθετη ευθεία στο επίπεδο που να περιέχει το σημείο.

$$\frac{X - X_a}{A} = \frac{Y - Y_a}{B} = \frac{Z - Z_a}{C} = t$$

Η τομή της ευθείας με το επίπεδο θα είναι η προβολή που χρειάζεται να υπολογιστεί. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση του επιπέδου την παραμετρική μορφή της εξίσωσης της ευθείας υπολογίζεται η μεταβλητή t .

$$X = X_a + A \cdot t, \quad Y = Y_a + B \cdot t, \quad Z = Z_a + C \cdot t$$

$$A \cdot (X_a + A \cdot t) + B \cdot (Y_a + B \cdot t) + C \cdot (Z_a + C \cdot t) = D$$

$$t_o = -\frac{A \cdot X_a + B \cdot Y_a + C \cdot Z_a + D}{A^2 + B^2 + C^2}$$

Έπειτα με αντικατάσταση της μεταβλητή στην εξίσωση της ευθείας υπολογίζεται η προβολής $P_p(X_p, Y_p, Z_p)$ του σημείου.

$$X_p = X_a + A \cdot t_o, \quad Y_p = Y_a + B \cdot t_o, \quad Z_p = Z_a + C \cdot t_o$$

Για τον υπολογισμό των αποστάσεων χρησιμοποιείται ο τύπος υπολογισμού της απόστασης μεταξύ σημείων στον τρισδιάστατο χώρο:

$$d = \sqrt{(X_{\text{προβ}} - X_{\text{αρχ}})^2 + (Y_{\text{προβ}} - Y_{\text{αρχ}})^2 + (Z_{\text{προβ}} - Z_{\text{αρχ}})^2}$$

2.1.4. Περίπτωση κεκλιμένου επιπέδου – Στροφή νέφους

Στην περίπτωση που ο χρήστης ακολουθήσει την μη αυτοματοποιημένη μέθοδο καθορισμού του επιπέδου και εισαγάγει 3 επιλεγμένα σημεία, τότε το επίπεδο που καθορίζεται δεν είναι κατ' ανάγκη κατακόρυφο και μπορεί να εμφανίζει οποιαδήποτε κλίση σε σχέση με τον άξονα Z του τρισδιάστατου συστήματος αναφοράς. Εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο έχει διαμορφωθεί ο αλγόριθμος αλλά και για λόγους διευκόλυνσης σε διάφορες διαδικασίες που θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια, μετά την προβολή του νέφους, στην περίπτωση του κεκλιμένου επιπέδου, ακολουθεί μία στροφή των προβεβλημένων σημείων ώστε να βρεθούν πάνω σε ένα κατακόρυφο επίπεδο. Η στροφή αυτή είναι διαφορετική από τις συνήθεις στροφές γύρω από τους άξονες XYZ (βλ. Κεφ.:1.2), καθώς πραγματοποιείται γύρω από έναν αυθαίρετο άξονα στροφής. 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

τριδιάστατου αντικείμενου γύρω από έναν επιλεγμένο άξονα στροφής [Brannon, 2002], [2], [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, για αυθαίρετο άξονα ο οποίος περνά από την αρχή του συστήματος (0,0,0), ο πίνακας στροφής υπολογίζεται με τους παρακάτω τύπους:

$$R=I+\sin\theta\cdot[\hat{v}]_x+(1-\cos\theta)\cdot(\hat{v}\cdot\hat{v}^T-I) \quad \text{ή} \quad R=I\cdot\cos\theta+\sin\theta\cdot[\hat{v}]_x+(1-\cos\theta)\cdot\hat{v}\cdot\hat{v}^T$$

Όπου I είναι ένα 3X3 μοναδιαίος (ή ταυτοτικός) πίνακας.

$$I=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ενώ το $[\hat{v}]_x$ εκφράζει τον αντισυμμετρικό πίνακα (skew symmetric) του διανύσματος $\hat{v}=(v_1, v_2, v_3)$. Ως αντισυμμετρικός πίνακας ορίζεται ο τετραγωνικός πίνακας που είναι ίσος με τον αρνητικό ανάστροφό του $A=-A^T$. Τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου ενός τέτοιου πίνακα είναι ίσα με 0 [McGlone, 2004]:

$$[\hat{v}]_x = skew \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -v_3 & v_2 \\ v_3 & 0 & -v_1 \\ -v_2 & v_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Υπολογισμός της γωνίας $\hat{\theta}$

Η γωνία κατά την οποία πρέπει να στραφεί το νέφος προσδιορίζεται εύκολα, βάσει του κάθετου διανύσματος του επιπέδου προβολής, δηλαδή του $\hat{n}=(A, B, C)$. Όπως προαναφέρθηκε, το αντίστοιχο μοναδιαίο διάνυσμα δίνει τα συνημίτονα διεύθυνσης του διανύσματος, άρα και τις γωνίες διεύθυνσης του διανύσματος σε σχέση με τους άξονες X,Y,Z. Το μοναδιαίο διάνυσμα υπολογίζεται διαιρώντας τις συντεταγμένες του με το μήκος

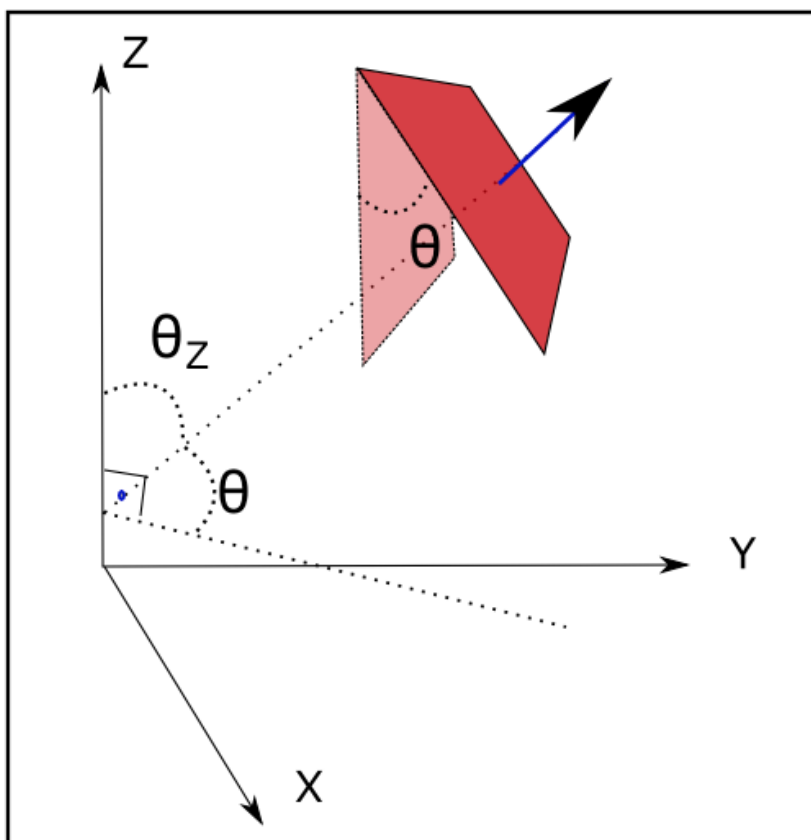
ΤΟΥ:

$$\hat{N} = \frac{\hat{n}}{|\hat{n}|} = \frac{(A, B, C)}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = (a, b, c)$$

Έτσι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα με τον άξονα Z είναι: $\theta_z = \arccos(c)$

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, η γωνία $\hat{\theta}$ κατά πρέπει να στραφεί το νέφος είναι η συμπληρωματική της γωνίας $\hat{\theta}_z$.

$$\hat{\theta} = (\pi/2) - \theta_z$$



Εικόνα 2.2: Υπολογισμός γωνίας θ

Υπολογισμός του διανύσματος \hat{v}

Ο άξονας που επιλέχθηκε για να πραγματοποιηθεί η στροφή είναι μία οριζόντια ευθεία η οποία περνά από το προβολικό κέντρο και περιέχεται στο επίπεδο προβολής. Το διάνυσμα της διεύθυνσής του \hat{v}_d καθορίζεται με το εξωτερικό γινόμενο του κάθετου διανύσματος του επιπέδου $\hat{n}=(A, B, C)$ και του διανύσματος διεύθυνσης $\hat{c}=(0,0,1)$ του άξονα Z, λόγω της καθετότητάς του και στα με τα δύο αυτά διανύσματα:

$$\hat{v}_d = \hat{c} \times \hat{n} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \\ A & B & C \end{bmatrix} = -B \cdot i + A \cdot j + 0 \Rightarrow \hat{n} = (-B, A, 0)$$

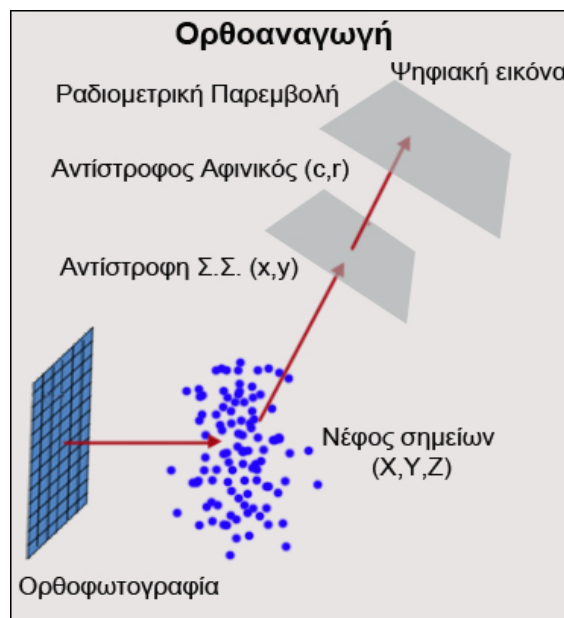
Ωστόσο για την λειτουργία της μεθόδου απαιτείται το αντίστοιχο μοναδιαίο διάνυσμα, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\hat{v} = \frac{\hat{v}_d}{|\hat{v}_d|} = \frac{(-B, A, 0)}{\sqrt{(-B)^2 + A^2 + 0}} = (v_1, v_2, v_3)$$

Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε μία έτοιμη συνάρτηση (function) με το όνομα AxelRot [Matt Jacobson, 2011], η οποία ήταν διαθέσιμη στην κεντρική σελίδα του Matlab [6]. Στοιχεία εισόδου της συνάρτησης, εκτός από τα σημεία που πρέπει να στραφούν, είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που υπολογίστηκε, η γωνία στροφής σε μοίρες και ένα σημείο για τον καθορισμό της θέσης του άξονα, στο οποίο αποδόθηκαν οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου. Σε περίπτωση που δεν εισαχθεί ένα συγκεκριμένο σημείο, τότε ο άξονας καθορίζεται ως μία ευθεία με διάνυσμα διεύθυνσης \hat{v}_d η οποία περνά από την αρχή των αξόνων του τρισδιάστατου συστήματος. Σύμφωνα με τη συνάρτηση η στροφή πραγματοποιείται κατά την θετική φορά γύρω από τον καθορισμένο άξονα. Η θετική φορά καθορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού, με τον αντίχειρα στραμμένο κατά τη διεύθυνση του διανύσματος και με τον δείκτη να απεικονίζει την φορά της στροφής, δηλαδή με φορά αντίστροφη της φοράς του ρολογιού. Ωστόσο, επειδή η στροφή πρέπει να γίνεται πάντα με τέτοιο τρόπο ώστε τα σημεία να έρθουν σε κατακόρυφο επίπεδο, προηγείται μία διερεύνηση ώστε να αποδοθούν στο διάνυσμα διεύθυνσης τα κατάλληλα πρόσημα.

2.2. Επανασύσταση εικόνας – Δημιουργία Ορθοφωτογραφίας.

Μετά τον καθορισμό του επιπέδου και την προβολή του νέφους πάνω σε αυτό, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της ψηφιακής ορθοαναγωγής. Πρόκειται για μία μονοεικονική διαδικασία, για την οποία είναι απαραίτητη μία ψηφιακή εικόνα με γνωστό εξωτερικό προσανατολισμό και ένα μοντέλο επιφανείας του αντικειμένου. Στην περίπτωση που μελετάται από την παρούσα εργασία, ως μοντέλο επιφανείας χρησιμοποιείται το νέφος σημείων του αντικειμένου, ενώ εξωτερικός προσανατολισμός έχει ήδη προσδιοριστεί μέσω του αλγορίθμου με την διαδικασία της οπισθοτομίας [Τζοβλά, 2013]. Με γνωστό τον προσανατολισμό της λήψης, η διαδικασία ακολουθεί ουσιαστικά μία αντίστροφη διαδρομή από αυτήν της προβολικής ακτίνας κατά τη λήψη [Καρράς & Πέτσα, 1998], όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η επανασύσταση ξεκινά από ένα εικονοστοιχείο της νέας εικόνας, συνεχίζει στο νέφος για υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων και καταλήγει στην αρχική εικόνα από την οποία παίρνει την κατάλληλη πληροφορία χρώματος.



Εικόνα 2.3: Διαδικασία Ορθοαναγωγής

Πιο συγκεκριμένα, κατά τον αλγόριθμο, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα, τα οποία αναλύονται εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια [Ιωαννίδης, 2003] :

1. Καθορισμός έκτασης ορθοφωτογραφίας και μεγέθους εικονοψηφίδας
2. Παρεμβολή στο νέφος για υπολογισμό των ορθών συντεταγμένων κάθε εικονοστοιχείου(X,Y,Z)
3. Αντίστροφη εφαρμογή συνθήκης συγγραμμικότητας για υπολογισμό των εικονοσυντεταγμένων (x,y)
4. Αντίστροφη εφαρμογή του αφινικού μετασχηματισμού για υπολογισμό των συντεταγμένων pixel (r,c)
5. Ραδιομετρική παρεμβολή για τον προσδιορισμό του χρώματος του εικονοστοιχείου

Εφόσον καθοριστούν οι διαστάσεις της νέας εικόνας, τα βήματα 2 έως 5 επαναλαμβάνονται για κάθε μεμονωμένη εικονοψηφίδα με αφετηρία την πάνω αριστερή γωνία (rows =1, cols =1) και συνεχίζοντας από γραμμή σε γραμμή, μέχρι να ολοκληρωθεί η επανασύσταση της εικόνας.

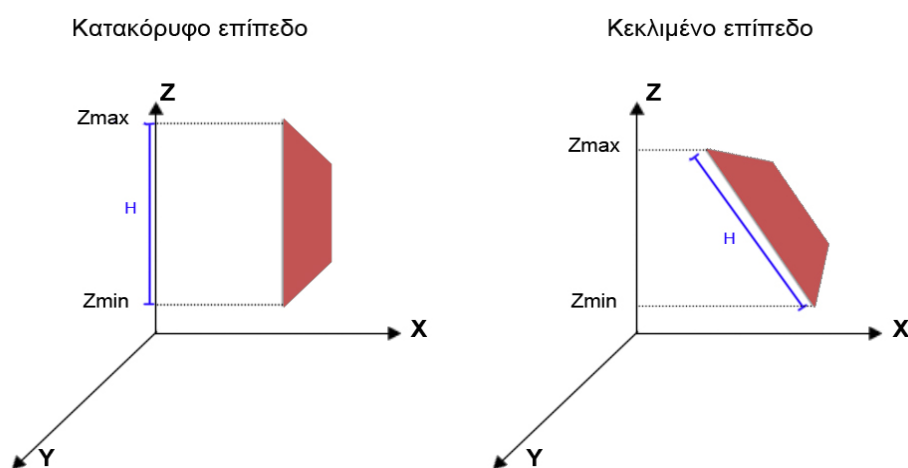
2.2.1. Καθορισμός έκτασης – Μέγεθος εδαφοψηφίδας

Το πρώτο βήμα στην διαδικασία της ορθοαναγωγής είναι ο προσδιορισμός των διαστάσεων της νέας εικόνας. Κατασκευάζεται, λοιπόν, ένας κενός πίνακας εικονοστοιχείων, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας άδειος καμβάς που αργότερα θα συμπληρωθεί με την απαραίτητη πληροφορία χρώματος. Η έκταση αυτού του πίνακα εξαρτάται από τις πραγματικές διαστάσεις που πρέπει να καλύπτει, ενώ ο αριθμός των εικονοστοιχείων που θα περιέχει, δηλαδή η ανάλυση του τελικού προϊόντος, εξαρτάται από την επιθυμητή κλίμακα. Στον αλγόριθμο που δημιουργήθηκε, οι πραγματικές διαστάσεις υπολογίζονται βάσει του μοντέλου επιφανείας και έπειτα, με τον καθορισμό

της εδαφοψηφίδας, δημιουργείται ένας κανάβος εικονοψηφίδων δίνοντας το τελικό ύψος (Height) και πλάτος (Width) σε pixel.

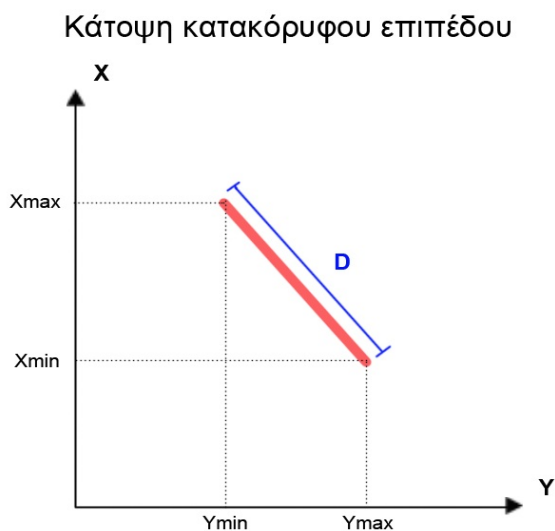
Για τον υπολογισμό της έκτασης του κανάβου της ορθοφωτογραφίας, πρέπει να εντοπιστούν τα ακραία σημεία του προβεβλημένου νέφους. Με μια διαδικασία προσεγγιστικού περιορισμού (βλ. Κεφ.:2.4), μπορεί να προσδιοριστεί το κομμάτι εκείνο του νέφους που περιλαμβάνει η εκάστοτε λήψη. Επομένως ο κανάβος που δημιουργείται θα περιέχει όλη την πληροφορία της εικόνας, καθώς και ορισμένα κομμάτια του νέφους τα οποία βρίσκονται εκτός εικόνας στα οποία δεν θα τους αποδοθεί χρωματική πληροφορία.

Η κατακορυφότητα του επιπέδου προβολής και κατά συνέπεια του προβεβλημένου νέφους επιτρέπει τον εύκολο προσδιορισμό της διάστασης κατά άξονα x της εικόνας, ως την διαφορά των ακραίων σημείων κατά την διεύθυνση του άξονα Z . Έτσι βρίσκονται τα σημεία με την μεγαλύτερη και την μικρότερη συντεταγμένη Z , και υπολογίζεται η διαφορά τους. Ωστόσο, εάν το επίπεδο προβολής είναι κεκλιμένο σε σχέση με τον άξονα Z του τρισδιάστατου συστήματος, η διαφορά των δύο υψομέτρων δεν αντιπροσωπεύει το ύψος της εικόνας. Ο υπολογισμός των ακραίων σημείων σε αυτή την περίπτωση γίνεται με βάση το στραμμένο σε κατακόρυφη θέση νέφος, όπως περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.4: Δυσκολία προσδιορισμού διάστασης κατά y άξονα της ορθοφωτογραφίας, λόγω κεκλιμένου επιπέδου

Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό της διάστασης κατά άξονα y της εικόνας, εντοπίζονται τα ακραία σημεία κατά X και κατά Y διεύθυνση. Η προβολή ενός κατακόρυφου επιπέδου στο XY επίπεδο είναι μία ευθεία και ως συνέπεια όλα τα προβεβλημένα σημεία του νέφους έχουν ζεύγη συντεταγμένων X,Y επάνω σε αυτή την ευθεία. Έτσι, οι μεγαλύτερες και μικρότερες X και Y συντεταγμένες μπορεί να ανήκουν σε 4 διαφορετικά σημεία του νέφους, ωστόσο, στη δισδιάστατη προβολή τους στο οριζόντιο επίπεδο XY μπορούν να εκφραστούν σαν τις συντεταγμένες των 2 δισδιάστατων σημείων που καθορίζουν τα άκρα ενός ευθύγραμμου τμήματος.



