

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Σύνταξη λογισμικού για την εφαρμογή εναλλακτικής μεθόδου  
παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας»**

*Νάτσης Στέφανος*  
*Επιβλέπων καθηγητής: Γεωργόπουλος Ανδρέας*

**Φεβρουάριος 2008**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου Ανδρέα Γεωργόπουλο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη μελέτη. Του είμαι ευγνώμων για την εμπιστοσύνη του, την υπομονή του και τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Ευχαριστώ, επίσης, το εργαστήριο φωτογραμμετρίας και όλους όσοι με βοήθησαν με το έργο ή τις συμβουλές τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την διαρκή της υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Στέφανος

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια εναλλακτική μέθοδο για την παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας μεγάλης κλίμακας, μέσα από ελεύθερο λογισμικό που συντάχθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού C++ (<http://zpr.sourceforge.net/>). Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί ως δεδομένα μια ψηφιακή εικόνα και ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων, προϊόν από σάρωση laser, και με τη χρήση φωτοσταθερών για τον προσανατολισμό της εικόνας, χρωματίζει τα σημεία του νέφους. Στη συνέχεια, προβάλλει τα σημεία ορθά στο επιθυμητό επίπεδο προβολής της ορθοφωτογραφίας.

Στα κείμενα αναπτύσσονται αρχικά η έννοια της ορθοφωτογραφίας και οι προηγούμενες μελέτες από όπου προέκυψε η ιδέα για την εκπόνηση της εργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πρόγραμμα που συντάχθηκε και αναλύονται οι διαδικασίες που ακολουθεί ο αλγόριθμος για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας με την προτεινόμενη μέθοδο. Ακολουθεί πρακτική εφαρμογή της μεθόδου υπό πραγματικές συνθήκες στον ναό των Αγ. Αποστόλων στο Θησείο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, αναλύονται και συγκρίνονται με αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση εμπορικού ψηφιακού φωτογραμμετρικού σταθμού.

## Summary

This paper suggests an alternative method for large scale digital Ortho-Photo production through free software developed in C++ programming language (<http://zpr.sourceforge.net/>). The suggested method uses a digital image and a laser scanner 3d pointcloud as input, and with the use of control points for image calibration, assigns color values to each point in the cloud. Then, the points are projected orthographically to the desired orthophotograph's projection plane.

In this essay, the meaning and uses of orthophotograph is presented, as well as previous research that lead to the idea of the suggested method. The developed software is then presented and the algorithm's operations for the production of the orthophotographs are analyzed. The suggested method is applied in a real case of monument geometric documentation in the Ag. Apostoloi temple at Thisio, Athens. The results are presented, analyzed and compared to results that derived from the use of a commercial digital photogrammetry workstation.

1	Εισαγωγή .....	6
2	Η ορθοφωτογραφία.....	7
	2.1 Η ορθοφωτογραφία στις επίγειες εφαρμογές.....	8
	2.2 Οι σαρωτές laser και οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές .....	9
	2.3 Προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη προτεινόμενη μέθοδο .....	10
3	Υλοποίηση του Αλγορίθμου .....	11
	3.1 Επιλογή γλώσσας προγραμματισμού.....	11
	3.2 Οι Βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν .....	12
	3.3 Ανοιχτό Λογισμικό και η Γενική Άδεια Χρήσης GNU – GPL .....	12
	3.4 Ο αλγόριθμος .....	13
	3.4.1 Εισαγωγή δεδομένων .....	14
	3.4.2 Διαχείριση νέφους σημείων .....	16
	3.4.3 Προσανατολισμοί .....	17
	3.4.4 Απόδοση χρώματος στα σημεία του νέφους.....	18
	3.4.5 Προβολή του νέφους.....	19
	3.4.6 Κενές εικονοψηφίδες .....	19
	3.5 Πρώτη εκτίμηση του συνταχθέντος προγράμματος .....	22
4	Εφαρμογή.....	23
	4.1 Το αντικείμενο της εφαρμογής .....	23
	4.2 Ο σαρωτής laser .....	24
	4.3 Η φωτογραφική μηχανή.....	24
	4.4 Οι μετρήσεις.....	24
	4.5 Η διαδικασία για το SSK .....	25
	4.5.1 Προετοιμασία δεδομένων .....	25
	4.5.2 Εισαγωγή δεδομένων .....	26
	4.6 Η διαδικασία με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε .....	26
	4.6.1 Προετοιμασία Δεδομένων .....	26
	4.6.2 Εισαγωγή Δεδομένων .....	27
5	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα .....	28
	5.1 Αποτελέσματα του SSK.....	28
	5.2 Αποτελέσματα του προγράμματος.....	28
	5.3 Σε πρώτο στάδιο αξιολόγηση .....	28
	5.4 Μετρητική αξιολόγηση.....	41
	5.4.1 Αρχικές εικόνες με μεγάλες στροφές.....	61
	5.4.1 Αρχικές εικόνες με μεγάλες στροφές.....	61
	5.5 Αξιολόγηση και συμπεράσματα για το πρόγραμμα και τη μέθοδο .....	67
	5.6 Προτάσεις για το μέλλον .....	68
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι .....	70
	Οδηγίες χρήσης της εφαρμογής.....	70
	Τρόποι χρήσης και Παραδείγματα.....	73
	Βιβλιογραφία .....	75
	Παγκόσμιος Ιστός.....	76

# 1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής ορθοφωτογραφίας με εναλλακτική μέθοδο και η σύνταξη λογισμικού για την ανάπτυξή της. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί την αναπτυσσόμενη ακόμα τεχνολογία των σαρωτών laser, και διαφέρει από τη συνηθισμένη, τη διαφορική δηλαδή αναγωγή των αρχικών εικόνων. Η λογική που ακολουθείται είναι η τελική ορθοφωτογραφία να προκύψει από την ορθή προβολή ενός νέφους χρωματισμένων σημείων στο ζητούμενο επίπεδο προβολής. Απαραίτητα δεδομένα είναι ένα νέφος σημείων του σαρωμένου με laser scanner αντικειμένου, μια ψηφιακή εικόνα και η ύπαρξη στο νέφος τουλάχιστον έξι φωτοσταθερών σημείων για τον υπολογισμό των προσανατολισμών.

Η διαδικασία περιληπτικά περιλαμβάνει τον υπολογισμό του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού της φωτογραφίας, την αντιστοίχιση πληροφορίας χρώματος από την εικόνα στα σημεία του νέφους και τέλος την προβολή των σημείων στο ζητούμενο επίπεδο. Εξαιτίας της λογικής της μεθόδου δεν απαιτούνται αυστηρές φωτογραμμετρικές προδιαγραφές κατά την λήψη των φωτογραφιών καθώς η διαδικασία της προβολής είναι εντελώς ανεξάρτητη από τους προσανατολισμούς της λήψης. Αντίθετα με τη συνηθισμένη μέθοδο, όπου οι γωνίες στροφής κατά τις φωτογραφικές λήψεις επηρεάζουν έντονα την ποιότητα του αποτελέσματος θέτοντας έτσι αυστηρές προδιαγραφές για τις λήψεις, στην προτεινόμενη μέθοδο κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Έτσι, το επίπεδο προβολής μπορεί να επιλεγεί αφού η διαδικασία σάρωσης και λήψης έχει ολοκληρωθεί, αφού η επιλογή του δεν επηρεάζεται από τις γωνίες στροφής της λήψης, επιτρέποντας από τα ίδια δεδομένα την παραγωγή ορθοφωτογραφιών σε διαφορετικά επίπεδα προβολής και κάνοντας τη μέθοδο πιο προσιτή σε άτομα που δεν είναι εξειδικευμένα με τη φωτογραμμετρία.

Το λογισμικό που δημιουργήθηκε συντάχθηκε με γνώμονες την ευκολία και ταχύτητα εκτέλεσης, αλλά κυρίως την δυνατότητα επέκτασης του προγράμματος, βελτίωσής του και χρήσης του από οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο. Για αυτόν τον λόγο το πρόγραμμα διανέμεται ελεύθερα μαζί με τον ανοιχτό του κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού που συντάχθηκε, τη C++, υπό τους όρους της Γενικής Άδειας Χρήσης ελεύθερου λογισμικού GNU, γνωστή ως GPL [<http://www.gnu.org/licenses/>].

Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται οι ‘κλασσικές’ μέθοδοι παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας, οι τρόποι με τους οποίους οι τεχνολογίες των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και των σαρωτών laser συνέβαλαν στη φωτογραμμετρία, αναπτύσσεται εκτενώς η προτεινόμενη μέθοδος και παρουσιάζεται η συνταχθείσα εφαρμογή και τέλος παρουσιάζονται, συγκρίνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου σε μια τυπική περίπτωση εφαρμογής ορθοφωτογραφίας, για την γεωμετρική τεκμηρίωση της ανατολικής όψης του ναού των Αγίων Αποστόλων στο Θησείο, στο κέντρο της Αθήνας.

## 2 Η ορθοφωτογραφία

Ορθοφωτογραφία είναι μια φωτογραφική εικόνα που έχει αναχθεί διαφορετικά ώστε να εξαλειφθούν οι παραμορφώσεις που οφείλονται στην επίδραση των κλίσεων, στις εκτροπές λόγω αναγλύφου κλπ. Αποτελεί μια απεικόνιση του χώρου σε ορθή προβολή, έναντι της κεντρικής προβολής που ισχύει στην περίπτωση της απλής φωτογραφίας. Η βασική της ιδιότητα είναι πως έχει ενιαία κλίμακα σε όλη της την έκταση όπως ένας χάρτης, περιέχει ωστόσο όλη την ποιοτική πληροφορία που περιέχει μια φωτογραφία.