Εικόνα 2.5: Υπολογισμός διάστασης κατά άξονα x της ορθοφωτογραφίας

Ανάλογα με την διεύθυνση της ευθείας τα σημεία αυτά μπορούν να έχουν 2 διαφορετικούς συνδυασμούς συντεταγμένων: (X_{min}, Y_{min}) και (X_{max}, Y_{max}) ή (X_{max}, Y_{min}) και (X_{min}, Y_{max}) . Το μήκος, όμως, του ευθύγραμμου τμήματος που δημιουργείται είναι ανεξάρτητο από την κλίση της ευθείας, δίνοντας ουσιαστικά το τελικό πλάτος της ορθοφωτογραφίας, στις μονάδες του αντικειμένου:

$$D = \sqrt{(X_{min} - X_{max})^2 + (Y_{min} - Y_{max})^2}$$

Και σε αυτήν την περίπτωση αν το επίπεδο προβολής είναι κεκλιμένο ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το στραμμένο νέφος σημείων.

Αφού καθοριστούν οι πραγματικές διαστάσεις που θα καλύπτει η ορθοφωτογραφία, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της εδαφοψηφίδας. Ο όρος “εδαφοψηφίδα” (Ground Sampling Distance), χρησιμοποιείται στην Ψηφιακή Φωτογραμμετρία για να περιγράψει το μέγεθος που καλύπτει στο αντικείμενο κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας, στις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης. Έτσι, εάν οι συντεταγμένες των σημείων του νέφους εκφράζονται σε μέτρα, η εδαφοψηφίδα πρέπει και εκείνη να είναι σε μέτρα. Το μέγεθός της εκφράζει ουσιαστικά την πλευρά ενός τετραγώνου εδαφοκάλυψης, έτσι αν μία εδαφοψηφίδα έχει μέγεθος 1cm τότε θα καλύπτει στο αντικείμενο επιφάνεια $1\text{cm} \times 1\text{cm} = 1\text{cm}^2$. Κατώτατο όριο του μεγέθους της εδαφοψηφίδας θεωρείται το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας. Λόγω της μεταβαλλόμενης κλίμακας από σημείο σε σημείο, η αρχική εικόνα δεν έχει ένα σταθερό μέγεθος εδαφοψηφίδας, αλλά καθορίζεται μία μέση τιμή. Η επιλογή, λοιπόν, μίας εδαφοψηφίδας μικρότερης από αυτή την μέση τιμή είναι απαγορευτική, καθώς θα απαιτούταν ουσιαστικά παραπάνω πληροφορία από αυτή που μπορεί να διαθέσει η αρχική εικόνα. Έτσι η ανάλυση της αρχικής εικόνας καθορίζει και την μέγιστη κλίμακα στην οποία θα αποδοθεί η ορθοφωτογραφία. Στον αλγόριθμο το μέγεθος της εδαφοψηφίδας καθορίζεται άμεσα από το χρήστη με την εισαγωγή της κλίμακας που επιθυμεί να έχει το τελικό προϊόν και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Εδαφοψηφίδα Ορθοφωτογραφίας} = 0.1\text{mm} * \text{Συντελεστής Κλίμακας Ορθοφωτογραφίας}$$

Το τελικό βήμα για την δημιουργία του κενού πίνακα είναι η διαίρεση του σε εικονοστοιχεία με βήμα το μέγεθος της εδαφοψηφίδας.

$Width = D / \text{εδαφοψηφίδα}$ (αριθμός pixel σε μία γραμμή)

$Height = H / \text{εδαφοψηφίδα}$ (αριθμός pixel σε μία στήλη)

Συνολικός αριθμός pixel: $Width * Height$

Είναι σαφές ότι ο όγκος και η ανάλυση της τελικής εικόνας εξαρτώνται άμεσα από τον συντελεστή κλίμακας. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή του. Όσο μικρότερος συντελεστής κλίμακας επιλέγεται (δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η κλίμακα), τόσο μικρότερο θα είναι και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας, άρα τόσο μικρότερο κομμάτι του αντικειμένου θα απεικονίζεται σε κάθε εικονοστοιχείο της νέας εικόνας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός μία μεγαλύτερη ανάλυση της ορθοφωτογραφίας και αφετέρου έναν μεγαλύτερο αριθμό εικονοστοιχείων, αυξάνοντας έτσι τον απαιτούμενο χρόνο για την λειτουργία του αλγόριθμου.

2.2.2. Παρεμβολή στο νέφος

Η διαδικασία της ορθοαναγωγής συνεχίζεται με παρεμβολή στο νέφος σημείων, ώστε να αποδοθούν στα κέντρα των εικονοψηφίδων οι ορθές τρισδιάστατες συντεταγμένες τους. Εφόσον το νέφος έχει προβληθεί πάνω στο επίπεδο της ορθοφωτογραφίας, τα σημεία είναι απαλλαγμένα από την τρίτη διάσταση κι έτσι μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτά κάποια από τις μεθόδους παρεμβολής που αφορούν σε δισδιάστατα σημειακά δεδομένα. Αυτές οι μέθοδοι αναφέρονται στην εκτίμηση της τιμής ενός χαρακτηριστικού σε μία συγκεκριμένη θέση, με βάση τις τιμές από τα σημεία που βρίσκονται στην άμεση γειτονική του περιοχή. Μια απλή μέθοδος για την εκτίμηση της τιμής μίας θέσης εντός ενός συστήματος σημειακών δεδομένων είναι να δοθεί σε αυτό η τιμή του κοντινότερου σημειακού δείγματος (μέθοδος εγγύτερου γείτονα). Ωστόσο συνήθως προτιμάται κάποια μέθοδος παρεμβολής που περιλαμβάνει ένα μέσο όρο σημείων (Χωρικός κινητός μέσος όρος). Μία συνηθισμένη προσέγγιση της σημειακής παρεμβολής είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου των σημείων που εμφανίζονται εντός μίας καθορισμένης ακτίνας με κέντρο το σημείο του οποίου η τιμή θα υπολογιστεί. Δημιουργείται κατά αυτό τον τρόπο ένα

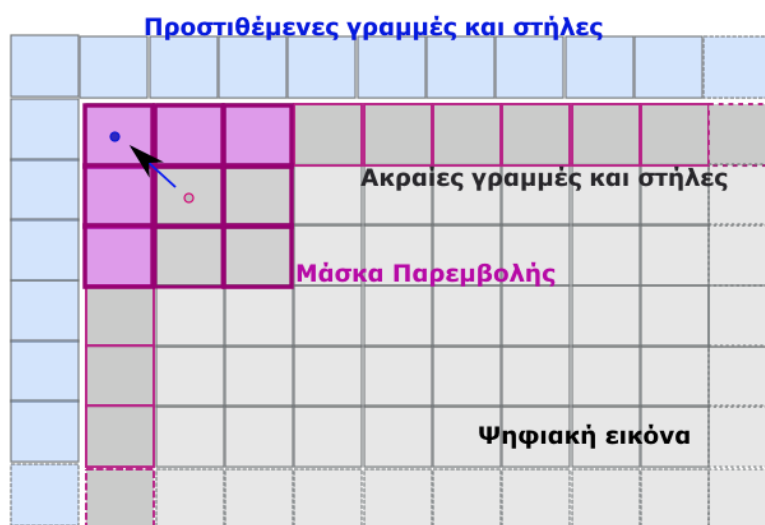
κυκλικό παράθυρο εντός του οποίου εντοπίζονται τα σημειακά δεδομένα τα οποία μπορεί να επηρεάζουν την τιμή του κέντρου. [Τσούλος, 2004]

Στον αλγόριθμο που δημιουργήθηκε το χαρακτηριστικό που πρέπει να αποδοθεί στο κέντρο των εικονοψηφίδων είναι οι συντεταγμένες θέσης του αντίστοιχου σημείου στο αρχικό μη προβεβλημένο νέφος. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης παρεμβολής δεν επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου του εγγύτερου γείτονα, καθιστώντας απαραίτητη την χρήση ενός παραθύρου αναζήτησης και του μέσου όρου των σημείων που περιέχονται σε αυτή. Έτσι, αντί για ένα κυκλικό καθορίστηκε ένα τετράγωνο παράθυρο αναζήτησης, αποτελούμενο από 3X3, 5X5 ή 7X7 εδαφοψηφίδες, ανάλογα με την επιλογή του χρήστη, στο κεντρικό pixel του οποίου αποδίδονται οι συντεταγμένες. Καθώς η διαδικασία της επανασύστασης της εικόνας προχωρά, γύρω από κάθε εικονοστοιχείο δημιουργείται μία μάσκα με αντίστοιχο μέγεθος, της οποίας υπολογίζονται τα όρια. Στη συνέχεια εντοπίζονται τα σημεία του προβεβλημένου νέφους που βρίσκονται εντός των ορίων της μάσκας, αλλά για τον υπολογισμό του μέσου όρου ο αλγόριθμος ανατρέχει στα αντίστοιχα σημεία στο αρχικό νέφος, με χρήση του id τους. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία ακολουθεί τα εξής βήματα τα οποία αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω:

1. Υπολογισμός των ορίων της μάσκας
2. Εντοπισμός των προβεβλημένων σημείων εντός της μάσκας
3. Εύρεση των αντίστοιχων συντεταγμένων στο αρχικό νέφος
4. Απόρριψη των σημείων όπισθεν της κύριας επιφάνειας του αντικειμένου.
5. Υπολογισμός του μέσου όρου και απόδοση συντεταγμένων.

Εξαιτίας της εφαρμογής της μάσκας, δημιουργείται ένα πρόβλημα στον υπολογισμό των συντεταγμένων των ακραίων pixel της ορθοφωτογραφίας. Καθώς η μάσκα εφαρμόζεται σε τόσες εικονοψηφίδες όσες και το μέγεθός της, δεν αποδίδονται συντεταγμένες στις ακραίες στήλες και γραμμές της εικόνας, δημιουργώντας ουσιαστικά ένα μαύρο περίγραμμα στην τελική εικόνα σε περιοχές που κανονικά έχουν πληροφορία αλλά δεν εφαρμόζεται η μάσκα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, πριν την έναρξη της

διαδικασίας της επανασύστασης, προστίθενται στον άδειο ακόμα πίνακα της ορθοφωτογραφίας όσες γραμμές και στήλες είναι απαραίτητες ώστε το κέντρο της μάσκας να συμπίπτει με το πρώτο και το τελευταίο pixel κάθε γραμμής και στήλης του πίνακα πριν την προσθήκη. Έτσι στην περίπτωση της μάσκας 3X3 προστίθενται 2 γραμμές και 2 στήλες, ενώ για την μάσκα 5X5 προστίθενται 4 γραμμές και 4 στήλες. Λόγω αυτής της προσθήκης γραμμών και στηλών, τα όρια της ορθοφωτογραφίας μεταβάλλονται, προσθέτοντας τις απαραίτητες εικονοψηφίδες. Το μαύρο περίγραμμα παραμένει αλλά πλέον δεν αφορά σε περιοχές οι οποίες περιλαμβάνουν σημεία του νέφους.



Εικόνα 2.6: Πρόβλημα ακραίων γραμμών και στηλών.

Προσδιορισμός Ορίων Μάσκας

Τα όρια της μάσκας προσδιορίζονται με βάση τα όρια της ορθοφωτογραφίας ($X_{max}, X_{min}, Y_{max}, Y_{min}, Z_{max}, Z_{min}$), όπως αυτά υπολογίστηκαν κατά την δημιουργία του άδειου πίνακα (βλ. Κεφ:2.2.1). Ουσιαστικά, ξεκινώντας την επανασύσταση από την πάνω αριστερά γωνία της εικόνας, αποδίδονται οι ίδιες συντεταγμένες και στην πάνω αριστερά γωνία της μάσκας, ενώ τα όριά της προς τα κάτω και προς τα δεξιά υπολογίζονται προσθέτοντας ή αφαιρώντας τόσες εικονοψηφίδες όσες και το μέγεθος της μάσκας. Αυτό

δίνει άμεσα το πάνω και το κάτω όριο της μάσκας (δηλαδή τις Z συντεταγμένες), αλλά για το αριστερό και δεξιό της όριο απαιτείται πρώτα μία διερεύνηση της σχετικής θέσης νέφους και επιπέδου. Κάθε γραμμή εικονοστοιχείων διατηρεί τα ίδια άνω και κάτω όρια μάσκας, ενώ κάθε στήλη διατηρεί τα ίδια αριστερά και δεξιά όρια.

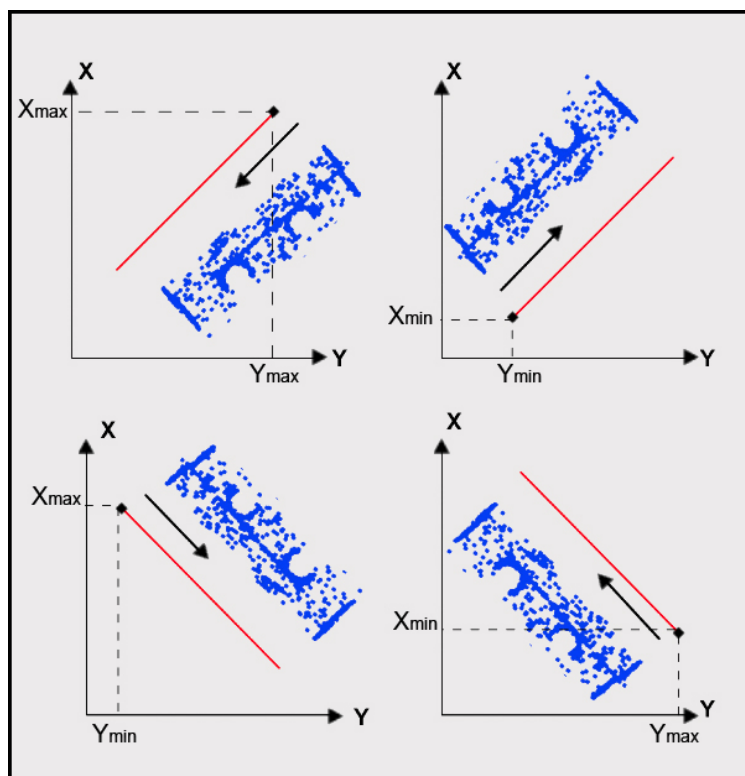
Καθώς αρχίζει η εφαρμογή της μάσκας στην πάνω αριστερή γωνία, το άνω όριο της μάσκας θα έχει ύψος Z_{max} και για κάθε επόμενη γραμμή θα αφαιρείται μία εδαφοψηφίδα. Το κάτω όριο της μάσκας υπολογίζεται με αφαίρεση τόσων εδαφοψηφίδων όσων καθορίζει το μέγεθος της μάσκας από το πάνω όριο. Έτσι καθώς η επανασύσταση προχωρά από γραμμή σε γραμμή τα άνω και κάτω όρια της μάσκας υπολογίζονται βάσει των παρακάτω τύπων:

$$Up_{mask} = z_{max} - row \cdot GSD$$
$$Low_{mask} = Up_{mask} - m \cdot GSD$$

Όπου row είναι ο αριθμός της γραμμής στην οποία βρίσκεται η επανασύσταση (για την πρώτη γραμμή $row=0$), GSD είναι το μέγεθος της εδαφοψηφίδας και m είναι το μέγεθος της μάσκας. Λόγω του ότι τα όρια που υπολογίστηκαν αρχικά για την ορθοφωτογραφία μεταβάλλονται με την μετέπειτα προσθήκη στηλών και γραμμών, το Z_{max} που χρησιμοποιείται πρέπει να αυξηθεί κατά $(v/2) \cdot GSD$, όπου v ο αριθμός των γραμμών που προστέθηκαν. Έτσι οι τελικοί τύποι για τον υπολογισμό των κατακόρυφων ορίων είναι:

$$Up_{mask} = z_{max} - row \cdot GSD + (v/2) \cdot GSD$$
$$Low_{mask} = Up_{mask} - m \cdot GSD$$

Για τον προσδιορισμό των αριστερά και δεξιά ορίων της μάσκας είναι απαραίτητη η διερεύνηση της σχετικής θέσης του νέφους και του επιπέδου στον τρισδιάστατο χώρο, ώστε να υπολογιστούν οι συντεταγμένες της πάνω αριστερά γωνίας του πίνακα. Όπως φαίνεται και παρακάτω, διακρίνονται 4 περιπτώσεις οι οποίες εξαρτώνται από την διεύθυνση του επιπέδου αλλά και από τη θέση του νέφους εκατέρωθεν του επιπέδου. Αντίστοιχες περιπτώσεις δημιουργούνται και στα υπόλοιπα τεταρτημόρια.



Εικόνα 2.7: Σχετική Θέση Νέφους και Επιπέδου Προβολής, Κάτοψη. Τα βέλη υποδεικνύουν τη φορά κατά την οποία γίνεται το “γέμισμα” της εικόνας.

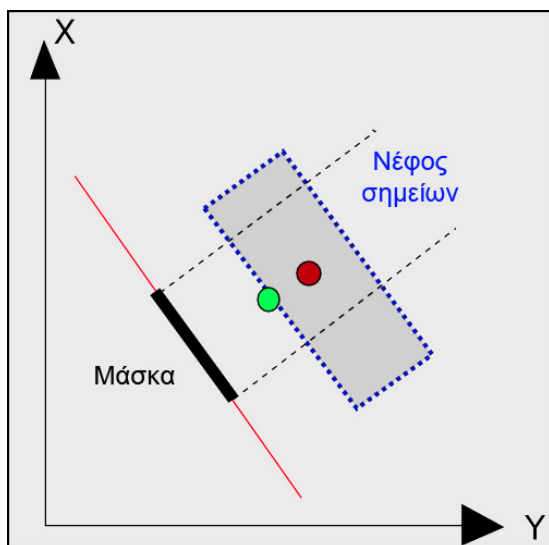
Η διερεύνηση που πραγματοποιείται από τον αλγόριθμο υπολογίζει την κλίση της προβολής του επιπέδου στο XY επίπεδο καθώς και την γωνία που σχηματίζει με τον άξονα X. Μετέπειτα διερευνάται η θέση του νέφους σε σχέση με το επίπεδο, κατατάσσοντας την εκάστοτε γεωμετρία σε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Με βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διερεύνησης προσδιορίζεται αν οι XY συντεταγμένες που θα αποδοθούν στην άνω αριστερή γωνία θα είναι οι μικρότερες ή οι μεγαλύτερες που έχουν υπολογιστεί και αν, καθώς η επανασύσταση προχωρά από στήλη σε στήλη, θα προστίθενται ή θα αφαιρούνται εδαφοψηφίδες αντίστοιχα. Έτσι δημιουργούνται οι παρακάτω τύποι οι οποίοι περιλαμβάνουν και την προσθήκη στηλών:

$$X_{lf} = x_{max}^{min} \pm col \cdot GSD \cdot \cos(\hat{\omega}_x) \mp (v/2) \cdot GSD \cdot \cos(\hat{\omega}_x)$$
$$Y_{lf} = y_{max}^{min} \pm col \cdot GSD \cdot \sin(\hat{\omega}_x) \mp (v/2) \cdot GSD \cdot \sin(\hat{\omega}_x)$$

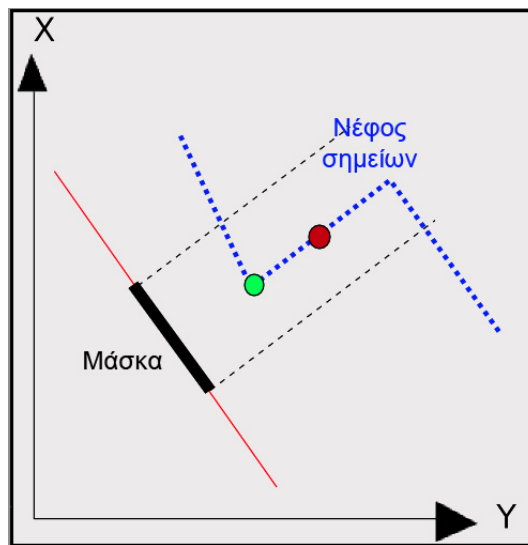
$$X_{rt} = X_1 \pm m \cdot GSD \cdot \cos(\hat{\omega}_x)$$
$$Y_{rt} = Y_1 \pm m \cdot GSD \cdot \sin(\hat{\omega}_x)$$

Όπου col είναι ο αριθμός της στήλης στην οποία βρίσκεται η επανασύσταση (για την πρώτη στήλη col=0), GSD είναι το μέγεθος της εδαφοψηφίδας, $\hat{\omega}_x$ είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή του επιπέδου στο XY επίπεδο με τον άξονα X, v ο αριθμός στηλών που προστέθηκαν και m το μέγεθος της μάσκας.