Η γενική αρχή στην οποία στηρίχθηκε η παραγωγή της ορθοφωτογραφίας όπως αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε στα πρώτα όργανα κατά τη δεκαετία του 1950 υπέστη με την πάροδο των χρόνων πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις. Η εξέλιξη των φωτογραμμετρικών οργάνων και των ηλεκτρονικών υπολογιστών κάθε εποχή οδήγησε στη δημιουργία ποικίλων συστημάτων παραγωγής ορθοφωτογραφίας. Την τελευταία δεκαετία για λόγους αυτοματοποίησης της διαδικασίας, ταχύτητας παραγωγής και ακρίβειας του τελικού προϊόντος, επικράτησε πλήρως η ψηφιακή παραγωγή ορθοφωτογραφίας, μέσω διαχείρισης ψηφιακών αρχικών εικόνων [Ιωαννίδης, 2003].

Οι εφαρμογές της ορθοφωτογραφίας είναι πολλές όπως και το εύρος των κλιμάκων στις οποίες συντάσσονται. Από μικρής κλίμακας χάρτες από δορυφορικές εικόνες, μέσης και μεγάλης κλίμακας χάρτες αγροτικών εκτάσεων από αεροφωτογραφήσεις έως πολύ μεγάλης κλίμακας σχέδια σε αποτυπώσεις αρχαιολογικών χώρων και μνημείων. Είτε το αντικείμενο είναι η σύνταξη ή η ενημέρωση κτηματολογικών χαρτών, περιβαλλοντικές, χωροταξικές και πολεοδομικές μελέτες ή γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων, η μέθοδος που ακολουθείται είναι παρόμοια, το μόνο που αλλάζει είναι τα μέσα για την συλλογή και η ποιότητα των δεδομένων.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη σύνταξη μιας ορθοφωτογραφίας είναι:

- Η αρχική φωτογραφία. Ανάλογα με την εφαρμογή αυτή μπορεί να είναι ψηφιακή ή αναλογική, έγχρωμη, ασπρόμαυρη ή πολυφασματική και η λήψη της να έχει πραγματοποιηθεί από δορυφόρο, αεροπλάνο, αυτοσχέδιο μηχανισμό ανάρτησης της μηχανής ή από κοντινή απόσταση σε περιπτώσεις αποτύπωσης μνημείων.
- Ο εσωτερικός προσανατολισμός της φωτομηχανής. Οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου στη φωτογραφία, η σταθερά της μηχανής κατά τη λήψη και οι συντελεστές των διαστροφών του φακού.
- Ο εξωτερικός προσανατολισμός της φωτογραφίας. Οι συντεταγμένες του σημείου λήψης και οι στροφές του άξονα λήψης ως προς το αντικείμενο ή ο υπολογισμός τους με οπισθοτομία από γνωστά φωτοσταθερά - προσημασμένα ή μη - σημεία.
- Ένα Ψηφιακό Μοντέλο του αντικειμένου. Για τις περιπτώσεις επίγειων εφαρμογών χρησιμοποιείται συνήθως ένα πλούσιο και πυκνό Ψηφιακό Μοντέλο Επιφανείας (D.S.M.) σε ακανόνιστο δίκτυο σημείων ή επιπέδων (3D). Ωστόσο, η παραγωγή κάτι αντίστοιχου για τις εκτάσεις των εναέριων εφαρμογών είναι κοπιώδης και ασύμφορη, γι' αυτό δημιουργούνται Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (D.T.M.) με υψομετρική πληροφορία σε σημεία καννάβου (2,5D). Η πηγή της πληροφορίας μπορεί να είναι η ψηφιοποίηση χαρτών και διαγραμμάτων, τοπογραφικές μετρήσεις, μετρήσεις με GPS, αποτελέσματα

φωτογραμμετρικής στερεοαπόδοσης, σάρωση με επίγειο σαρωτή laser, LIDAR ή άλλες.

Η μέθοδος που έχει επικρατήσει και ακολουθείται είναι ο διαφορικός μετασχηματισμός της ψηφιακής εικόνας, δηλαδή μια προς μια οι εικονοψηφίδες της ορθοφωτογραφίας αντιστοιχίζονται σε εικονοψηφίδες της αρχικής εικόνας, με τη χρήση των παραμέτρων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και την αντίστροφη εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας, με υψομετρικά δεδομένα που προκύπτουν από το ψηφιακό μοντέλο με παρεμβολή για το κάθε σημείο.

Η παρούσα διπλωματική προτείνει και εφαρμόζει έναν διαφορετικό τρόπο προσέγγισης του προβλήματος, για να καταλήξει σε παρόμοια αποτελέσματα πιο εύκολα και γρήγορα. Περιληπτικά, τα σημεία του μοντέλου χρωματίζονται με εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας και την προβολή τους στην αρχική εικόνα και στη συνέχεια ένα προς ένα προβάλλονται ορθά στο επίπεδο της ορθοφωτογραφίας. Για την προτεινόμενη μέθοδο η κλίμακα της τελικής ορθοφωτογραφίας ορίζεται από την πυκνότητα του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας, καθώς όπως είναι προφανές, στις θέσεις που το μοντέλο δεν έχει σημεία, δεν χρωματίζεται και η ορθοφωτογραφία.

## **2.1 Η ορθοφωτογραφία στις επίγειες εφαρμογές**

Τα πλεονεκτήματα που παρέχει η ορθοφωτογραφία έναντι των άλλων φωτογραμμετρικών μεθόδων (σε ακρίβεια ως προς την αναγωγή, σε ταχύτητα και οικονομία ως προς τη στερεοαπόδοση) συνέβαλαν στην ευρύτατη εφαρμογή της για τη σύνταξη υποβάθρων για θέματα διαχείρισης γης στον διεθνή αλλά και στον ελληνικό χώρο. Έτσι, και η τεχνολογία της ορθοφωτογραφίας έχει αναπτυχθεί και τελειοποιηθεί γύρω από την εναέρια φωτογραμμετρία και τις μέσες και μικρές κλίμακες.

Ωστόσο, η χρήση της δεν περιορίζεται στις εναέρια εφαρμογές αλλά επεκτείνεται και σε επίγειες. Οι επίγειες εφαρμογές εστιάζονται κυρίως στους τομείς της αρχαιολογίας και της αρχιτεκτονικής, με αποτυπώσεις αρχαιολογικών χώρων, κτιρίων ή γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων. Η πληθώρα της πληροφορίας που προσφέρει η ορθοφωτογραφία είναι ιδανική για να αποτυπώσει αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, ανάγλυφα διακοσμητικά όπως γύψινα ή ψηφιδωτά, ενώ η κλασσική τους αποτύπωση θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη.

Ενώ η μέθοδος και τα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια με αυτά της εναέριας φωτογραμμετρίας (μόνο το σύστημα συντεταγμένων περιστρέφεται ώστε το επίπεδο που ορίζεται από τους X και Y άξονες να είναι παράλληλο με το επίπεδο του αντικειμένου, όπως δηλαδή και στην αεροφωτογραφία), υπάρχουν μερικές διαφορές που καθιστούν την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας σε επίγειες εφαρμογές ιδιαίτερη και αρκετές φορές προβληματική.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η εγγύς φωτογραμμετρία οφείλεται στη διαφορά της κλίμακας φωτογράφισης σε σχέση με την εναέρια. Καθώς η απόσταση της φωτομηχανής κατά την λήψη είναι μόλις μερικά μέτρα από το αντικείμενο, σε αντίθεση με τις εκατοντάδες μέτρων ύψους πτήσης κατά τις εναέριας λήψεις, οι στροφές του εξωτερικού προσανατολισμού της φωτογραφίας επηρεάζουν πολύ περισσότερο την ποιότητα της ορθοφωτογραφίας.



Επίσης, στις επίγειες λήψεις το ανάγλυφο του αντικειμένου είναι συνήθως πολύ πιο έντονο, με ύψη πολύ μεγάλα σε σχέση με την απόσταση λήψης, κάτι που δεν συμβαίνει στις περιπτώσεις εναέριων λήψεων. Κατ' επέκταση, το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου του αντικειμένου πρέπει να είναι πιο πυκνό κάνοντας τη συλλογή του δυσκολότερη, και οι φωτογραφίες πρέπει να περάσουν από ελέγχους αποκρύψεων πληροφορίας λόγω του αναγλύφου.

## **2.2 Οι σαρωτές laser και οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές**

Δύο μεγάλοι σύμμαχοι έχουν προστεθεί στα διαθέσιμα εργαλεία για τις εφαρμογές επίγειας ορθοφωτογραφίας τα τελευταία χρόνια. Και αυτοί είναι οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και οι επίγειοι σαρωτές laser.

Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές σήμερα με τη τεχνολογία dSLR (ψηφιακή reflex), τους ποιοτικότερους φακούς και τις υψηλές αναλύσεις επιτρέπουν στη μηχανή να έχει όλες τις ρυθμίσεις, τα πλεονεκτήματα και τις ευκολίες μιας καλής παραδοσιακής αναλογικής reflex μηχανής. Οι ψηφιακές εικόνες που παράγουν είναι άμεσα διαθέσιμες και αξιοποιήσιμες από τις φωτογραμμετρικές μεθόδους καταργώντας τα ενδιάμεσα στάδια της εμφάνισης και ψηφιοποίησης του φιλμ, που εκτός από τα σφάλματα που μπορεί να προκαλέσουν (καμπυλώσεις του φιλμ, οπτικά του σαρωτή) αποτελούν μια σχετικά χρονοβόρα διαδικασία. Έτσι, αμέσως μετά την λήψη τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν επί τόπου στο σημείο μελέτης ή να αποσταλούν ηλεκτρονικά στο γραφείο. Αυτή η ευκολία δίνει τη δυνατότητα σε περίπτωση που κάποια λήψη δεν είναι ικανοποιητική, αυτό να γίνει αντιληπτό και να επαναληφθεί η λήψη.