Έχοντας πλέον προσδιορίσει τα όρια, ο αλγόριθμος προχωρά στον εντοπισμό των προβεβλημένων σημείων εντός της μάσκας και στην εύρεση των αντίστοιχων σημείων στο αρχικό νέφος, με χρήση της αρίθμησης (id) των σημείων. Αυτά τα σημεία θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων του κεντρικού pixel. Ωστόσο, πριν υπολογιστεί ο μέσος όρος πρέπει να απορριφθούν ορισμένα σημεία τα οποία αλλοιώνουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Σε περίπτωση που έχει προηγηθεί συρραφή νεφών και το νέφος σημείων δεν αντιπροσωπεύει μόνο την εμπροσθεν επιφάνεια του αντικειμένου αλλά και την πίσω (π.χ. Ένας τοίχος για τον οποίο στο νέφος περιγράφονται οι επιφάνειες και των δύο πλευρών του) αλλά και σε περιπτώσεις εναλλαγής του αναγλύφου όπου η μάσκα εντοπίζει σημεία σε κάθετη προς αυτήν διεύθυνση, ο μέσος όρος που θα υπολογιζόταν θα ήταν λανθασμένος. Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες σε αυτές τις περιπτώσεις ο μέσος όρος που υπολογίζεται (κόκκινο σημείο) είναι διαφορετικός από τον επιθυμητό (πράσινο σημείο).



Εικόνα 2.8: Περίπτωση συρραφής νεφών.
Εσφαλμένος υπολογισμός μέσου όρου

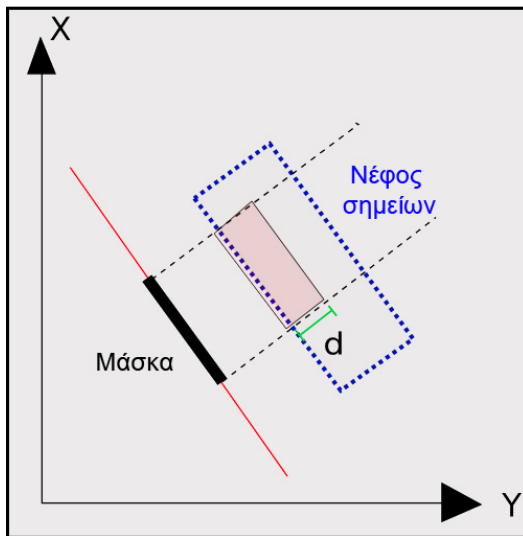


Εικόνα 2.9: Περίπτωση εναλλαγής
αναγλύφου. Εσφαλμένος υπολογισμός
μέσου όρου

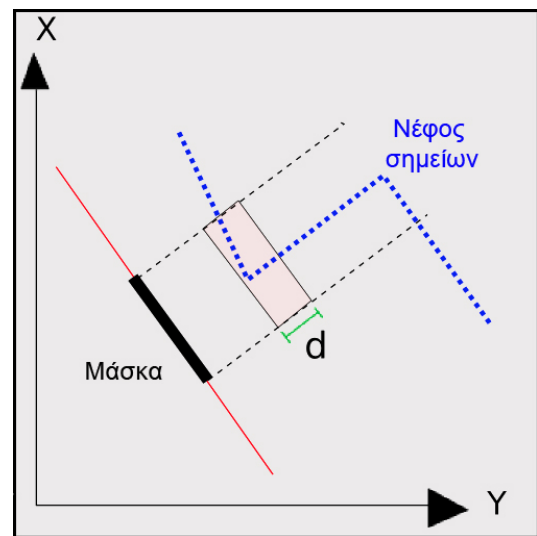
Έτσι εφαρμόζεται μία απόσταση ανοχής πέρα από την οποία τα σημεία του αρχικού νέφους απορρίπτονται. Αυτή η απόσταση είναι δυναμική και εναλλάσσεται από εικονοψηφίδα σε εικονοψηφίδα. Συγκεκριμένα, από τα σημεία εντός της μάσκα, εντοπίζεται το σημείο του αρχικού νέφους με την μικρότερη απόσταση από την προβολή του ($D_{nearest}$). Έπειτα προστίθεται σε αυτή την απόσταση ένα όριο ανοχής $d = GSD$ και τα σημεία που απέχουν από το επίπεδο περισσότερο από αυτή απορρίπτονται. Το όριο ανοχής έχει ίσο μέγεθος με την εδαφοψηφίδα και δημιουργεί ουσιαστικά έναν τρισδιάστατο “κουτί” αναζήτησης στον τρισδιάστατο χώρο του νέφους.

$$D_{max} = D_{nearest} + d$$

Βασική προϋπόθεση αυτής της διαδικασίας είναι το νέφος να είναι απαλλαγμένο από θόρυβο, ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων και των προβολών τους έχουν ήδη υπολογιστεί και εισαχθεί ως στήλη του πίνακα του νέφους. (βλ. Κεφ.:2.1.3)



Εικόνα 2.9: Περίπτωση συρραφής νεφών. Περιοχή εντός της οποίας τα σημεία διατηρούνται



Εικόνα 2.10: Περίπτωση εναλλαγής αναγλύφου. Περιοχή εντός της οποίας τα σημεία διατηρούνται

Το τελικό βήμα για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων του κέντρου της εικονοψηφίδας είναι η εύρεση του μέσου όρου των τελικών σημείων που βρέθηκαν εντός μάσκας και δεν απορρίφθηκαν από την παραπάνω διαδικασία.

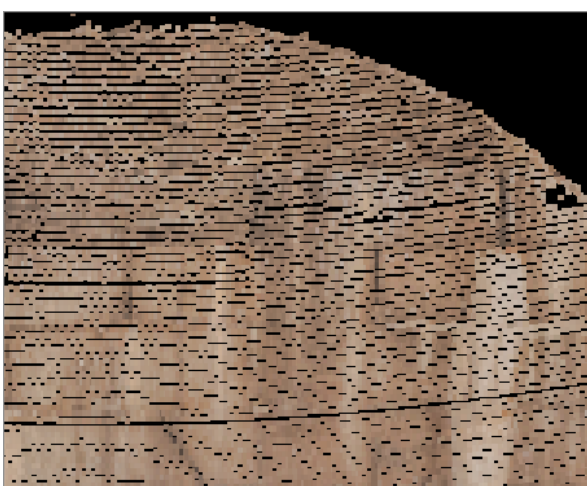
Αντιμετώπιση μαύρων ψηφίδων

Το μέγεθος της μάσκας επιλέγεται από το χρήστη βάσει της πυκνότητας του νέφους και επηρεάζει την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Σε περίπτωση που το νέφος δεν είναι αρκετά πυκνό, ο αλγόριθμος δεν βρίσκει πάντα σημεία που εμπίπτουν εντός της μάσκας με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στην εικόνα μαύρες ψηφίδες. Αν δεν υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής ενός πιο πυκνού νέφους, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με επανάληψη της διαδικασίας και εφαρμογή μεγαλύτερου παραθύρου παρεμβολής.

Ωστόσο, αν το νέφος είναι ιδιαίτερος αραιό η χρήση μίας μεγαλύτερης μάσκας παρεμβολής ενδέχεται να επηρεάσει την γεωμετρική ακρίβεια της ορθοφωτογραφίας (βλ. Κεφ.:4.3). Στην διπλωματική “Σύνταξη λογισμικού για την εφαρμογή εναλλακτικής μεθόδου παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας” [Νάτσης,2008], προτείνεται μία εναλλακτική μέθοδος για την βελτίωση της οπτικής ποιότητας των τελικών προϊόντων

χωρίς να απαιτείται η επανάληψη της διαδικασίας της ορθοαναγωγής. Πρόκειται ουσιαστικά για μία μέθοδο παρεμβολής, η οποία εφαρμόζεται στις τελικές εικόνες και προσθέτει χρώμα στις μαύρες ψηφίδες, ανάλογα με τις τιμές χρώματος των γειτονικών εικονοψηφίδων.

Όπως φαίνεται και παρακάτω η μέθοδος αποδεικνύεται ιδιαιτέρως αποτελεσματική για την βελτίωση της οπτικής ποιότητας της εικόνας σε περιπτώσεις που οι μαύρες ψηφίδες είναι λίγες. Ωστόσο σε περιπτώσεις αρκετά αραιού νέφους σημείων η μέθοδος δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Εικόνα 2.11: Αρχική Ορθοφωτογραφία με χρήση μάσκας 3X3, στην οποία εμφανίζονται κενές ψηφίδες



Εικόνα 2.12: Μετά την εφαρμογή της μεθόδου χρωματισμού εικονοψηφίδων



Εικόνα 2.13: Εφαρμογή μάσκας 5X5

2.2.3. Αντίστροφη Συνθήκη Συγγραμμικότητας, Αφινικός

Μετασχηματισμός και Διορθώσεις Διαστροφών

Επόμενο στάδιο της ορθοαναγωγής είναι η εφαρμογή της αντίστροφης συνθήκης συγγραμμικότητας στις τρισδιάστατες συντεταγμένες κάθε εικονοψηφίδας, ώστε να πραγματοποιηθεί η μετάβαση στο δισδιάστατο σύστημα της εικόνας. Η συνθήκη συγγραμμικότητας αποτελεί την βασική εξίσωση της φωτογραμμετρίας, μέσω της οποίας συνδέονται τα στοιχεία της εικόνας (εικονοσυντεταγμένες) με εκείνα του χώρου (τρειςδιάστατες συντεταγμένες). Η εξίσωση αυτή ουσιαστικά περιγράφει την προβολική ακτίνα στο χώρο κατά την στιγμή της λήψης, εξασφαλίζοντας ότι ένα σημείο του χώρου, το αντίστοιχο σημείο επί της εικόνας και το προβολικό κέντρο κείνται επί ευθείας. Η μαθηματική διατύπωση εκφράζεται με την παρακάτω γενική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \cdot R_{\omega\phi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}$$

Κατά την επανασύσταση της εικόνας ουσιαστικά πραγματοποιείται αντίστροφη εφαρμογή της συνθήκης, ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία της προβολικής ακτίνας. Για να πραγματοποιηθεί η μετάβαση από τις τρισδιάστατες συντεταγμένες της κενής ψηφίδας της ορθοφωτογραφίας στις δισδιάστατες εικονοσυντεταγμένες της αρχικής εικόνας που της αντιστοιχούν, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$x = x_o - c \cdot \frac{(r(1,1) \cdot (X - X_o) + r(1,2) \cdot (Y - Y_o) + r(1,3) \cdot (Z - Z_o))}{(r(3,1) \cdot (X - X_o) + r(3,2) \cdot (Y - Y_o) + r(3,3) \cdot (Z - Z_o))}$$

$$y = y_o - c \cdot \frac{(r(2,1) \cdot (X - X_o) + r(2,2) \cdot (Y - Y_o) + r(2,3) \cdot (Z - Z_o))}{(r(3,1) \cdot (X - X_o) + r(3,2) \cdot (Y - Y_o) + r(3,3) \cdot (Z - Z_o))}$$

Όπου c η σταθερά της μηχανής σε mm, $r_{i,j}$ τα στοιχεία του πίνακα στροφής, X_o, Y_o, Z_o οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου και X, Y, Z οι τρισδιάστατες συντεταγμένες που προκύπτουν από την παρεμβολή στο νέφος.

Κατά την διαδικασία αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού

συνυπολογίστηκε η διόρθωση για την εφαπτομενική και ακτινική διαστρόφη, με αποτέλεσμα οι εικονοσυντεταγμένες που υπολογίζονται από την συνθήκη συγγραμμικότητας να είναι απαλλαγμένες από αυτές τις παραμορφώσεις του φακού. Η αρχική εικόνα, ωστόσο, εμφανίζει ακόμα αυτές τις παραμορφώσεις κι έτσι για τον προσδιορισμό της σωστής θέσης των εικονοσυντεταγμένων πρέπει να προστεθούν σε αυτές οι απαιτούμενες μεταθέσεις, πραγματοποιώντας μία “αντίστροφη διόρθωση”. Γνωρίζοντας το πρωτεύον σημείο x_o, y_o , για κάθε ζεύγος εικονοσυντεταγμένων που έχει προκύψει από την συνθήκη συγγραμμικότητας υπολογίζεται η ακτινική του απόσταση: $r = \sqrt{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}$. Έτσι η ακτινική διαστρόφη κάθε σημείου προκύπτει σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο, όπου k_0, k_1, k_2 , οι συντελεστές που διατίθενται στο δελτίο βαθμονόμησης της κάμερας:

$$\Delta r = k_0 \cdot r + k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5$$

Αναλύοντας την τιμή Δr στις συνιστώσες $\Delta x, \Delta y$ υπολογίζονται οι ποσότητες κατά τις οποίες πρέπει να “αλλοιωθούν” οι εικονοσυντεταγμένες x, y . Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές προστίθενται και δεν αφαιρούνται όπως στην αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού.

$$x_{\text{παραμορφωμένο}} = x + \Delta x, \quad y_{\text{παραμορφωμένο}} = y + \Delta y$$

Κατά την “αντίστροφη διόρθωση” της ακτινικής διαστρόφης παρατηρείται πως οι τιμές του Δr που υπολογίζονται δεν είναι ίδιες με εκείνες που υπολογίζονται για την αρχική διόρθωση, λόγω της διαφορετικής ακτινικής απόστασης του διορθωμένου και του παραμορφωμένου σημείου. Ωστόσο αυτή η διαφορά είναι τόσο μικρή που μπορεί ασφαλώς να θεωρηθεί αμελητέα.

Εκτός από την ακτινική διαστρόφη συνυπολογίζεται και η αντίστροφη διόρθωση της ασύμμετρης διαστρόφης. Οι τιμές της προσδιορίζονται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

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

Και σε αυτή την περίπτωση οι τιμές της θα προστεθούν και δεν θα αφαιρεθούν, με αποτέλεσμα οι εικονοσυντεταγμένες να υποστούν συνολική μετάθεση:

$$x_{\text{παραμορφωμένο}} = x + \Delta x + \delta x, \quad y_{\text{παραμορφωμένο}} = y + \Delta y + \delta y$$

Ο αντίστροφος αφινικός μετασχηματισμός χρησιμοποιείται ώστε να αναχθούν οι εικονοσυντεταγμένες (x,y) σε συντεταγμένες pixel (i,j) , δίνοντας τη σειρά και τη στήλη στην οποία βρίσκεται η εικονοψηφίδα της αρχικής εικόνας από την οποία θα ληφθεί η πληροφορία χρώματος για την αντίστοιχη εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας. Κατά τη διαδικασία της αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού, η συνήθης έκφραση του αφινικού μετασχηματισμού χρησιμοποιήθηκε ώστε να πραγματοποιηθεί η μετάβαση από τις συντεταγμένες pixel (i, j) , στις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες:

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

Οι 6 συντελεστές $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ περιγράφουν την σχέση μεταξύ των δύο συστημάτων (2 στρόφες, 2 κλίμακες, 2 μεταθέσεις). Ο υπολογισμός αυτών των συντελεστών πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού της κάμερας, βάσει των παρακάτω τύπων [Καρράς,1998]:

$$\begin{aligned} a_1 &= k_x (\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2) & b_1 &= k_x \cdot \sin\theta_1 & c_1 &= -x_o \\ a_2 &= k_x (-\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \sin\theta_2 \cdot \cos\theta_1) & b_2 &= k_y \cdot \cos\theta_1 & c_2 &= y_o \end{aligned}$$

Το x_o, y_o είναι το πρωτεύον σημείο και εκφράζει την μετάθεση του ενός συστήματος ως προς το άλλο. Οι γωνίες θ_1 και θ_2 είναι γωνίες κατά τις οποίες στρέφονται οι άξονες του ενός συστήματος για να συμπέσουν με τους άξονες του δεύτερου συστήματος και στην συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμογής του αφινικού είναι ίσες με $\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = \pi + \varepsilon$, όπου το ε εκφράζει την απόκλιση ως προς την ορθογωνικότητα των αξόνων. Τέλος τα στοιχεία k_x , k_y εκφράζουν τις διαφορετικές κλίμακες των 2 αξόνων και υπολογίζονται από τον λόγο $\frac{k_y}{k_x}$ που δίνεται στα στοιχεία του δελτίου βαθμονόμησης.

Στην αντίστροφη εφαρμογή του αφινικού χρησιμοποιούνται οι ίδιοι συντελεστές όπως υπολογίστηκαν κατά την αποκατάσταση του εσωτερικού, όμως για τον υπολογισμό των συντεταγμένων pixel, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος [Καρράς,1998]:

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \frac{1}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1} \cdot \begin{bmatrix} b_2 & -a_2 \\ -b_1 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - c_1 \\ y - c_2 \end{bmatrix}$$

Εάν μετά την εφαρμογή του αφινικού μετασχηματισμού τα (i,j) έχουν αρνητική ή μηδενική τιμή ή αν είναι μεγαλύτερα από τις διαστάσεις της αρχικής εικόνας, τότε οι εικονοσυντεταγμένες αφορούν σε σημείο εκτός των ορίων εικόνας. Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία σταματά χωρίς να πραγματοποιηθεί η ραδιομετρική παρεμβολή, και στις αντίστοιχες εδαφοψηφίδες της ορθοφωτογραφίας αποδίδεται λευκό χρώμα (τιμή 255), ώστε να ξεχωρίζουν τα σημεία στα οποία έγινε παρεμβολή στο νέφος αλλά δεν βρέθηκε η αντίστοιχη πληροφορία στη εικόνα.

2.2.4. Ραδιομετρική Παρεμβολή

Εφόσον εντοπιστούν οι συντεταγμένες pixel (i,j) της αρχικής εικόνας στις οποίες αντιστοιχεί η εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας, πρέπει να υπολογιστεί η κατάλληλη τιμή χρώματος που θα αποδοθεί. Οι συντεταγμένες, ωστόσο, που υπολογίστηκαν δεν είναι ακέραιοι αριθμοί με αποτέλεσμα το κέντρο κάθε εικονοψηφίδας της ορθοφωτογραφίας να μην μπορεί να αντιστοιχηθεί ακριβώς με ένα κέντρο εικονοψηφίδας της αρχικής εικόνα. Ουσιαστικά προσδιορίζεται 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:

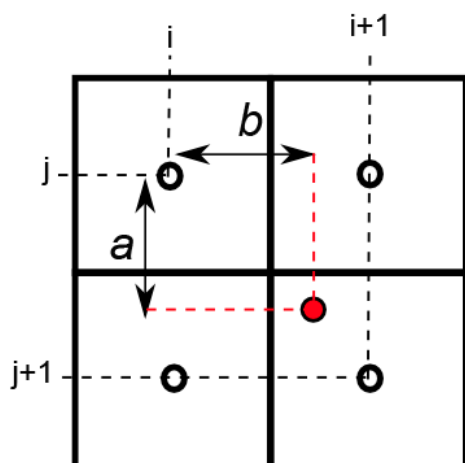
- Εγγύτερου γείτονα (Nearest neighbor)
- Διγραμμική παρεμβολή (Bilinear interpolation)
- Δικυβική συνέλιξη (Bicubic convolution)

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, 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, αυξάνοντας πολύ τις απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο.

Με σκοπό να αποφευχθούν οι ατέλειες της παρεμβολής του εγγύτερου γείτονα αλλά και οι χρονικές απαιτήσεις της δικυβικής παρεμβολής, 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:

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

Όπου a και b σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.14: Διγραμμική Παρεμβολή

Αλγοριθμικά η εικόνα αναγνωρίζεται ως ένας δισδιάστατος πίνακας $M \times N$ 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 $M \times N \times 3$. 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.

Κατά την αλγοριθμική εφαρμογή της ραδιομετρικής παρεμβολής πρέπει να δίδεται προσοχή στους υπολογισμούς που επηρεάζουν το βάθος χρώματος της εικόνας. Ο όρος “βάθος χρώματος” αναφέρεται στο εύρος των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για να αναπαραστήσει το χρώμα κάθε εικονοστοιχείου. Καθώς οι πιθανές διαβαθμίσεις του χρώματος είναι άπειρες, βάσει της πληροφορίας που μπορεί να περιέχεται σε 8 bits ($2^8 = 256$), αλλά και από την δυνατότητα του ανθρωπίνου ματιού να διακρίνει μέχρι 20-25 διαφορετικούς τόνους του γκριζου [Γεωργόπουλος,1998], έχει καθοριστεί μία διακριτοποίηση των διαβαθμίσεων από το λευκό έως το μαύρο σε συνολικά 256 τόνους με τιμές από το 0 (μαύρο) έως το 255 (λευκό). Οι διαβαθμίσεις δημιουργούν μία κλίμακα τόνων του γκρι, ενώ για μία έγχρωμη εικόνα απαιτείται η συνένωση τριών εικόνων 8-bit σε μία 24-bit αυξάνοντας τις δυνατές αποχρώσεις από 256 σε $256^3 = 16,7 * 10^6$.

Στο Matlab η εικόνα αποθηκεύεται ως πίνακας αλλά παράλληλα διατηρείται η ιδιότητα των επιμέρους στοιχείων του πίνακα να κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές 0 και 255. Αυτό καθιστά αδύνατες τις μαθηματικές πράξεις μεταξύ των στοιχείων των καναλιών της εικόνας, καθώς οι διαφοροποιήσεις των τιμών σε μη ακέραιους ή αρνητικούς ή σε τιμές άνω του καθορισμένου ορίου 255 δεν διατηρούνται. Έτσι στις διαδικασίες του αλγορίθμου, για την χρήση της χρωματικής πληροφορίας στην αριθμητική της έκφραση, αρχικά η εικόνα μετασχηματίζεται κατάλληλα σε διαχειρίσιμη μορφή (εντολή double) και μετά το πέρας της διαδικασίας μετασχηματίζεται εκ νέου σε αρχείο εικόνας (εντολή uint8). [6]

2.3. Γεωαναφορά

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία της ορθοαναγωγής, πραγματοποιείται η γεωαναφορά της καινούριας εικόνας. Γεωαναφορά ονομάζεται η διαδικασία εκείνη κατά την οποία προσδίδονται συντεταγμένες του πραγματικού κόσμου σε μία ψηφιακή εικόνα. Με αυτόν τον τρόπο, όταν γίνεται ανάγνωση από τα ακατάλληλα λογισμικά, αποδίδεται στην εικόνα η σωστή θέση και γεωμετρία της. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των ορθοφωτογραφιών από εναέριες ή δορυφορικές λήψεις, λόγω της χαρτογραφικής τους χρηστικότητας, η απόδοση της κατάλληλης γεωγραφικής πληροφορίας είναι απαραίτητη, ώστε να μπορούν να ενταχθούν στο κατάλληλο σύστημα αναφοράς και να συσχετιστούν εύκολα με άλλα χαρτογραφικά δεδομένα. Είναι προφανές ότι, για ορθοφωτογραφίες που έχουν προέλθει από επίγειες λήψεις, όπως σε περιπτώσεις αποτυπώσεων μνημείων, 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") [3]. 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 και επεξεργασίας και αποθήκευσης τέτοιου είδους αρχείων-εικόνων.

Η μέθοδος απόδοσης γεωαναφοράς που πραγματοποιείται από τον αλγόριθμο πραγματοποιείται με συνοδευτικά αρχεία, γνωστά με την ονομασία world files. Πρόκειται για αρχεία της μορφής -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. Ενδεικτικά λογισμικά που αναγνωρίζουν την γεωαναφορά εικόνων με συνοδευτικά αρχεία είναι το ArcGis, Quantum Gis και AutoCAD Map.

Τα συγκεκριμένα αρχεία περιέχουν ένα πίνακα 6 στοιχείων, το ένα κάτω από το άλλο, με διαχωριστικό δεκαδικών μία τελεία, και εισάγονται με την εξής σειρά [4], [5]:

1. (a1) Βήμα ανά pixel κατά την X διεύθυνση
2. (a2) Απόκλιση γραμμών εικόνας ως προς άξονα X του συστήματος
3. (b1) Απόκλιση στηλών εικόνας ως προς άξονα Y του συστήματος
4. (b2) Βήμα ανά pixel κατά την Y διεύθυνση
5. (c1) Συντεταγμένη X του κέντρου του πάνω αριστερά pixel
6. (c2) Συντεταγμένη Y του κέντρου του πάνω αριστερά pixel

Αυτά τα στοιχεία λειτουργούν ως τους συντελεστές του απαραίτητου αφινικού μετασχηματισμού ώστε να αποδοθεί στην εικόνα η σωστή θέση και γεωμετρία :

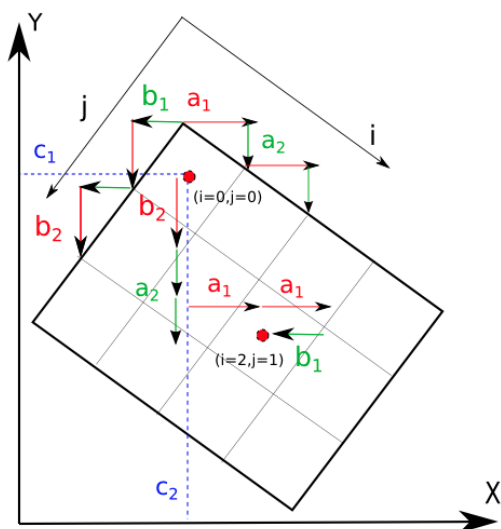
$$\begin{aligned}x_{map} &= a_1 \cdot i + b_1 \cdot j + c_1 \\ y_{map} &= a_2 \cdot i + b_2 \cdot j + c_2\end{aligned}$$

Τα i, j αντιστοιχούν στην στήλη και γραμμή του pixel στην αρχική εικόνα, ενώ τα x_{map}, y_{map} αντιστοιχούν στη θέση των αντίστοιχων εικονοστοιχείων στο σύστημα αναφοράς μετά τον μετασχηματισμό. Οι συντελεστές του αφινικού μετασχηματισμού μπορούν να αναλυθούν, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους, δίνοντας τις k_x, k_y κλίμακες κατά τους άξονες i, j της εικόνας, την γωνία στροφής θ του συστήματος της εικόνας ως προς το άλλο με φορά αντίστροφα της φοράς του ρολογιού, την απόκλιση

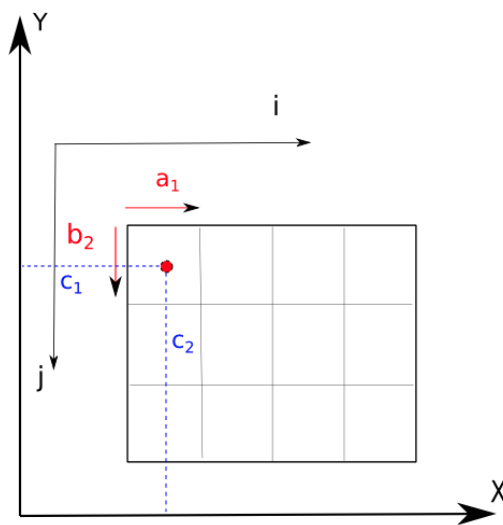
ε της ορθογωνικότητας των αξόνων (υπολογισμένη σε σχέση με τον άξονα γ) και τις απαιτούμενες μεταθέσεις t_x, t_y :

$$\begin{aligned}a_1 &= k_x \cdot \cos \theta \\a_2 &= k_y \cdot (e \cdot \cos \theta - \sin \theta) \\b_1 &= k_x \cdot \sin \theta \\b_2 &= -k_y \cdot (e \cdot \sin \theta + \cos \theta) \\c_1 &= t_x \\c_2 &= t_y\end{aligned}$$

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω τύπους τα τέσσερα πρώτα στοιχεία του πίνακα είναι αλληλένδετα μεταξύ τους και από αυτά εξαρτάται η τελική γεωμετρία της εικόνας. Το δεύτερο και το τρίτο στοιχείο (συντελεστές a_2 και b_1) δημιουργούνται εξαιτίας των στροφών που απαιτούνται για να μετασχηματιστεί η εικόνα από το ένα σύστημα στο άλλο. Αν η τιμή τους είναι μηδενική τότε και απαιτούμενες στροφές είναι μηδενικές και δεν απαιτείται πλέον αφινικός μετασχηματισμός αλλά απλά 2 μεταθέσεις και 2 μεταβολές κλίμακας. Είναι σαφές ότι λογισμικά που δεν υποστηρίζουν τον αφινικό μετασχηματισμό της εικόνας ή πραγματοποιούν διαφορετικούς μετασχηματισμούς, δεν μπορούν να αναγνώσουν αυτά τα αρχεία, σε περιπτώσεις που οι τιμές των συντελεστών a_2 και b_1 δεν είναι μηδενικές. Έτσι τα περισσότερα αρχεία τέτοιου τύπου συνηθίζουν να έχουν μηδενικές τιμές στην δεύτερη και στην τρίτη σειρά. Εφόσον δεν απαιτούνται στροφές του συστήματος οι τιμές των βημάτων (συντελεστές a_1 και b_2) ισοδυναμούν με το μέγεθος της εδαφοψηφίδας κατά X και Y άξονα. Στην περίπτωση που έχουν ίδια απόλυτη τιμή τότε πραγματοποιείται μόνο μία μεταβολή της κλίμακας και 2 μεταθέσεις της εικόνας, ενώ η εικονοψηφίδα είναι τετράγωνη. Η αρνητική τιμή του συντελεστή b_2 οφείλεται στο ότι το σύστημα των εικόνων raster έχει συνήθως αφετηρία την άνω αριστερά ψηφίδα ενώ αντίθετα στα περισσότερα συστήματα αναφοράς οι συντεταγμένες αυξάνονται από κάτω προς τα πάνω. Έτσι, με το αρνητικό πρόσημο αποφεύγονται φαινόμενα καθρεφτίσματος, αλλάζοντας ουσιαστικά την φορά μέτρησης συντεταγμένων. [4], [5]



Εικόνα 2.16: Το *pixel*(2,1) έχει συντεταγμένες $(2*a_1+1*b_1+c_1, 2*a_2+1*b_2+c_2)$



Εικόνα 2.15: Το *pixel* (0,0) έχει συντεταγμένες (c_1, c_2) και κάθε επόμενο *pixel* έχει συντεταγμένες (a_1*i+c_1, a_2*j+c_2)