Οι ρίζες της τεχνολογίας laser για την μέτρηση αποστάσεων βρίσκονται στα τέλη της δεκαετίας του 1970 [[http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner)], ωστόσο εφαρμογές της όπως οι ψηφιακοί σαρωτές laser, καθυστέρησαν να εμφανιστούν στην αγορά. Πρόσφατα η ανάπτυξη τους έχει επιτρέψει την κατασκευή εμπορικών συσκευών ικανοποιητικής ακρίβειας, φορητών από άποψη μεγέθους και βάρους και προσιτών από άποψη τιμής, εισάγοντας έτσι δυναμικά την χρήση τους στην επίγεια φωτογραμμετρία. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους είναι εμφανή. Καθιστούν δυνατή την εύκολη συλλογή πυκνών Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας μεγάλης ακρίβειας και πυκνότητας σε λίγα μόλις λεπτά. Στις περισσότερες επίγειες εφαρμογές η συλλογή των δεδομένων των μοντέλων με τοπογραφικές μεθόδους είναι σχεδόν αδύνατη λόγω των μεγεθών των αντικειμένων, οπότε η λύση που ακολουθείται είναι η φωτογραμμετρική στερεοαπόδοση, η εξαγωγή δηλαδή υψομετρικής πληροφορίας από προσανατολισμένα ζεύγη φωτογραφιών του αντικειμένου. Η διαδικασία ωστόσο είναι πολύ χρονοβόρα και παρά το γεγονός ότι η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι μεγάλη, η χρήση των σαρωτών laser υπερτερεί.

Τέλος, το γεγονός ότι τα πρωτογενή προϊόντα τόσο των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών όσο και των σαρωτών laser είναι ψηφιακά αρχεία, αφήνει τον ορίζοντα ανοικτό για την εφαρμογή πολλών αυτοματοποιήσεων όπως ο προτεινόμενος αλγόριθμος παραγωγής ορθοφωτογραφίας της παρούσας εργασίας.

### **2.3 Προηγούμενες μελέτες σχετικά με τη προτεινόμενη μέθοδο**

Η ιδέα για την προτεινόμενη μέθοδο παραγωγής ορθοφωτογραφίας δεν είναι καινούρια αλλά πηγάζει από τα συμπεράσματα προηγούμενων μελετών [Georgopoulos et al., 2005]. Στη συγκεκριμένη μελέτη προτείνεται αρχικά η ιδέα της παραγωγής ορθοφωτογραφίας μέσω της προβολής ενός χρωματισμένου ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Ωστόσο, το ψηφιακό μοντέλο στη συγκεκριμένη μελέτη προκύπτει με φωτογραμμετρικές διαδικασίες στερεοαπόδοσης από ζεύγη ψηφιακών εικόνων. Κάτι τέτοιο αποτελεί χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία καθώς η μέθοδος απαιτεί το ψηφιακό μοντέλο να είναι αρκετά πυκνό. Επίσης, η όλη διαδικασία του προσανατολισμού του στερεοζεύγους και της στερεοαπόδοσης είναι πιθανό να εισάγει σφάλματα στην πορεία για το τελικό αποτέλεσμα που είναι η ορθοφωτογραφία.

Μια άλλη παρόμοια προσέγγιση του αντικείμενου είναι η δημιουργία ενός χρωματισμένου τρισδιάστατου μοντέλου αποτελούμενου από στοιχειώδεις τρίγωνες επιφάνειες αντί για σημεία. Οι επιφάνειες δημιουργούνται με τρισδιάστατο τριγωνισμό Delaunay ενός νέφους σημείων και το χρώμα για την κάθε επιφάνεια προκύπτει από ψηφιακή εικόνα. Για την λήψη της εικόνας χρησιμοποιείται ψηφιακή φωτογραφική μηχανή η οποία βρίσκεται μόνιμα πακτωμένη πάνω στο σύστημα του σαρωτή laser ώστε να είναι σταθερός ο σχετικός προσανατολισμός των δύο συσκευών ο οποίος και προκύπτει από εργαστηριακές μετρήσεις βαθμιόμησης. Τέτοιες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί [Dold and Brenner, 2006], [Abmayr et al., 2004], [Reulke et al., 2006], και έχουν κατασκευαστεί εμπορικές συσκευές σαρωτών laser με βάσεις για μετρητικές ή ημι-μετρητικές ψηφιακές φωτομηχανές. Η πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιημένη από αυτές είναι η σειρά σαρωτών LMS-Z (LMS-Z210i, LMS-Z390ii, LMS-Z420i) της Riegl [<http://www.riegl.com/>].

Εφαρμογές έχουν γίνει και για τον χρωματισμό αντίστοιχων μοντέλων τριγώνων από ψηφιακές εικόνες ανεξαρτήτως του προσανατολισμού τους ή της πηγής τους [Brumana et al., 2005]. Σε αυτές τις περιπτώσεις για τον υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού και τον χρωματισμό των επιφανειών χρησιμοποιείται η μέθοδος του Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού DLT. Ως επέκταση αυτής της μεθόδου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μια εικόνες για τον χρωματισμό και να επιλεγεί η καταλληλότερη για το κάθε τρίγωνο μέσω διαδικασιών επιλογής και τεχνητής νοημοσύνης [Grammatikopoulos et al., 2004]. Αυτό επιτρέπει την αποφυγή εσφαλμένου χρωματισμού στις περιοχές που υπάρχουν αποκρύψεις από αντικείμενα ανάμεσα στο αντικείμενο προς αποτύπωση και τη φωτομηχανή ή σε περιπτώσεις πολύ έντονου αναγλύφου [Abdelhafiz and Niemeier, 2006].