Στον αλγόριθμο, κατά την γεωαναφορά των εικόνων αποδίδονται στην άνω αριστερά εικονοψηφίδα της ορθοφωτογραφίας οι συντεταγμένες 100,100, ενώ για βήμα κατά Χ 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  
-0.020000  
100.000000  
100.000000
```

Εικόνα 2.17: Μορφή αρχείου *tfw*

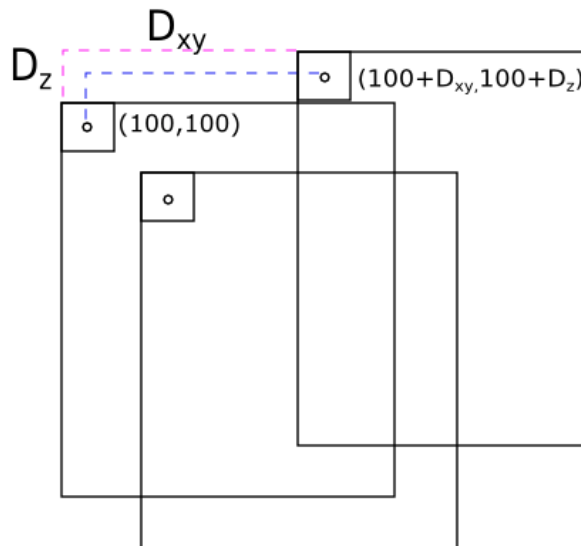
Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται αυτόματα, παράλληλα με την αποθήκευση των εικόνων, διατηρώντας το επιλεγμένο όνομα και προσθέτοντας την κατάληξη *.tfw*. Όπως προαναφέρθηκε, τα αρχεία με τη συγκεκριμένη κατάληξη συνοδεύουν εικόνες τύπου *Tif*, επομένως σε περίπτωση επιλογής αποθήκευσης εικόνας σε διαφορετικό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

Σε περίπτωση προβολής πάνω από μίας ορθοφωτογραφίας στο ίδιο επίπεδο προβολής, αποδίδεται μόνο στην εικονοψηφίδα της πρώτης εικόνας οι συντεταγμένες 100, 100, ενώ για τις υπόλοιπες αποδίδονται οι κατάλληλες συντεταγμένες ώστε να μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους με μία ενιαία γεωαναφορά. Γνωρίζοντας τα όρια κάθε ορθοφωτογραφίας, όπως αυτά υπολογίστηκαν βάσει των ακραίων σημείων του προβεβλημένου νέφους (βλ. Κεφ.: 2.2.1), υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των άνω αριστερά εικονοψηφίδων των 2 εικόνων. Τα όρια αυτά έχουν τρισδιάστατες συντεταγμένες συναρτήσεως των οποίων υπολογίζονται οι δισδιάστατες αποστάσεις τους. Τα υπολογισμένα όρια δεν αναφέρονται στα κέντρο αλλά στα άνω αριστερά άκρο των εικονοψηφίδων, ωστόσο αυτό δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα, καθότι το σύστημα είναι αυθαίρετο και υπολογίζεται απλά η απόσταση μεταξύ των 2 σημείων. Οι συντεταγμένες κάθε επόμενης εικόνας στο ίδιο επίπεδο υπολογίζονται βάσει των παρακάτω τύπων:

$$D_{xy} = \sqrt{(X_i - X_{first})^2 + (Y_i - Y_{first})^2}$$
$$D_z = Z_i - Z_{first}$$

$$X = 100 + D_{xy} \quad Y = 100 + D_z$$

Το πρόσημο της τιμής D_z καθορίζει αν η επόμενη εικόνα βρίσκεται πιο χαμηλά ή πιο ψηλά από την αρχική. Ωστόσο η τιμή D_{xy} είναι πάντοτε θετική, με αποτέλεσμα να απαιτείται διερεύνηση ώστε να της αποδοθεί το κατάλληλο πρόσημο. Ανάλογα με τα αποτελέσματα της διερεύνησης καθορίζεται η θέση της δεύτερης εικόνας δεξιά ή αριστερά της πρώτης.



Εικόνα 2.18: Διατήρηση κοινής γεωαναφοράς ορθοφωτογραφιών προβεβλημένων στο ίδιο επίπεδο

Θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην διαχείριση των αρχείων των αποθηκευμένων εικόνων καθώς οποιαδήποτε αλλαγή του φορμάτ τους ή των διαστάσεων τους καθιστά άχρηστο το συνοδευτικό αρχείο.

2.4. Περιορισμός νέφους σημείων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο καθορισμός των διαστάσεων του κανάβου της ορθοφωτογραφίας, πραγματοποιείται βάσει των ακραίων σημείων του νέφους (βλ. Κεφ.: 2.2.1). Ωστόσο, ενδέχεται το νέφος που έχει στην διάθεση του ο χρήστης να μην περιλαμβάνει μόνο το κομμάτι του αντικειμένου που απεικονίζεται στην λήψη, αλλά να καλύπτει μία ευρύτερη περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κানাβος να έχει διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το χρήσιμο κομμάτι της ορθοφωτογραφίας, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.19: Με λευκό απεικονίζονται τα σημεία του νέφους για τα οποία πραγματοποιήθηκε η ορθοαναγωγή αλλά δεν εντοπίστηκαν σημεία εντός της εικόνας

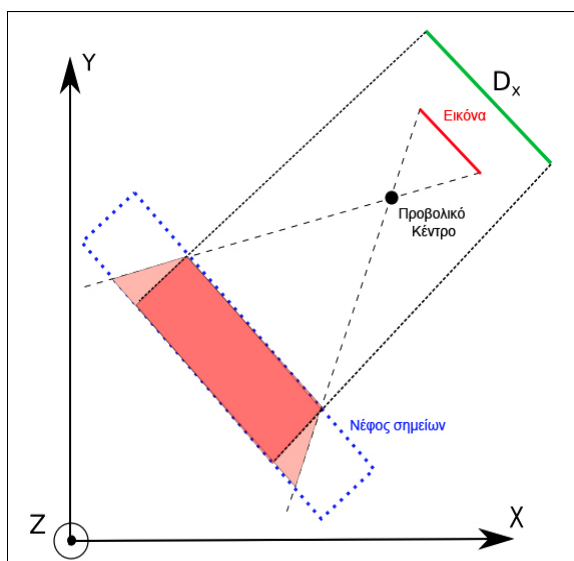
Αυτό δεν επηρεάζει την ποιότητα του αποτελέσματος, ωστόσο ο περιττός όγκος των σημείων συμβάλλει άμεσα στην μείωση της ταχύτητας του αλγορίθμου. Καθώς η

εφαρμογή της μάσκας γίνεται σε όλη την επιφάνεια της ορθοφωτογραφίας, ο αλγόριθμος πραγματοποιεί την διαδικασία της ορθοαναγωγής ακόμα και για τα σημεία που δεν αφορούν στη διαθέσιμη εικόνα, αυξάνοντας τον συνολικό απαιτούμενο χρόνο. Εάν το νέφος που εισάγεται δεν είναι ήδη περιορισμένο στο αντικείμενο της εικόνας, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ακολουθήσει μία διαδικασία προσεγγιστικού περιορισμού, η οποία εφαρμόζεται, εφόσον έχουν υπολογιστεί τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού και πριν ξεκινήσει η διαδικασία της ορθοαναγωγής.

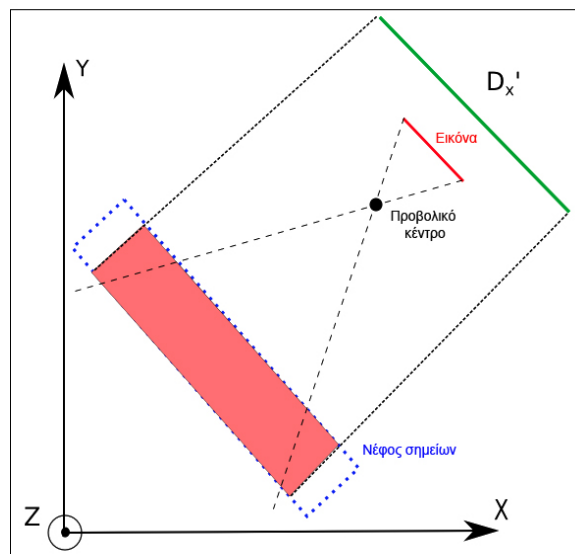
Με εισαγωγή μίας προσεγγιστικής απόστασης από το αντικείμενο και βάση της σταθεράς c της κάμερας υπολογίζεται μία μέση κλίμακα της αρχικής εικόνας. Έπειτα υπολογίζονται οι διαστάσεις της εικόνας βάσει του μεγέθους του pixel που έχει εισαχθεί μαζί με τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού. Πολλαπλασιάζοντας τις διαστάσεις της εικόνας με την κλίμακα υπολογίζονται οι διαστάσεις στην πραγματικότητα, κατά άξονα x και y του συστήματος της εικόνας.

Ωστόσο αυτές οι αποστάσεις δεν ανταποκρίνονται στην οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση που αντιστοιχεί στο χρήσιμο κομμάτι του νέφους, καθώς ενδέχεται η εικόνα να μην έχει ληφθεί με την κάμερα οριζόντια αλλά με κλίση. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα αντικείμενα στην αρχική εικόνα απεικονίζονται βάσει κεντρικής και όχι ορθής προβολής (δηλαδή δεν έχουν ενιαία κλίμακα), είναι προφανές ότι οι υπολογισμένες διαστάσεις καλύπτουν συνήθως μικρότερη απόσταση από την επιθυμητή στο νέφος. Για να αποφευχθεί ο περιορισμός του νέφους περισσότερο από το επιθυμητό, οι αποστάσεις αυτές πολλαπλασιάζονται με ένα συγκεκριμένο συντελεστή μεγαλύτερο της μονάδας. Το πόσο θα περιοριστεί το νέφος είναι αντιστρόφως ανάλογο της τιμής αυτού του συντελεστή, ο οποίος για την συγκεκριμένη περίπτωση καθορίστηκε ίσος με 1.5 :

$$D_x' = 1.5 \cdot D_x \quad D_y' = 1.5 \cdot D_y$$



Εικόνα 2.21: Με εφαρμογή απόστασης D_x μπορεί να αποκοπούν σημαντικά κομμάτια από το νέφος, λόγω κεντρικής προβολής



Εικόνα 2.20: Με εφαρμογή της απόστασης $D_{x'}$ καλύπτονται το επιθυμητό κομμάτι του νέφους

Οι αποστάσεις αυτές χρησιμεύουν ώστε να υπολογιστούν τα όρια εντός των οποίων τα σημεία του νέφους διατηρούνται. Συγκεκριμένα η απόσταση D_x χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των ορίων κατά διεύθυνση XY του αντικειμένου ενώ το D_y για την εύρεση των ορίων κατά τον άξονα Z του τρισδιάστατου συστήματος. Αρχικά υπολογίζεται το σημείο τομής του άξονα λήψης με το νέφος σημείων. Καθώς δεν πρόκειται για μία ενιαία αλλά για μια διακριτή επιφάνεια, δημιουργείται από 2 σημεία του νέφους ένα κατακόρυφο επίπεδο και υπολογίζεται η τομή $P(X_p, Y_p, Z_p)$ του άξονα λήψης με αυτό. Τα σημεία αυτά δεν είναι τυχαία αλλά έχουν καθοριστεί ώστε να ανήκουν στην κύρια επιφάνεια του αντικειμένου και να μην ανήκουν σε μία κατακόρυφη ευθεία. Υπολογίζοντας την γωνία $\hat{\alpha}$ που σχηματίζει η προβολή του επιπέδου στο XY επίπεδο με τον άξονα X , τα όρια εντός των οποίων περιορίζεται το νέφος προσδιορίζονται βάσει των παρακάτω τύπων:

$$X_1 = X_p - (D_x' / 2) \cdot \cos(\hat{a})$$

$$X_2 = X_p + (D_x' / 2) \cdot \cos(\hat{a})$$

$$X_{max} = \max(X_1, X_2)$$

$$X_{min} = \min(X_1, X_2)$$

$$Y_1 = Y_p - (D_x' / 2) \cdot \sin(\hat{a})$$

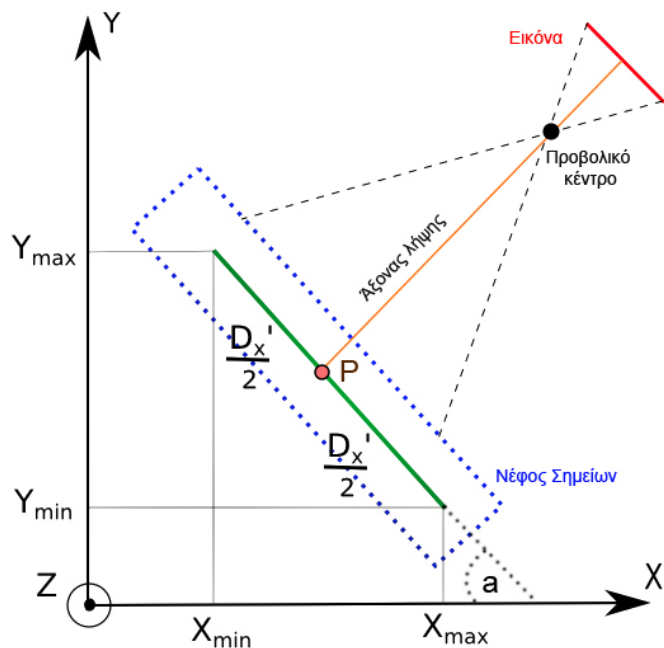
$$Y_2 = Y_p + (D_x' / 2) \cdot \sin(\hat{a})$$

$$Y_{max} = \max(Y_1, Y_2)$$

$$Y_{min} = \min(Y_1, Y_2)$$

$$Z_{max} = Z_p + (D_y' / 2)$$

$$Z_{min} = Z_p - (D_y' / 2)$$



Εικόνα 2.22: Υπολογισμός ορίων για περιορισμό του νέφους

Σε ακραίες περιπτώσεις όπου το επίπεδο είναι σχεδόν κάθετο στους άξονες X ή Y, τα όρια που καθορίζονται είναι πολύ μικρά με αποτέλεσμα, λόγω του όγκου του νέφους να αποκόπτονται από αυτό σημαντικά κομμάτια του νέφους σημείων. Για να αποφευχθεί αυτό πρέπει το νέφος να προβληθεί επί του επιπέδου ώστε να μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατο. Εφόσον τα σημεία προβληθούν εντοπίζονται όσα βρίσκονται εντός ορίων και με χρήση του id τους διατηρούνται τα αντίστοιχα σημεία από το αρχικό νέφος.

3. Εφαρμογή και αποτελέσματα

Για τον έλεγχο του αλγορίθμου αλλά και για την διερεύνηση της δυνατότητας επίτευξης της επιθυμητής ακρίβειας χωρίς την διεξαγωγή γεωδαιτικών μετρήσεων, έγινε μία ενδεικτική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε δεδομένα από τον Ναό του Ηφαίστου στην Αρχαία Αγορά Αθηνών. Για την διαδικασία της ορθοφωτογραφίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούσαν στην ανατολική είσοδο του ναού, η οποία αποτελείται από δύο κίονες. Αντίθετα, η δυτική είσοδος του ναού, η οποία αποτελείται από έναν επίπεδο τοίχο, αποτέλεσε κατάλληλο αντικείμενο για την εφαρμογή της διαδικασίας της αναγωγής [Τζοβλά, 2013].



Εικόνα 3.1: Ανατολική είσοδος ναού



Εικόνα 3.2: Δυτική είσοδος ναού

Κατά την συλλογή δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής διαφοράς φάσης Scan Station 2 της εταιρίας Leica και η σάρωση πραγματοποιήθηκε με βήμα 1cm στα 8m. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές σαρώσεις οι οποίες συνενώθηκαν σε ένα συνολικό τρισδιάστατο νέφος του εσωτερικού του ναού. Για την λειτουργία του

αλγορίθμου το συνολικό νέφος περιορίστηκε για την ανατολική πλευρά του ναού σε ένα αρχείο 220.000 σημείων και για την δυτική σε αρχείο 60.000 σημείων περίπου. Οι φωτογραφικές λήψεις έγιναν με την φωτογραφική κάμερα EOS – 1Ds Mark III της Canon, με φακό σταθεράς 24mm και δελτίο βαθμονόμησης από το Κέντρο Μετρολογίας της ΣΑΤΜ. Τα αποτελέσματα της παραγωγής ορθοφωτογραφίας φαίνονται παρακάτω. (Οι εικόνες είναι όλες υπό κλίμακα).

Εφαρμογή Πρώτη:



Εικόνα 3.3: Αρχική εικόνα αριστερού κίονα



Εικόνα 3.4: Αρχική ορθοφωτογραφία αριστερού κίονα. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Πρόβλημα κενών εικονοψηφίδων

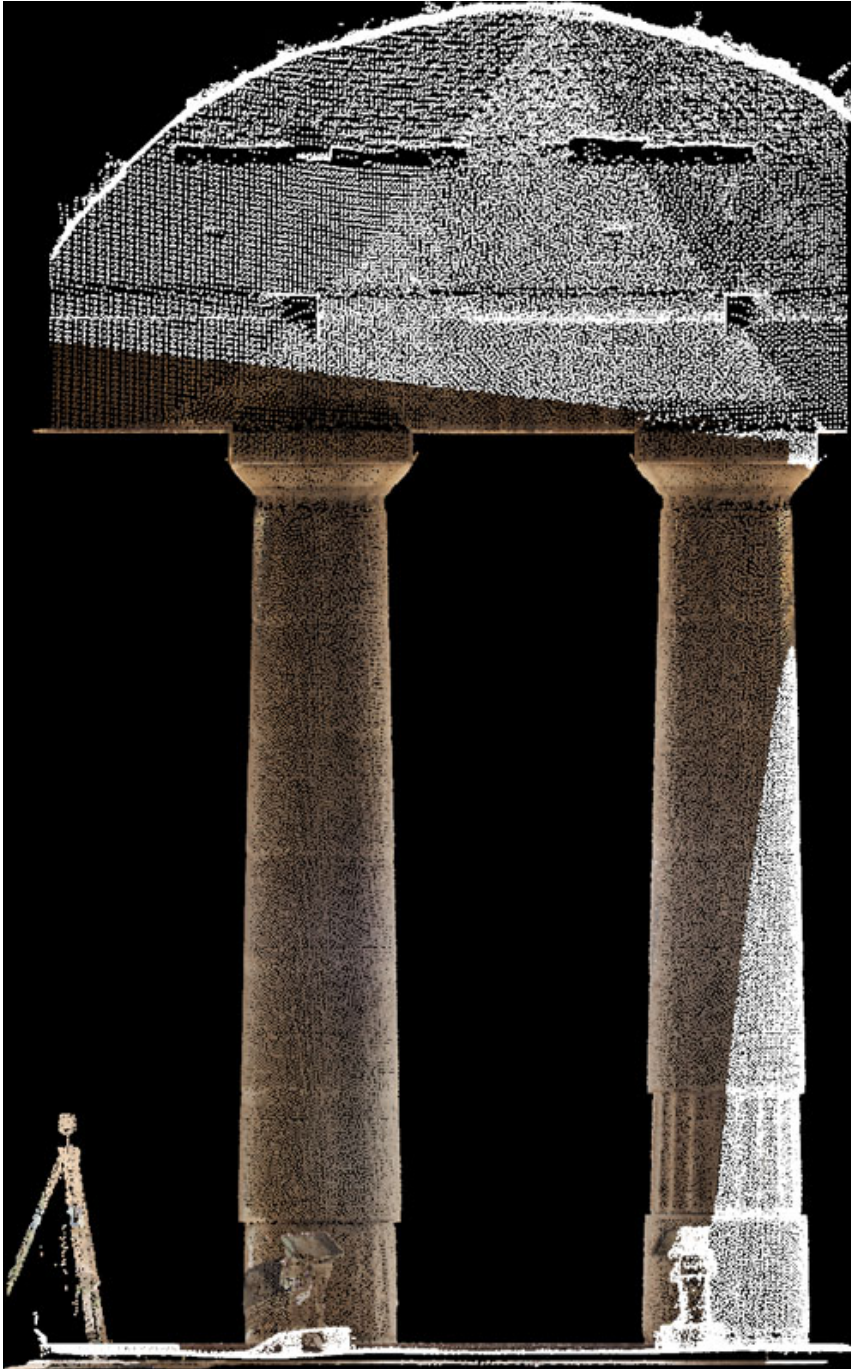


Εικόνα 3.5: Τελική ορθοφωτογραφία αριστερού κίονα. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Διαδικασία πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων

Εφαρμογή Δεύτερη:



Εικόνα 3.6: Αρχική εικόνα κίωνων. Παρατηρούνται έντονες στροφές λήψης



Εικόνα 3.7: Αρχική ορθοφωτογραφία κιώνων. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Πρόβλημα κενών εικονοψηφίδων

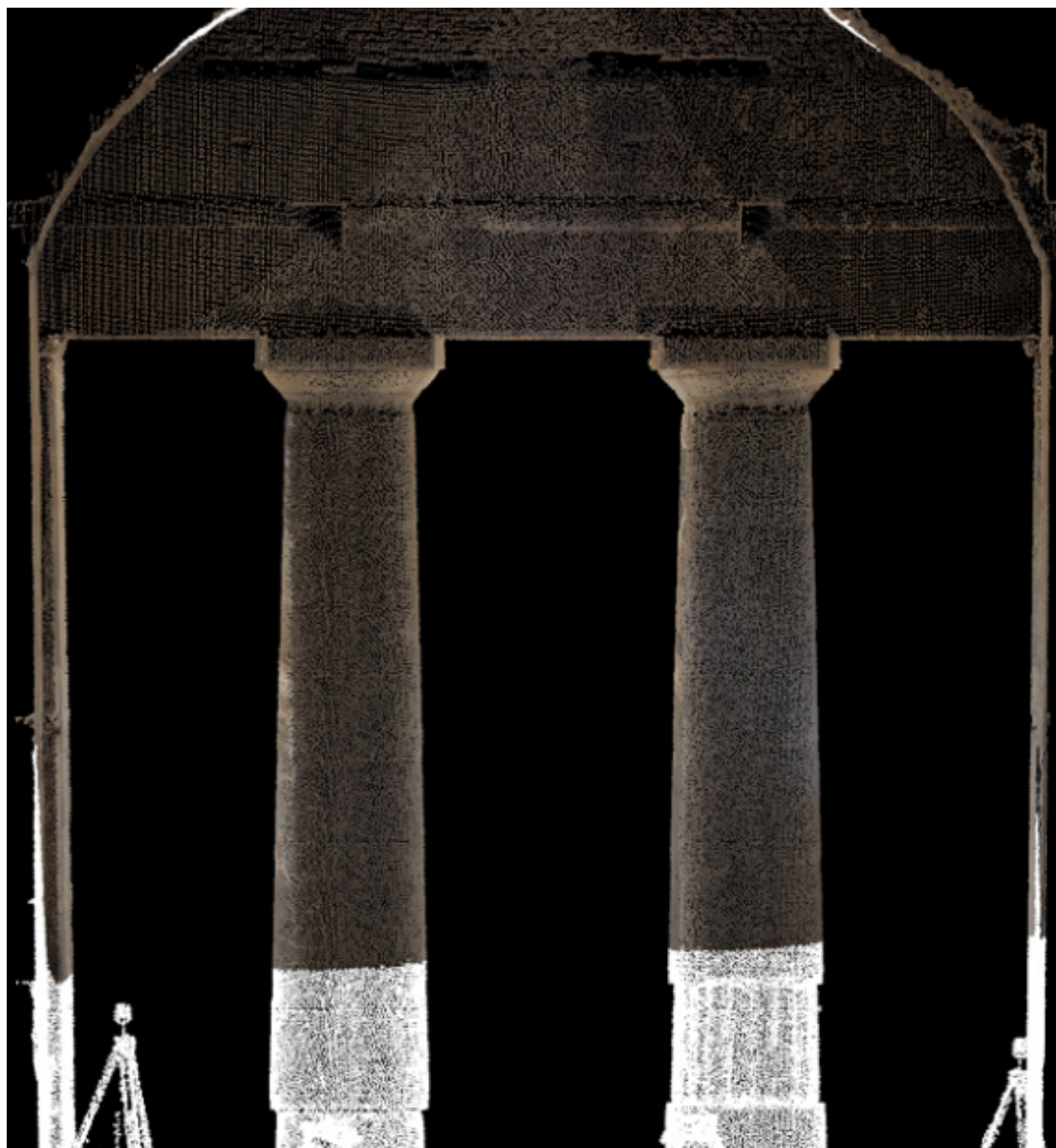


Εικόνα 3.8: Τελική ορθοφωτογραφία κίωνων. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Μέθοδος πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων

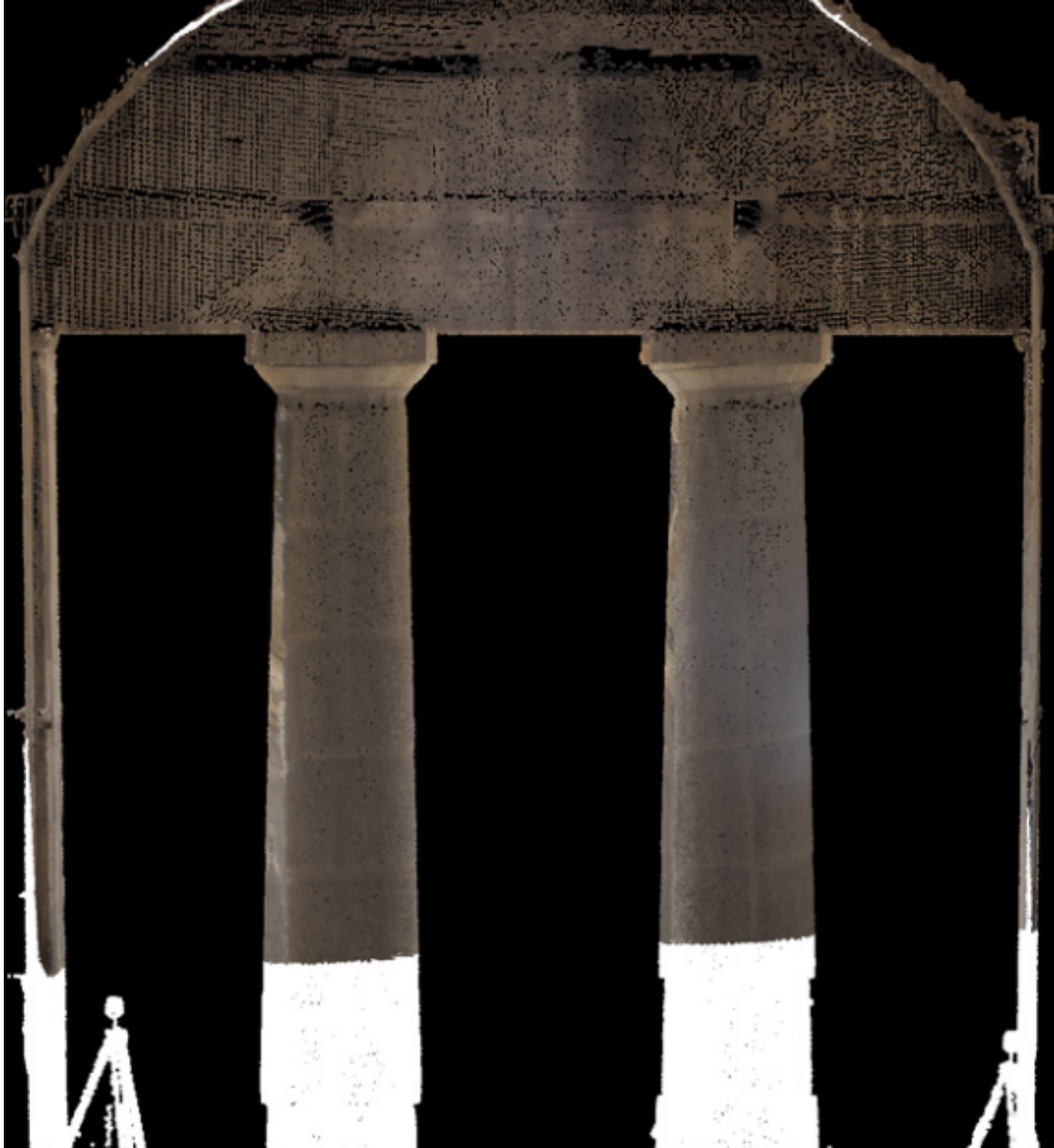
Εφαρμογή τρίτη:



Εικόνα 3.9: Αρχική εικόνα άνω μέρους ανατολικής εισόδου



Εικόνα 3.10: Αρχική ορθοφωτογραφία άνω μέρους ανατολικής εισόδου. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Πρόβλημα κενών εικονοψηφίδων



Εικόνα 3.11: Τελική ορθοφωτογραφία άνω μέρους ανατολικής εισόδου. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Μέθοδος πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων . Είναι εμφανής ο εσφαλμένος προσδιορισμός των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας.

Η γεωαναφορά των εικόνων ελέγχθηκε στο ελεύθερο λογισμικό Quantum GIS (Qgis). Με την εισαγωγή τους στο λογισμικό οι εικόνες συσχετίστηκαν άμεσα η μία με την άλλη. Μετά από ραδιομετρική επεξεργασία του συνόλου των ορθοφωτογραφιών προέκυψε το παρακάτω ορθοφωτομωσαϊκό:



Εικόνα 3.12: Ορθοφωτομωσαϊκό της ανατολικής εισόδου

Η διαδικασία της οπισθοτομίας κατά την εφαρμογή της μεθόδου στις τρεις προηγούμενες εικόνες έδωσε τα παρακάτω a posteriori τυπικά σφάλματα τα οποία δίνουν μια εκτίμηση της ποιότητας του υπολογισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού:

Εφαρμογή 1η: $\sigma_o = 0.0461\text{mm} = 7 \text{ pixel}$

Εφαρμογή 2η: $\sigma_o = 0.0234\text{mm} = 3.5 \text{ pixel}$

Εφαρμογή 3η: $\sigma_o = 0.1797\text{mm} = 28 \text{ pixel}$

[Η αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων της οπισθοτομίας αναπτύσσεται στην διπλωματική εργασία *“Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις”* της Γ.Τζοβλά]

Είναι προφανές ότι ο υπολογισμός του εξωτερικού προσανατολισμού επηρεάζει άμεσα την γεωμετρική ποιότητα της εικόνας. Αυτό είναι ορατό στην τρίτη εφαρμογή, ιδιαίτερα στον δεξιό κίονα. Τα μεγάλο σφάλμα στον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού οφείλεται αφενός στην ανακρίβεια της επιλογής σημείων από το νέφος και, αφετέρου, στην συγκεκριμένη περίπτωση, στην αδυναμία επιλογής φωτοσταθερών σε όλη την έκταση της εικόνας.

Για την εξακρίβωση της ακρίβειας των ορθοφωτογραφιών πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις αποστάσεων ανάμεσα σε χαρακτηριστικά σημεία του αντικειμένου. Οι αποστάσεις υπολογίστηκαν βάσει της γεωαναφοράς της εικόνας και βάσει διαθέσιμων γεωδαιτικών μετρήσεων. Ο ανεπαρκής αριθμός γεωδαιτικώς μετρημένων σημείων καθώς και η έλλειψη χαρακτηριστικών λεπτομερειών πάνω στους κίονες δεν επέτρεψαν την διεξαγωγή περισσότερων ελέγχων. Για κλίμακα εικόνας 1:50 υπολογίστηκε μέσος όρος σφάλματος περίπου 2.2 εκατοστά, το οποίο δεν είναι αποδεκτό. Είναι σαφές πως για αυτό το σφάλμα ευθύνονται τόσο τα σημεία που επιλέχθηκαν ως φωτοσταθερά όσο και η αραιότητα του νέφους που οδήγησε στην κακή ραδιομετρική αλλά και γεωμετρική ποιότητα της εικόνας. Αντίστοιχοι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν και σε ορθοφωτογραφίες κλίμακας 1:100. Δεδομένου ότι η κλίμακα ήταν κατάλληλη για την συγκεκριμένη πυκνότητα του νέφους, το μέσο σφάλμα υπολογίστηκε περίπου στο 1 εκατοστό.

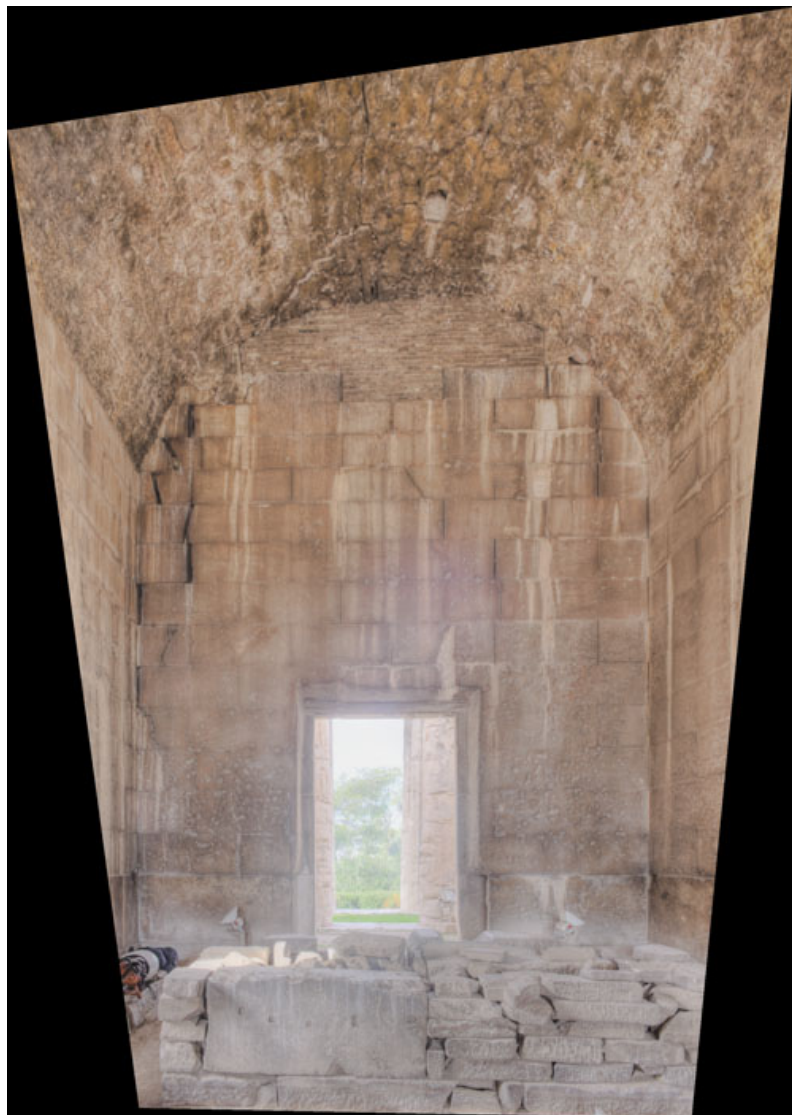
Για επιπρόσθετο έλεγχο μόνο της διαδικασίας της ορθοαναγωγής επαναλήφθηκε η διαδικασία παραγωγής της ορθοφωτογραφίας για το άνω μέρος της ανατολικής εισόδου, ωστόσο αυτή τη φορά δεν χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένα σημεία από το νέφος αλλά τα γεωδαιτικώς μετρημένα σημεία. Η επανάληψη της διαδικασίας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα:



*Εικόνα 3.13: Ορθοφωτογραφία άνω μέρους ανατολικής εισόδου.
Χρήση γεωδαιτικώς μετρημένων φωτοσταθερών.*

Τα κενά που εμφανίζονται αριστερά του πρώτου κίονα και δεξιά του δεύτερου ουσιαστικά οφείλονται στο κυλινδρικό σχήμα των κίωνων και στην έλλειψη πληροφορίας της εικόνας λόγω της γωνίας λήψης. Έτσι κατά την ραδιομετρική παρεμβολή αποδόθηκε λανθασμένη πληροφορία χρώματος στις ψηφίδες.

Για να πραγματοποιηθεί σύγκριση ανάμεσα στα προϊόντα των βασικών διαδικασιών του αλγορίθμου παράχθηκε ορθοφωτογραφία και της δυτικής εισόδου του ναού. Ο καθορισμός του επιπέδου έγινε από τρία σημεία επί της επιφανείας του τοίχου, ούτως ώστε να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα με αντίστοιχη ανηγμένη εικόνα από την διαδικασία της αναγωγής [Τζοβλά, 2013]. Καθώς το νέφος σημείων που αφορούσε την δυτική είσοδο ήταν αρκετά πιο αραιό, χρησιμοποιήθηκε κλίμακα 1:100.



Εικόνα 3.15: Εφαρμογή αλγορίθμου αναγωγής στην δυτική είσοδο, Κλίμακα 1:100



Εικόνα 3.16: Ορθοφωτογραφία δυτικής εισόδου. Κλίμακα 1:100. Καθορισμός επιπέδου από 3 σημεία.

Οι έλεγχος στις δύο εικόνες πραγματοποιήθηκε με σύγκριση αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν 3 αποστάσεις με και η μεταξύ τους σύγκριση έδωσε διαφορές λιγότερο από 1 cm:

	Απόσταση 1η (m)	Απόσταση 2η (m)	Απόσταση 3η (m)
Ανηγμένη εικόνα	3,7007	3,6101	4,8017
Ορθοφωτογραφία	3,6932	3,6082	4,7944
Διαφορά	0,0075	0,0019	0,0073

4. Προβλήματα και επεκτάσεις

Κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, σε συνδυασμό με την διπλωματική *“Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις”* της Γ.Τζοβλά [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. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δυσκολία εφαρμογής της μεθόδου στο αντικείμενο. Παρακάτω αναλύονται τα σημαντικότερα από τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν, δίνοντας έναυσμα για βελτιώσεις και επεκτάσεις.

4.1. Επιλογή σημείων και εξωτερικός προσανατολισμός εικόνας

Μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες που εντοπίστηκαν αφορούσε στην ακριβή επιλογή των σημείων του νέφους που θα λειτουργούσαν ως φωτοσταθερά. Όπως προαναφέρθηκε, το μειονέκτημα των νεφών σημείων είναι η ανακρίβεια στον προσδιορισμό των ακμών, γεγονός που δυσχεραίνει τον εντοπισμό χαρακτηριστικών γωνιών και εξάρσεων του αναγλύφου σε αυτό. Έτσι, παρά την πυκνότητα του νέφους, ήταν αρκετά δύσκολος ο προσδιορισμός της ακριβούς θέσης των χαρακτηριστικών σημείων που εμφανίζονταν στην εικόνα. Επιπρόσθετα σε αυτό το πρόβλημα, το αντικείμενο μελέτης δεν εμφάνιζε έντονο ανάγλυφο, ενώ η επιλογή σημείων επάνω στους κίονες ήταν απαγορευτική λόγω της κυλινδρικής τους επιφάνειας, με αποτέλεσμα

να περιορίζονται οι δυνατότητες δοκιμών με διαφορετικούς συνδυασμούς σημείων. Τα σημεία επιλέχθηκαν αρκετά δύσκολα και πολλές φορές ήταν απαραίτητη η επανάληψη της διαδικασίας έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. 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 αλγόριθμο και ιδιαίτερα στον υπολογισμό των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού, επηρεάζοντας άμεσα την μετέπειτα διαδικασία της ορθοαναγωγής.

Ο προσδιορισμός του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας πραγματοποιήθηκε μονοεικονικά, με την μέθοδο της οπισθοτομίας, η οποία απαιτεί τουλάχιστον 4 σημεία για την ελαχιστοτετραγωνική επίλυσή της. Ωστόσο, λόγω του ότι οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται δεν είναι γραμμικές, η μέθοδος απαιτεί την εισαγωγή προσωρινών τιμών. Για τον υπολογισμό των προσωρινών τιμών προηγήθηκε της οπισθοτομίας η εφαρμογή του άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού, αυξάνοντας τα ελάχιστα απαιτούμενα σημεία σε 6. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί περαιτέρω η ακρίβεια υπολογισμού του εξωτερικού προσανατολισμού, λόγω εισαγωγής περισσότερων σημείων άρα και περισσότερων σφαλμάτων. Όσον αφορά στην ίδια την επίλυση, αρχικά, η στροφή των συστημάτων αποφεύχθηκε, με σκοπό την πλήρη αυτοματοποίηση της μεθόδου. Καθώς είναι δύσκολο να καθοριστεί ένα κύριο επίπεδο σε αντικείμενα με έντονο ανάγλυφο, θεωρήθηκε καλύτερο να μη απαιτείται από το χρήστη η επιλογή σημείων για τον καθορισμό της απαιτούμενων στροφών. Ωστόσο αυτή η μέθοδος δεν λειτούργησε σε όλες τις περιπτώσεις. Με στροφή του συστήματος επιτεύχθηκε ορθότερος προσδιορισμός του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε λήψης, ο οποίος όμως πάλι εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια και ποιότητα των αρχικών μετρήσεων στο νέφος.



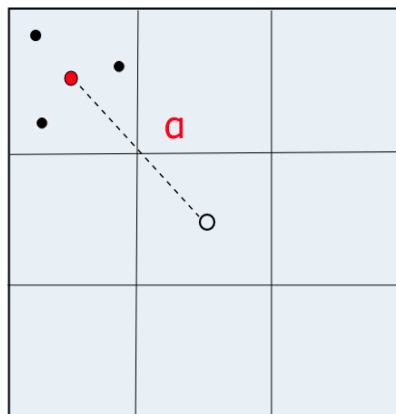
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα δυσκολίας επιλογής χαρακτηριστικών σημείων

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να γίνει χρήση ειδικών στόχων οι οποίοι θα σαρώνονται με μεγαλύτερη πυκνότητα από το σαρωτή και ταυτόχρονα θα είναι δυνατός ο εντοπισμός τους σε κάθε εικόνα. Οι στόχοι αυτοί θα χρησίμευαν 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. Ακόμα και σε περιπτώσεις που η επαφή με το αντικείμενο είναι απαγορευτική, η ίδρυσή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση τριπόδων. Δεδομένου ότι τέτοιοι στόχοι χρησιμεύουν και στη συρραφή νεφών,

η απαιτούμενη διαδικασία για την ίδρυση τους δεν επιφέρει αναγκαστικά παραπάνω εργασία στο πεδίο. Στην περίπτωση του Ναού του 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.

4.2. Σφάλματα μεθόδου παρεμβολής στο νέφος

Ένα ακόμη πρόβλημα που εντοπίστηκε ήταν τα σφάλματα που εισάγονται εξαιτίας της μεθόδου παρεμβολής στο νέφος. Καθώς δεν πραγματοποιήθηκε κάποια τεχνική τριγωνισμού του νέφους ώστε να προκύψει μία ενιαία επιφάνεια, αλλά προτιμήθηκε μία μέθοδος παρεμβολής σε διακριτά δεδομένα, ενδέχεται να εισάγεται ανακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των κέντρων των εικονοψηφίδων, ανάλογα με την πυκνότητα του διαθέσιμου νέφους. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, σε περιπτώσεις που η μάσκα εντοπίζει σημεία μόνο σε μία πλευρά ή σε ένα τεταρτημόριο, ο μέσος όρος που υπολογίζεται δεν αποδίδει ορθές συντεταγμένες στο κέντρο του pixel.



Εικόνα 4.2: Περίπτωση προβληματικού υπολογισμού του M.O.

Το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να υπολογιστεί είναι $a_{2D} = (mask/2) * GSD * \sqrt{2}$, υποθέτοντας την ακραία περίπτωση να εντοπίζεται μόνο ένα σημείο σε μία από τις γωνίες της μάσκας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η τελική παρεμβολή γίνεται στον τρισδιάστατο χώρο των σημείων με την εφαρμογή ενός ορθογώνιου παραλληλόγραμμου αναζήτησης, το τελικό σφάλμα που μπορεί να εισαχθεί είναι $a_{3D} = \sqrt{a_{2D}^2 + d^2}$ όπου $d = GSD$ το όριο ανοχής που εφαρμόζεται για την απόρριψη των όπισθεν σημείων (βλ. Κεφ.: 2.2.2). Είναι σαφές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάσκα που επιλέγεται και όσο μεγαλύτερη είναι η επιλεγμένη κλίμακα και κατά συνέπεια η εδαφοψηφίδα, το σφάλμα ενδέχεται να μεγαλώνει. Συγκεκριμένα για κλίμακα 1:50 είναι πιθανά τα παρακάτω μέγιστα σφάλματα:

Μάσκα 3X3: 0.0117

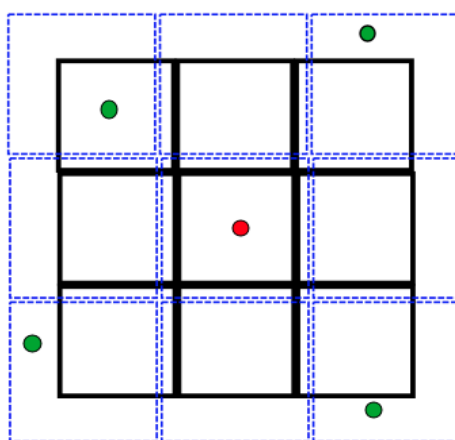
Μάσκα 5X5: 0.0184

Μάσκα 7X7: 0.0252

Όπως παρατηρείται, το σφάλμα για την μάσκα 3X3 είναι οριακό για την επιθυμητή ακρίβεια της ορθοφωτογραφίας, ενώ για τις υπόλοιπες μάσκες ξεπερνά το επιτρεπτό όριο των 1.25cm. Παρότι αυτά τα σφάλματα αναφέρονται ακραίες περιπτώσεις εύρεσης σημείου μόνο σε μία γωνία του “κουτιού” αναζήτησης, σε περίπτωση όχι αρκετά πυκνού νέφους, αρκετές εικονοψηφίδες της ορθοφωτογραφίας θα βρίσκονται στο μεταίχμιο του να χαρακτηριστούν ως κενές (“μαύρες”) ή να τους αποδοθούν λανθασμένες συντεταγμένες.

Ουσιαστικά το πρόβλημα της μεθόδου παρεμβολής καθορίζει και την απαιτούμενη πυκνότητα του νέφους. Δεδομένου ότι κατά την παρεμβολή θα πρέπει να εντοπίζεται παραπάνω από 1 σημείο εντός της μάσκας, η πυκνότητα του νέφους θα πρέπει να είναι μικρότερη από 3 εδαφοψηφίδες, δηλαδή στην περίπτωση του της κλίμακας 1:50 θα πρέπει το αντικείμενο να είναι σαρωμένο με πυκνότητα αρκετά μικρότερη του 1.5cm. Έτσι η βέλτιστη λύση για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου είναι η πιο πυκνή σάρωση.