Για την παραγωγή έγχρωμων νεφών σημείων βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο μια επαναστατική συσκευή. Πρόκειται για ένα οπτικομηχανικό συνδυασμό αισθητήρων ο οποίος με τη βοήθεια φακών και καθρεπτών επιτρέπει τη συλλογή χωρικής πληροφορίας από laser και ποιοτικής πληροφορίας χρώματος από ψηφιακή κάμερα μέσω ενός κοινού οπτικού κέντρου [Seidl et al., 2006]. Αυτό οδηγεί στον άμεσο χρωματισμό του κάθε σημείου που συλλέγεται από τον σαρωτή, καταργώντας την ανάγκη για φωτογράφιση και για τον υπολογισμό των προσανατολισμών των λήψεων, εφόσον η πορεία της οπτικής ακτίνας είναι γνωστή και είναι η ίδια για τη σάρωση και τη φωτογράφιση. Μια μελλοντική συσκευή εξοπλισμένη με τέτοιο αισθητήρα θα μπορεί να παράγει έγχρωμα τρισδιάστατα μοντέλα και ορθοφωτογραφίες στο πεδίο χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία γραφείου.

# 3 Υλοποίηση του Αλγορίθμου

Στο ακόλουθο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προβληματισμοί που αντιμετωπίστηκαν και οι επιλογές που γίνανε σχετικά με την υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου σε μια λειτουργική εφαρμογή. Είναι μια περίληψη της διαδρομής από τη θεωρητική ιδέα του αλγορίθμου με την οποία ξεκίνησε η παρούσα διπλωματική εργασία, μέχρι τις περίπου 3.500 γραμμές κώδικα στις οποίες κατέληξε. Το συνταχθέν λογισμικό είναι διαθέσιμο μαζί με τον πηγαίο του κώδικα μέσω του διαδικτυακού τόπου <http://zpr.sourceforge.net/>.

## 3.1 Επιλογή γλώσσας προγραμματισμού

Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού στην οποία αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος ήταν ο πρώτος προβληματισμός και για την αντιμετώπισή του έπαιξαν ρόλο τα εξής βασικά κριτήρια:

**Ευκολία στον προγραμματισμό:** Η γλώσσα έπρεπε να είναι γνώριμη και φιλική προς τον προγραμματιστή, αλλά και προς όποιον μπορεί να κληθεί να επαναχρησιμοποιήσει τον κώδικα.

**Διαχείριση μνήμης:** Η εφαρμογή πρέπει να διαχειρίζεται αποδοτικά αρκετά μεγάλο όγκο δεδομένων όπως τα χρωματισμένα νέφη σημείων και πολλές εικόνες μεγάλης ανάλυσης.

**Ταχύτητα εκτέλεσης προγράμματος:** Η εφαρμογή πρέπει να εκτελείται γρήγορα και δεδομένου του όγκου δεδομένων που διαχειρίζεται, να μην είναι υπερβολικά απαιτητική σε πόρους του συστήματος.

**Προϋπάρχουσες βιβλιοθήκες:** Πολύ χρήσιμο είναι να υπάρχει ήδη έτοιμος κώδικας για απλές ρουτίνες που θα χρησιμοποιηθούν.

**Ευκολία στην εκτέλεση:** Η εφαρμογή πρέπει να μπορεί να εκτελείται επιτυχώς από απλούς χρήστες χωρίς προγραμματιστικές γνώσεις και σε οποιονδήποτε υπολογιστή.

Η MATLAB αποτελεί την πιο κλασική λύση σε τέτοιου είδους ακαδημαϊκές εφαρμογές καθώς δεν απαιτεί ιδιαίτερη εξοικείωση με τον προγραμματισμό για την κατασκευή αλγορίθμων. Επίσης, περιλαμβάνει έτοιμες πολλές ρουτίνες σχετικά με μαθηματικές πράξεις και διαχείριση αρχείων. Το μειονέκτημά της βρίσκεται στη διαχείριση της μνήμης, την ταχύτητα εκτέλεσης και στο γεγονός ότι η εφαρμογή δεν εκτελείται αυτόνομα, αλλά απαιτείται η χρήση του πακέτου MATLAB όπου και τρέχει ως script. Έτσι, ακόμα και αν ο προτεινόμενος αλγόριθμος διανέμεται ελεύθερα, για την εκτέλεση και τη χρήση του απαιτείται η αγορά της εφαρμογής του MATLAB αλλά και κάποιες βασικές γνώσεις για τη χρήση της.