Μία άλλη προτεινόμενη λύση για αυτό το πρόβλημα, είναι μια παραλλαγή της μεθόδου που χρησιμοποιείται για αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος σε κυκλικά παράθυρα αναζήτησης. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, εάν η μάσκα εντοπίζει σημεία μόνο εντός ενός τεταρτημορίου της, τότε τοπικά γύρω από την συγκεκριμένη εικονοψηφίδα αυξάνει το μέγεθος της μέχρι να εντοπίζει τουλάχιστον ένα σημείο σε κάθε τεταρτημόριο, βελτιώνοντας τον υπολογισμό του μέσου όρου. Προφανώς το μέγεθος αυτό θα πρέπει να αυξάνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο. [Τσούλος, 2004]



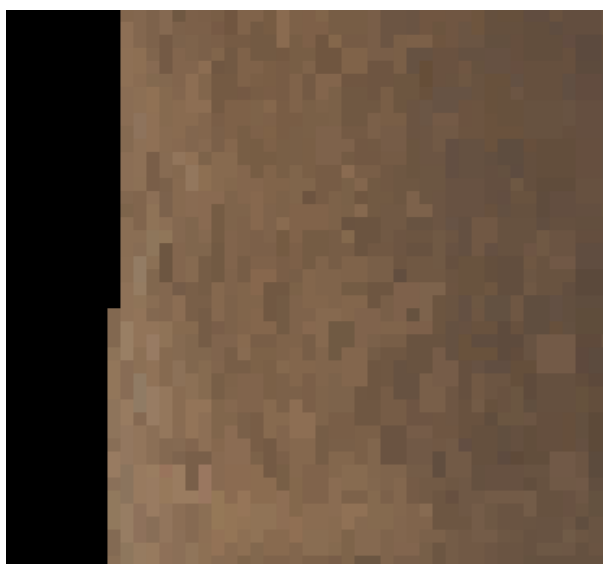
Εικόνα 4.3: Μέθοδος τοπικής αύξησης μεγέθους μάσκας

4.3. Ανομοιογένεια τόνων

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι σαφές πως σε περιπτώσεις αραιού νέφους όλες οι μετέπειτα διαδικασίες της ορθοαναγωγής επηρεάζονται από την παρεμβολή σε αυτό. Αν ο μέσος όρος των σημείων εντός της μάσκας δεν εκφράζει τις επιθυμητές συντεταγμένες του κέντρου του εικονοστοιχείου, η εφαρμογή της αντίστροφης συνθήκης συγγραμμικότητας αποδίδει επίσης λάθος θέση πάνω στο φωτογραφικό επίπεδο της αρχικής εικόνας και ο αφινικός μετασχηματισμός δίνει εσφαλμένες συντεταγμένες pixel. Έτσι η ανακρίβεια που αποδίδεται κατά την παρεμβολή στο νέφος μεταφέρεται στο σημείο που προσπίπτει (αντιστρόφως) η προβολική ακτίνα επάνω στην αρχική εικόνα.

Τα αποτελέσματα αυτής της ανακρίβειας δεν είναι ορατά άμεσα στην εικόνα, ωστόσο μεγεθύνοντας τοπικά παρατηρείται ανομοιογένεια των τόνων στα εικονοστοιχεία.

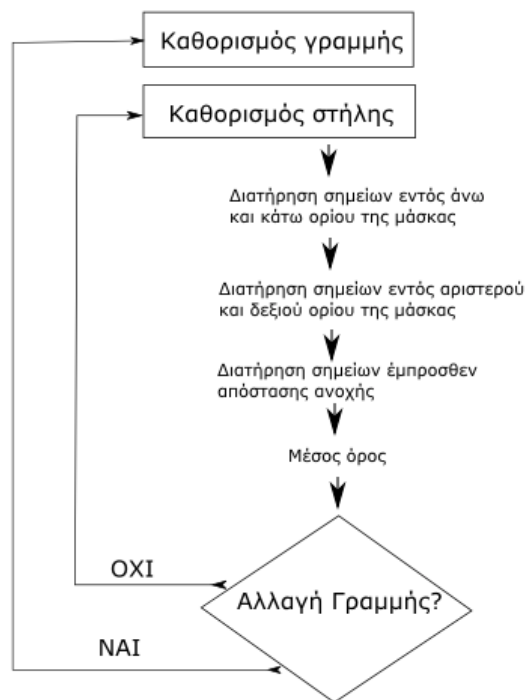
Ακόμα όμως και σε περιπτώσεις πυκνότερου νέφους αυτό το φαινόμενο δεν εκλείπει. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων της παρεμβολής στο νέφος δεν εξαρτάται μόνο από την πυκνότητα των σημείων αλλά και από την ακρίβεια με την οποία αυτά έχουν μετρηθεί. Έτσι η ραδιομετρική ποιότητα της ορθοφωτογραφίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ακρίβεια που προσφέρει ο σαρωτής και αυτό είναι ορατό ιδιαίτερα σε κυλινδρικές επιφάνειες όπως των κιόνων. Καθώς η μάσκα εμπίπτει πάνω στο νέφος μπορεί τα σημεία που βρίσκει εντός της να εμφανίζουν ανακρίβεια προς οποιαδήποτε διεύθυνση. Η ανακρίβεια προς την διεύθυνση της απόστασης του αντικειμένου από το επίπεδο προβολής, η οποία εκφράζεται ως σφάλμα του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας στα υψόμετρα, μπορεί να επηρεάσει αρκετά τον μέσο όρο που υπολογίζεται. Έτσι η ανακρίβεια των σαρωμένων σημείων δίνουν και την ανακρίβεια με την οποία θα προσπίπτει η ακτίνα επάνω στο φωτογραφικό επίπεδο. Δημιουργώντας ένα κύκλο γύρω από την θεωρητικά σωστή θέση στο φωτογραφικό επίπεδο της αρχικής εικόνας, η λήψη του χρώματος μπορεί να γίνει εσφαλμένα από οποιοδήποτε ρixel εντός. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η πυκνή σάρωση με ακρίβειες καλύτερες του μεγέθους της επιλεγμένης εδαφοψηφίδας.



Εικόνα 4.4: Ανομοιογένεια τόνων. Τοπική μεγέθυνση ορθοφωτογραφίας 1:100

4.4. Αντιμετώπιση αυξημένου χρόνου λειτουργίας

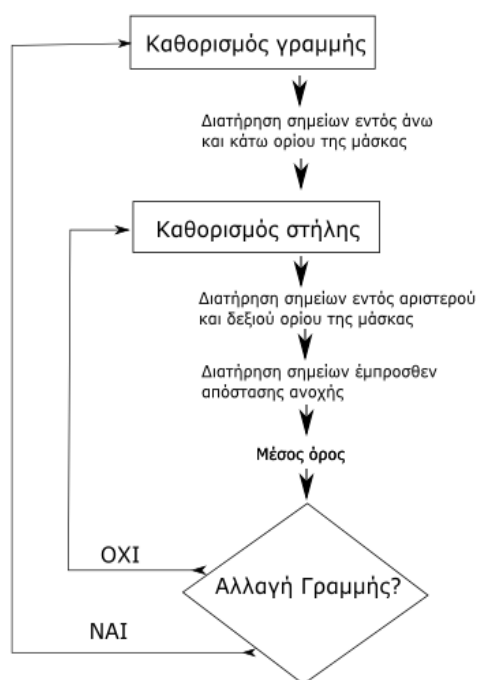
Ένα ακόμα πρόβλημα το οποίο παρουσιάστηκε κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου ήταν ο αυξημένος χρόνος που απαιτείτο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ορθοαναγωγής. Αρχικά ο χρόνος δημιουργίας μίας ορθοφωτογραφίας με επιλεγμένη κλίμακα 1:50, μπορεί να ξεπερνούσε τις 4 ώρες. Αυτό το πρόβλημα έδωσε το έναυσμα για την διαδικασία το προσεγγιστικού περιορισμού του νέφους σημείων, η οποία συνέβαλε στην μείωση του χρόνου. Ωστόσο, το μεγαλύτερο πρόβλημα καθυστέρησης προκαλείτο κατά την παρεμβολή στο νέφος καθώς η μάσκα, για τον εντοπισμό των σημείων εντός της, “έψαχνε” ολόκληρο το αρχείο του νέφους εκ νέου για κάθε εικονοψηφίδα. Η αρχική διάρθρωση του αλγορίθμου είχε ως εξής:



Εικόνα 4.5: Αρχική διάρθρωση διαδικασίας παρεμβολής στο νέφος

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος περιορισμού του νέφους ώστε η διαδικασία να μην επαναλαμβάνεται εξ αρχής για κάθε εικονοψηφίδα. Δεδομένου ότι το μέγεθος της μάσκας μένει αναλλοίωτο κατά την

εφαρμογή του και ότι ο καθορισμός των ορίων γίνεται με βάση τις συντεταγμένες pixel των κέντρων των εικονοψηφίδων, τα άνω και κάτω όρια μένουν σταθερά για κάθε γραμμή εικονοψηφίδων, ενώ τα αριστερά και δεξιά όρια μεταβάλλονται. Αντίστοιχα για κάθε στήλη εικονοψηφίδων διατηρούνται τα ίδια αριστερά και δεξιά όρια και μεταβάλλονται τα άνω και κάτω. Στον αλγόριθμο η επανασύσταση της εικόνας πραγματοποιείται από γραμμή σε γραμμή του κανάβου της ορθοφωτογραφίας. Έτσι, μεταβάλλοντας την διάρθρωση του αλγορίθμου, κατά την εφαρμογή της μάσκας σε καινούρια γραμμή εικονοψηφίδων εντοπίζονται τα σημεία εντός άνω και κάτω ορίου της, δημιουργώντας μία οριζόντια “λωρίδα” σημείων. Αυτή η “λωρίδα” διατηρείται για όλες τις επόμενες εικονοψηφίδες της γραμμής. Η διαδικασία παρεμβολής στο αρχικό νέφος σημείων επαναλαμβάνεται μόνο κατά την αλλαγή γραμμών επί του κανάβου της ορθοφωτογραφίας, μειώνοντας ικανοποιητικά τον χρόνο παραγωγής, για νέφος 220.000 σημείων και κλίμακα 1:50, σε λιγότερο από 3 λεπτά.



Εικόνα 4.6: Τελική διάρθρωση διαδικασίας παρεμβολής στο νέφος

5. Συμπεράσματα

Όπως είναι προφανές από τα παραπάνω, η προτεινόμενη μέθοδος παραγωγής φωτογραμμετρικών προϊόντων μεγάλης κλίμακας είναι εφικτή, ωστόσο για την επίτευξη καλύτερων ακριβειών και εφαρμογής της στην τεκμηρίωση μνημείων απαιτείται περισσότερη έρευνα. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι η γεωμετρική ακρίβεια των προϊόντων της συγκεκριμένης μεθόδου εξαρτάται από περισσότερες πηγές σφαλμάτων συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους. Συγκεκριμένα τα τελικά αποτελέσματα μπορεί να επηρεάζονται από τα εξής σφάλματα:

- Σφάλμα του κάθε ενός επιλεγμένου σημείου από το νέφος, λόγω αδυναμίας προσδιορισμού ακριβούς θέσης χαρακτηριστικών λεπτομερειών.
- Σφάλμα των αντίστοιχων σκοπευόμενων σημείων στην εικόνα. Το σφάλμα αυτό εξαρτάται από την ραδιομετρική ποιότητα και ανάλυση της εικόνας, αλλά και από τον παρατηρητή.
- Σφάλματα αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού. Αυτά τα σφάλματα συνήθως είναι πολύ μικρά, ωστόσο μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού.
- Σφάλμα του Ψηφιακού Μοντέλου Επιφανείας - Νέφους σημείων. Το συγκεκριμένο σφάλμα αναφέρεται στην ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων των σημείων από τον σαρωτή laser και αποτελεί σημαντική πηγή σφάλματος της τελικής ποιότητας της ορθοφωτογραφίας.
- Σφάλμα υπολογισμού εξωτερικού προσανατολισμού. Η ποιότητα του υπολογισμού του εξωτερικού προσανατολισμού εξαρτάται τόσο από την ποιότητα μετρήσεων των εικονοσυντεταγμένων, όσο και από την επιλογή σημείων από το νέφος, αλλά και από την γεωμετρία των επιλεγμένων σημείων και την ικανότητα τους να καλύπτουν όλη την εικόνα
- Σφάλμα μεθόδου παρεμβολής στο νέφος. Το σφάλμα αυτό εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα του νέφους και από την επιθυμητή κλίμακα.

Επίσης, η οπτική ποιότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Μέθοδος ραδιομετρικής παρεμβολής
- Επιλεγμένη Μάσκα Παρεμβολής στο νέφος
- Ραδιομετρική Ποιότητα αρχικής εικόνας
- Μέθοδος πλήρωσης κενών.
- Ακρίβεια και πυκνότητα νέφους

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου και κατά την ανάπτυξη του αλγορίθμου, προέκυψαν αρκετές προδιαγραφές για την εφαρμογή της, οι οποίες αφορούν κυρίως τις διαδικασίες συλλογής δεδομένων και μπορούν να οδηγήσουν σε αποτελέσματα με την επιθυμητή ακρίβεια. Συγκεκριμένα η σάρωση του αντικειμένου θα πρέπει να πραγματοποιείται με μικρό βήμα και από μικρή απόσταση. Ο λόγος του βήματος προς την απόσταση είναι άμεσα συνδεδεμένος με εδαφοψηφίδα των τελικών ορθοφωτογραφιών, επομένως πριν ξεκινήσει η διαδικασία της σάρωσης θα πρέπει να έχει ήδη αποφασιστεί η μέγιστη κλίμακα των προϊόντων που θα παραχθούν. Για κλίμακα ορθοφωτογραφίας 1:50 απαιτείται σάρωση με βήμα 5mm περίπου. Επίσης η σάρωση θα πρέπει να πραγματοποιείται με σαρωτές ακριβείας, κατά προτίμηση σαρωτές διαφοράς φάσης, ώστε η ακρίβεια μετρήσεων από τον κατασκευαστή να μην υπερβαίνει το μέγεθος της εδαφοψηφίδας.

Καθώς η μέθοδος απαιτεί τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων στο νέφος, τα αντικείμενα εφαρμογής θα πρέπει να εμφανίζουν έντονο ανάγλυφο και να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής τουλάχιστον 6 χαρακτηριστικών λεπτομερειών τόσο στο αντικείμενο όσο και στην κάθε εικόνα. Σε περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό, η ίδρυση ειδικών στόχων υψηλής πυκνότητας σάρωσης βελτιώνουν σημαντικά τα σφάλματα κατά την επιλογή των φωτοσταθερών. Επίσης στα αντικείμενα εφαρμογής θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού ενός κύριου επιπέδου ώστε να είναι εφικτή η στροφή του συστήματος.

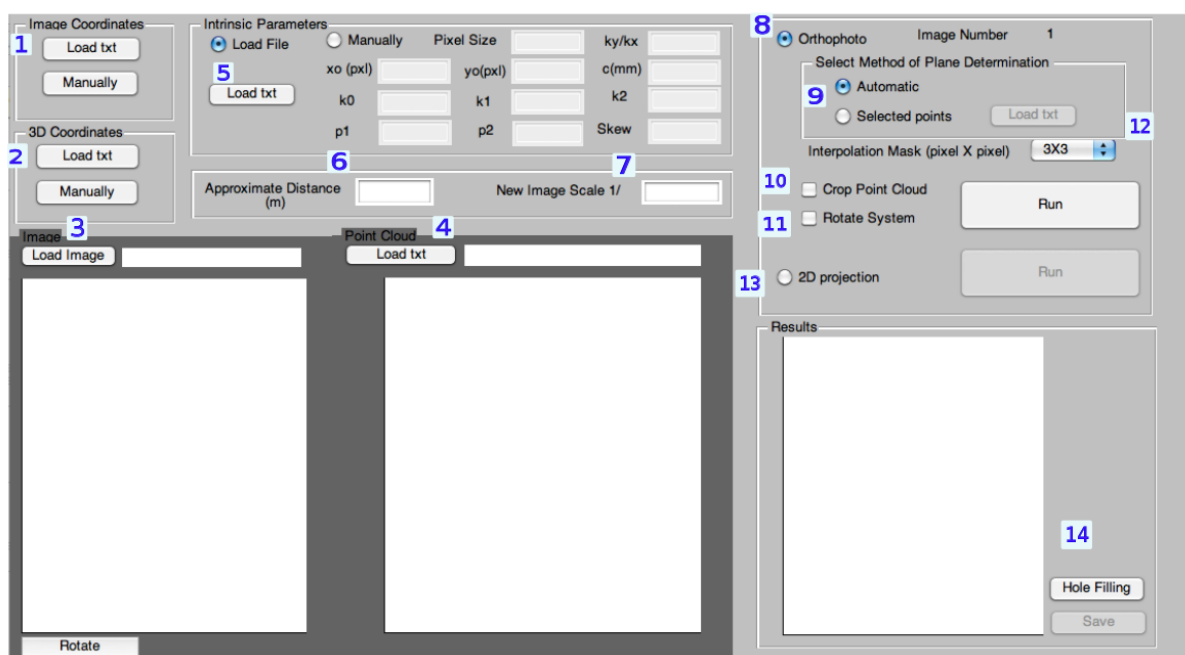
Όσον αφορά στις απαραίτητες λήψεις, οι απαιτούμενες προδιαγραφές καθορίζονται

από την επιλογή του επιπέδου προβολής. Συγκεκριμένα για τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε ισχύουν οι εξής περιορισμοί. Για την αυτόματη μέθοδο απαιτούνται λήψεις σχεδόν παράλληλες με την κύρια επιφάνεια του αντικειμένου, ενώ ο καθορισμός του επιπέδου από δύο μόνο σημεία δημιουργεί ορθοφωτογραφίες με μετρητική πληροφορία μόνο για αντικείμενα που μπορούν να θεωρηθούν κατακόρυφα. Ο καθορισμός του επιπέδου από τρία σημεία δεν ενέχει κανένα περιορισμό, ωστόσο σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει οι λήψεις να γίνονται κατακόρυφα πάνω από το αντικείμενο. Επίσης, η διαδικασία των λήψεων θα πρέπει να πραγματοποιείται με βαθμονομημένη κάμερα ώστε να είναι δυνατή η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού της εικόνας. Οι εικόνες θα πρέπει να έχουν ικανοποιητική ανάλυση και φυσικά η κλίμακα τους να επιτρέπει την επιθυμητή κλίμακα των τελικών ορθοφωτογραφιών.

Βάσει των παραπάνω προϋποθέσεων η συγκεκριμένη μέθοδος δύναται να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, τόσο σε ακρίβεια όσο και σε οπτική ποιότητα, απαλλάσσοντας τις φωτογραμμετρικές διαδικασίες από το μικρό αλλά επιβαρυντικό κομμάτι των γεωδαιτικών μετρήσεων. Δεδομένου ότι η τεχνολογία των σαρωτών laser ακολουθεί ανοδική πορεία μπορούν μακροπρόθεσμα να επιτευχθούν ακόμη καλύτερες ακρίβειες μέσω αυτής της μεθόδου.

6. Εγχειρίδιο χρήσης

Η δημιουργία ενός διαδραστικού παραθύρου (interface) προσδίδει σε έναν αλγόριθμο αρκετά πλεονεκτήματα, με βασικότερα την αμεσότητα και φιλικότητα προς το χρήστη καθώς και την γρήγορη και εύκολη εναλλαγή των στοιχείων εισαγωγής. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, καθώς και της διπλωματικής εργασίας “Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις”, της Γ. Τζοβλά [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

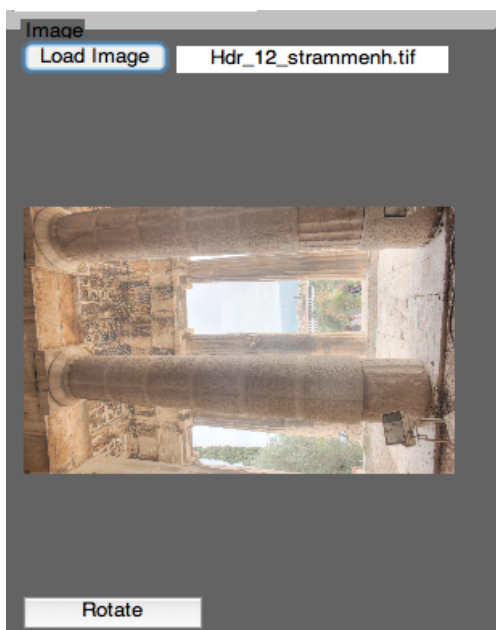
Η εισαγωγή των δεδομένων δεν απαιτεί κάποια συγκεκριμένη σειρά, ωστόσο για την ορθή απεικόνιση στα βοηθητικά παράθυρα είναι προτιμότερο να εισάγονται πρώτα οι συντεταγμένες 3D και μετά το νέφος σημείων. Τα αρχεία .txt τα οποία εισάγονται στον λογισμικό είναι της μορφής ascii και απαιτούν ως διαχωριστικό δεκαδικών μία τελεία (('.'), ενώ ως διαχωριστικό στηλών ένα κόμμα (','). Οποιαδήποτε αλλαγή στα αρχεία txt απαιτεί την επανεισαγωγή 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

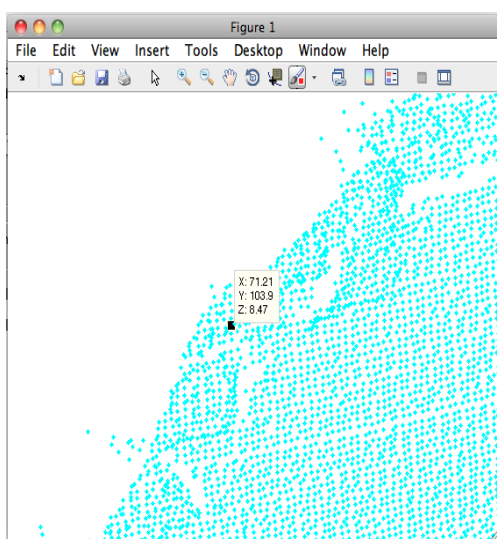
Οι συντεταγμένες pixel μπορούν να εισαχθούν με 2 τρόπους στο πρόγραμμα. Ο ένας είναι με απλή εισαγωγή ενός αρχείου txt, με τις προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν, το οποίο θα περιέχει τις συντεταγμένες pixel όπως αυτές μετρήθηκαν πάνω στην εικόνα με αφετηρία την πάνω αριστερά γωνία. Η πρώτη στήλη του πίνακα 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.

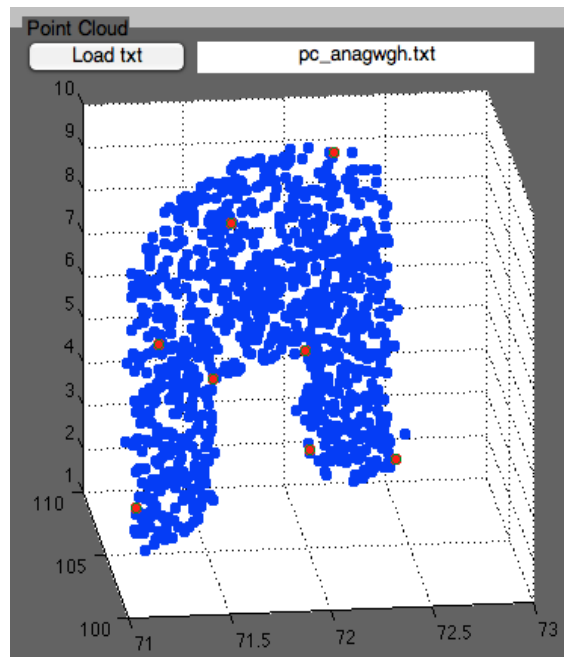


Εικόνα 6.3: Βοηθητικό παράθυρο σκόπευσης στο νέφος.

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.

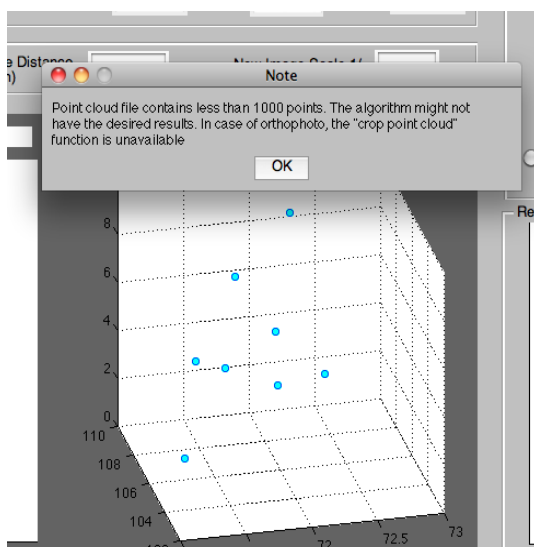
6.2.4. Εισαγωγή νέφους σημείων

Το νέφος σημείων εισάγεται στο πρόγραμμα σε μορφή txt. Οι συντεταγμένες των σημείων θα πρέπει να σχηματίζουν ένα πίνακα $n \times 3$, η είναι ο αριθμός των διαθέσιμων σημείων. Οι τρεις στήλες περιέχουν τις συντεταγμένες X,Y,Z. Ο αλγόριθμος αναγνωρίζει και πίνακα $n \times 4$ 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 παράθυρο 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 αυτό νέφος εμφανίζεται με μπλε χρώμα. Σε περίπτωση που οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των επιλεγμένων 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 χρώμα συμβολίζει να μην 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:

x_0 (pxl)
 y_0 (pxl)
 C (mm)
Μέγεθος pixel
λόγος κλιμάκων k_y / k_x
Pixel Skewness
Συντελεστές ακτινικής διαστρόφης k_0, k_1, k_2
συντελεστές εφαπτομενικής διαστρόφης p_1, p_2 .

6.3. Λειτουργίες και αποθήκευση

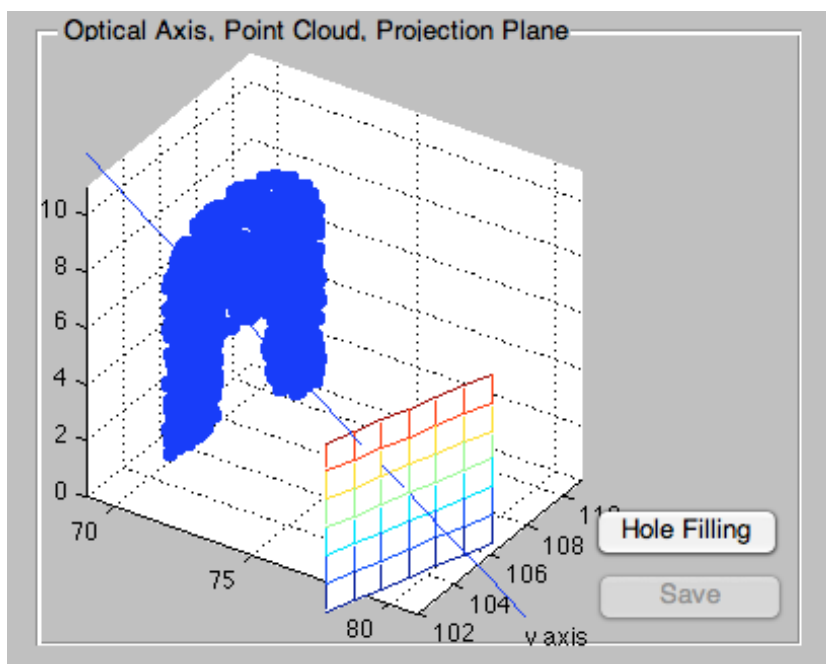
Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στην παραγωγή μίας ορθοφωτογραφίας ή μίας ανηγμένης εικόνας. Εφόσον εισαχθούν τα κατάλληλα δεδομένα η διαδικασία της αναγωγής μπορεί να ξεκινήσει κατευθείαν με πάτημα του κουμπιού Run. Για την διαδικασία της ορθοφωτογραφίας χρειάζονται μερικές ακόμα διευκρινήσεις από τον χρήστη. Αρχικά πρέπει να επιλεγεί 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 να 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 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 επιλεγθεί 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 επιλεγθεί μορφή αρχείου από .jpg, η κατάληξη του αρχείου γεωαναφοράς θα πρέπει να μεταβάλλεται χειροκίνητα από .twf σε .jrw ώστε να συμβαδίζει με την επιλεγμένη μορφή εικόνας.

Αν το νέφος είναι αραιό και έχει επιλεγθεί 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 ενδιάμεσως 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_distortion	Εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού χωρίς αποκατάσταση ακτινικής και ασύμμετρης διαστρόφης
affine_transformation	Εφαρμογή αφινικού μετασχηματισμού και αποκατάσταση ακτινικής και ασύμμετρης διαστρόφης
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 στρόφης
resection_eop	Υπολογισμός εξωτερικού προσανατολισμού
rotation_and_translation	Εφαρμογή στρόφης και μετάθεσης

Επιπροσθέτως στα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω έτοιμες συναρτήσεις, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην κεντρική σελίδα του Matlab [6], 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

Ελληνική Βιβλιογραφία:

1. Γεωργόπουλος Α.(1998), *Σημειώσεις Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας*, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.
2. Γκαρούτσος Γ. Β. (2008), *Μαθήματα Γραμμικής Άλγεβρας και Αναλυτικής Γεωμετρίας*, Αθήνα: SPIN
3. Ιωαννίδης Χ. (2007), *Συμπληρωματικές σημειώσεις για το μάθημα Φωτογραμμετρία II*
4. Καρράς Γ. (1998), *Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων Στη Φωτογραμμετρία*, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.
5. Καρράς Γ., Πέτσα Ε. (1998), *Στοιχεία Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας* (Μετάφραση), Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.
6. Μπαντέκας Ι. (1980), *Φωτογραμμετρία Τόμος I*, Αθήνα
7. Νάτσης Σ. (2008), *Σύνταξη λογισμικού για την εφαρμογή εναλλακτικής μεθόδου παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας*, Διπλωματική εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.
8. Πατιάς Π. (1991), *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*, Θεσσαλονίκη: Ζήτη
9. Πέτσα Ε. (2000), *Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*
10. Τζοβλά Γ. (2013), *Ανάπτυξη Λογισμικού Μονοεικονικών Φωτογραμμετρικών Διαδικασιών Χωρίς Γεωδαιτικές Μετρήσεις*, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π
11. Τσούλος Λ. (2004), *Ψηφιακή Χαρτογραφία*, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π

Ξένη Βιβλιογραφία

1. 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
2. Deakin R. (2005), **Plane Lines and Direction Cosines**, RMIT
3. Diebel J. (2006), **Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors**, Stanford University Stanford, California
4. McGlone J. C. et al. (Editors), (2004), **Manual of Photogrammetry**, Fifth Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Βοηθητικό Ιστολόγιο:

- [1]. www.123dapp.com/catch (Τελευταία επίσκεψη: 29/06/2013)
- [2]. www.mathworld.wolfram.com (Τελευταία επίσκεψη: 29/06/2013)
- [3]. Ritter N. & Ruth M. (2000), "GeoTIFF Revision 1.0", www.remotesensing.org/geotiff (Τελευταία επίσκεψη: 29/06/2013)
- [4]. "World files for raster datasets", webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3 (Τελευταία επίσκεψη: 29/06/2013)
- [5]. www.wikipedia.org (Τελευταία επίσκεψη: 29/06/2013)
- [6]. www.mathworks.com (Τελευταία επίσκεψη: 29/06/2013)

Παράρτημα

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα διάρθρωσης αλγορίθμου.....	3
Εικόνα 1.1: Συστήματα αναφοράς	9
Εικόνα 1.2: Στροφή στερεού με αρχή αξόνων στο κέντρο βάρους και εκτός κέντρου βάρους.....	10
Εικόνα 1.3: Γωνίες Euler ZXZ.....	11
Εικόνα 1.4: Η σειρά στροφών, όπως ορίζεται στην φωτογραμμετρία. Κάθε μία επακολουθεί της προηγούμενης. [Πηγή: Πέτσα, 2000].....	12
Εικόνα 1.5: Γωνίες Διεύθυνσης.....	13
Εικόνα 2.1: Σχήμα 1: Λάθος σημείο λήψης, Σχήμα 2: Σωστό σημείο λήψης.....	18
Εικόνα 2.2: Υπολογισμός γωνίας θ	27
Εικόνα 2.3: Διαδικασία Ορθοαναγωγής.....	29
Εικόνα 2.4: Δυσκολία προσδιορισμού διάστασης κατά γ άξονα της ορθοφωτογραφίας, λόγω κεκλιμένου επιπέδου.....	31
Εικόνα 2.5: Υπολογισμός διάστασης κατά άξονα x της ορθοφωτογραφίας.....	32
Εικόνα 2.6: Πρόβλημα ακραίων γραμμών και στηλών.	36
Εικόνα 2.7: Σχετική Θέση Νέφους και Επιπέδου Προβολής, Κάτοψη. Τα βέλη υποδεικνύουν τη φορά κατά την οποία γίνεται το “γέμισμα” της εικόνας.	38
Εικόνα 2.8: Περίπτωση συρραφής νεφών. Εσφαλμένος υπολογισμός μέσου όρου	40
Εικόνα 2.9: Περίπτωση συρραφής νεφών. Περιοχή εντός της οποίας τα σημεία διατηρούνται.....	41
Εικόνα 2.10: Περίπτωση εναλλαγής αναγλύφου. Περιοχή εντός της οποίας τα σημεία διατηρούνται.....	41
Εικόνα 2.11: Αρχική Ορθοφωτογραφία με χρήση μάσκας 3X3, στην οποία εμφανίζονται κενές ψηφίδες.....	42
Εικόνα 2.12: Μετά την εφαρμογή της μεθόδου χρωματισμού εικονοψηφίδων.....	42

Εικόνα 2.13: Εφαρμογή μάσκας 5X5.....	42
Εικόνα 2.14: Διγραμμική Παρεμβολή.....	47
Εικόνα 2.15: Το pixel (0,0) έχει συντεταγμένες και κάθε επόμενο pixel έχει συντεταγμένες	52
Εικόνα 2.16: Το pixel(2,1) έχει συντεταγμένες	52
Εικόνα 2.17: Μορφή αρχείου tfw.....	53
Εικόνα 2.18: Διατήρηση κοινής γεωαναφοράς ορθοφωτογραφιών προβεβλημένων στο ίδιο επίπεδο.....	54
Εικόνα 2.19: Με λευκό απεικονίζονται τα σημεία του νέφους για τα οποία πραγματοποιήθηκε η ορθοαναγωγή αλλά δεν εντοπίστηκαν σημεία εντός της εικόνας .	55
Εικόνα 2.20: Με εφαρμογή της απόστασης Dx' καλύπτονται το επιθυμητό κομμάτι του νέφους.....	57
Εικόνα 2.21: Με εφαρμογή απόστασης Dx μπορεί να αποκοπούν σημαντικά κομμάτια από το νέφος, λόγω κεντρικής προβολής.....	57
Εικόνα 2.22: Υπολογισμός οριών για περιορισμό του νέφους.....	58
Εικόνα 3.1: Ανατολική είσοδος ναού.....	59
Εικόνα 3.2: Δυτική είσοδος ναού.....	59
Εικόνα 3.3: Αρχική εικόνα αριστερού κίονα.....	60
Εικόνα 3.4: Αρχική ορθοφωτογραφία αριστερού κίονα. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Πρόβλημα κενών εικονοψηφίδων	61
Εικόνα 3.5: Τελική ορθοφωτογραφία αριστερού κίονα. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Διαδικασία πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων	62
Εικόνα 3.6: Αρχική εικόνα κίωνων. Παρατηρούνται έντονες στροφές λήψης.....	63
Εικόνα 3.7: Αρχική ορθοφωτογραφία κίωνων. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Πρόβλημα κενών εικονοψηφίδων	64
Εικόνα 3.8: Τελική ορθοφωτογραφία κίωνων. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Μέθοδος πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων	65
Εικόνα 3.9: Αρχική εικόνα άνω μέρους ανατολικής εισόδου.....	66

Εικόνα 3.10: Αρχική ορθοφωτογραφία άνω μέρους ανατολικής εισόδου. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Πρόβλημα κενών εικονοψηφίδων	67
Εικόνα 3.11: Τελική ορθοφωτογραφία άνω μέρους ανατολικής εισόδου. Κλίμακα 1:50, Καθορισμός επιπέδου παράλληλο με την ακμή του άβακα. Μέθοδος πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων . Είναι εμφανής ο εσφαλμένος προσδιορισμός των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας.....	68
Εικόνα 3.12: Ορθοφωτομωσαϊκό της ανατολικής εισόδου.....	69
Εικόνα 3.13: Ορθοφωτογραφία άνω μέρους ανατολικής εισόδου. Χρήση γεωδαιτικώς μετρημένων φωτοσταθερών.....	71
Εικόνα 3.14: Εικόνα της δυτικής εισόδου όπως προέκυψε από τον αλγόριθμο της αναγωγής.....	72
Εικόνα 3.15: Εφαρμογή αλγορίθμου αναγωγής στην δυτική είσοδο , Κλίμακα 1:100.....	72
Εικόνα 3.16: Ορθοφωτογραφία δυτικής εισόδου. Κλίμακα 1:100. Καθορισμός επιπέδου από 3 σημεία.....	73
Εικόνα 4.1: Παράδειγμα δυσκολίας επιλογής χαρακτηριστικών σημείων.....	76
Εικόνα 4.2: Περίπτωση προβληματικού υπολογισμού του Μ.Ο.....	77
Εικόνα 4.3: Μέθοδος τοπικής αύξησης μεγέθους μάσκας	79
Εικόνα 4.4: Ανομοιογένεια τόνων. Τοπική μεγέθυνση ορθοφωτογραφίας 1:100.....	80
Εικόνα 4.5: Αρχική διάρθρωση διαδικασίας παρεμβολής στο νέφος.....	81
Εικόνα 4.6: Τελική διάρθρωση διαδικασίας παρεμβολής στο νέφος.....	82
Εικόνα 6.1: Διαδραστικό παράθυρο αλγορίθμου.....	86
Εικόνα 6.2: Παράθυρο απεικόνισης εισαγόμενης εικόνας.....	90
Εικόνα 6.3: Βοηθητικό παράθυρο σκόπευσης στο νέφος.....	91
Εικόνα 6.4: Απεικόνιση νέφους με περισσότερα από 1000 σημεία. Με κόκκινο εμφανίζονται τα σημεία που επιλέχθηκαν ως φωτοσταθερά.....	93
Εικόνα 6.5: Προειδοποιητικό μήνυμα για νέφος μικρότερο από 1000 σημεία.....	94
Εικόνα 6.6: Εμφάνιση γεωμετρίας σε βοηθητικό παράθυρο.....	96