Η C++, αν και σαφώς λιγότερο φιλική στον αρχάριο χρήστη από τη MATLAB, καλύπτει τις απαιτήσεις που τέθηκαν. Επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας κατά την εκτέλεση, έχει διαθέσιμες για χρήση πολλές βιβλιοθήκες με

έτοιμο κώδικα για τυπικές ρουτίνες και δημιουργεί αυτόνομα εκτελέσιμα αρχεία κάνοντας την διανομή της εφαρμογής ευκολότερη και τη χρήση της πιο προσιτή σε λιγότερο εξειδικευμένους χρήστες.

Έτσι, για τη σύνταξη της εφαρμογής επιλέχθηκε η αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού C++, στην πράξη όμως ο πηγαίος κώδικας δεν ακολουθεί αποκλειστικά αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, παρά κατέληξε να περιλαμβάνει συνδυασμό πρακτικών και μεθόδων της C++ και της ANSI C.

Η εφαρμογή συντάχθηκε στο ανοιχτού κώδικα περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών (IDE) Code::Blocks.

### **3.2 Οι Βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν**

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι εξής βιβλιοθήκες ανοιχτού λογισμικού:

#### **GNU Scientific Language (GSL).**

Η GSL σε συνδυασμό με ένα wrapper για τη C++, είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη διεκπεραίωση μαθηματικών προβλημάτων και πράξεις πινάκων. Η βιβλιοθήκη διανέμεται δωρεάν υπό τους όρους της Γενικής Άδειας Χρήσης GNU (GPL). [<http://www.gnu.org/software/gsl/>]

#### **OpenCV.**

Η OpenCV είναι μια πλήρης βιβλιοθήκη ανοιχτού λογισμικού της Intel με χρήσεις κυρίως στην μηχανική όραση (computer vision) και τη ρομποτική. Περιλαμβάνει, επίσης, πολύ χρήσιμες ρουτίνες για την αποκατάσταση των προσανατολισμών των εικόνων (camera calibration) οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν. Η χρήση της βιβλιοθήκης είναι δωρεάν και διανέμεται υπό τους όρους χρήσης ανοιχτού λογισμικού της Intel. [<http://opencvlibrary.sourceforge.net/>]

#### **GetPot.**

Η GetPot είναι μια απλή βιβλιοθήκη που διευκολύνει την ανάλυση των παραμέτρων κατά την εκτέλεση του προγράμματος (command line parameters) και των αρχείων παραμέτρων (configuration files). Η βιβλιοθήκη διανέμεται δωρεάν υπό τους όρους της Μειωμένης Γενικής Άδειας Χρήσης GNU για βιβλιοθήκες (LGPL). [<http://getpot.sourceforge.net/>]

### **3.3 Ανοιχτό Λογισμικό και η Γενική Άδεια Χρήσης GNU – GPL**

Η Γενική Άδεια Χρήσης GNU, ευρέως γνωστή ως GPL, αρχικά γράφτηκε από τον Ρίτσαρντ Στόλλμαν για το εγχείρημα GNU το 1989. Η τελευταία έκδοση της άδειας, η έκδοση 3, εκδόθηκε το 2007 [<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>]. Η άδεια GPL που δημιουργήθηκε για να προωθήσει το λειτουργικό σύστημα GNU, δίνει στους κατόχους ενός προγράμματος τα ακόλουθα δικαιώματα:

- να εκτελέσουν το πρόγραμμα για οποιοδήποτε σκοπό
- να μελετήσουν τη λειτουργία του προγράμματος και εφόσον ξέρουν, να το τροποποιήσουν
- να διανέμουν αντίγραφα του προγράμματος
- να βελτιώσουν το πρόγραμμα και να δημοσιοποιούν τις αλλαγές στο κοινό

Θέτει όμως τους εξής περιορισμούς:

- ο πηγαίος κώδικας του προγράμματος πρέπει να είναι διαθέσιμος δωρεάν μαζί με το πρόγραμμα
- κάθε αντίγραφο ή παράγωγο του προγράμματος υποχρεούται να κυκλοφορήσει υπό την ίδια άδεια GPL

Με αυτόν τον τρόπο η άδεια GPL καθιστά την γνώση της λειτουργίας του προγράμματος άμεσα διαθέσιμη σε κάθε ενδιαφερόμενο επιτρέποντας μάλιστα την βελτίωση του προγράμματος από τρίτους, κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό για εφαρμογές σαν τη συγκεκριμένη που δημιουργούνται και αφορούν στην ακαδημαϊκή και επιστημονική κοινότητα. Τέλος, με τον περιορισμό της εφαρμογής της GPL σε όλα τα παράγωγα προγράμματα, προστατεύει τον δημιουργό από τρίτους που θα προσπαθήσουν να εκμεταλλευτούν εμπορικά τη δουλειά του.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα διανέμεται ελεύθερα υπό τους όρους της GPL μαζί με τον πηγαίο του κώδικα αφενός γιατί η χρήση της GPL βιβλιοθήκης GSL το καθιστά υποχρεωτικό και αφετέρου γιατί η ιδέα και ο σκοπός του προγράμματος είναι η συνεισφορά στην επιστημονική κοινότητα με την ανάπτυξη και την ελεύθερη προώθηση της συγκεκριμένης μεθόδου παραγωγής ορθοφωτογραφίας.

### **3.4 Ο αλγόριθμος**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί περιληπτικά, η λογική με την οποία ο αλγόριθμος προσεγγίζει την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας είναι διαφορετική από τη συνηθισμένη. Η ορθοφωτογραφία προκύπτει από την ορθή προβολή ενός χρωματισμένου νέφους σημείων. Απαιτείται λοιπόν να προηγηθεί η αποκατάσταση των προσανατολισμών μεταξύ του αχρωμάτιστου νέφους και της αρχικής εικόνας που φέρει την πληροφορία χρώματος για το αντικείμενο, και στη συνέχεια ο χρωματισμός του νέφους. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος για την αντιμετώπιση του προβλήματος ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:



περίπτωση που το νέφος είναι ήδη χρωματισμένο και τέλος μια τιμή της ανακλαστικότητας (intensity) της επιφάνειας στο σημείο που μετρείται από τον σαρωτή laser.

Το νέφος των σημείων μπορεί να αποτελείται από μερικές χιλιάδες τέτοιων σημείων έως μερικά εκατομμύρια. Για τη διευκόλυνση της συμβατότητας των αρχείων με άλλα προγράμματα και την ευκολότερη χειροκίνητη επεξεργασία τους, τα αρχεία των νεφών επιλέχθηκε να είναι σειριακά αρχεία χαρακτήρων ASCII. Η επιλογή αυτή, ωστόσο, έχει ένα μειονέκτημα, το μέγεθος των αρχείων γίνεται αρκετά μεγάλο. Ενδεικτικά, ένα αρχείο νέφους τριών εκατομμυρίων σημείων, χωρίς πληροφορία χρώματος και ανακλαστικότητας καταλαμβάνει περίπου 90MB. Αυτό κατ' επέκταση καθιστά αργή την ανάγνωσή τους από την εφαρμογή. Η επιλογή ενός δυαδικού (binary) format θα βελτιώνει τον όγκο των αρχείων και τους χρόνους προσπέλασής τους, αλλά θα καθιστούσε αναγκαία τη μετατροπή των νεφών πρώτα στο απαιτούμενο format για να εισαχθούν στην εφαρμογή και θα παρεμπόδιζε την συμβατότητα με άλλα προγράμματα.

```
592866 0.0424958 0.847193 151.357 212 220 247
592867 0.0413382 0.847606 151.302 212 220 247
592868 0.0431763 0.84724 151.354 212 220 247
592869 0.0408831 0.847495 151.321 212 220 247
592870 0.04688 0.847169 151.366 210 220 247
592871 0.0459741 0.847156 151.372 212 220 247
592872 0.0423593 0.84725 151.361 212 220 247
592873 0.0430436 0.847261 151.36 212 220 247
592874 0.0464442 0.846999 151.398 210 220 247
```

Ln 592874, Col 1 | Insert | Sel: Normal

**Εικόνα 3.2: Απόσπασμα σειριακού ASCII αρχείου νέφους.**

### Η αρχική ψηφιακή εικόνα.

Η ψηφιακή εικόνα του προς αποτύπωση αντικειμένου από την οποία θα εξαχθεί η πληροφορία χρώματος για τα σημεία του νέφους μπορεί να είναι σε ένα από αρκετά διαφορετικά από τα συνήθη format που χρησιμοποιούνται από εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζονται αρχεία τύπου BMP, DIB, JPG, PNG, PBM, PGM, PPM, SR, RAS και TIFF.

### Στοιχεία για τον προσανατολισμό.

Για να μπορέσει να αποκατασταθεί η γεωμετρική σχέση μεταξύ νέφους σημείων και ψηφιακής εικόνας ώστε να αντιστοιχιστεί κάθε σημείο με μια εικονοψηφίδα και να χρωματιστεί χρειάζεται να συνταυτιστούν τουλάχιστον έξι σημεία του νέφους με τα αντίστοιχα της εικόνας. Τα έξι αυτά συνταυτισμένα σημεία χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο αποκατάστασης των προσανατολισμών που περιγράφεται παρακάτω. Η επιλογή των σημείων γίνεται είτε χειροκίνητα εντός της εφαρμογής, είτε μέσω δύο σειριακών ASCII αρχείων, το ένα με τις εικονοσυντεταγμένες των σημείων και το άλλο με τις αντίστοιχες συντεταγμένες στο σύστημα του νέφους.

Επιπρόσθετα, απαιτείται η δήλωση μιας εκτίμησης της τιμής της εστιακής απόστασης του φακού της φωτογραφικής μηχανής με την οποία πραγματοποιήθηκε η λήψη, μετρημένη σε μονάδες εικονοψηφίδων (pixel). Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια

παραλλαγή της μεθόδου του Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού (DLT) για τον υπολογισμό του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, όπου και αναπτύσσεται παρακάτω.

#### Στοιχεία για την προβολή.

Απαραίτητο είναι να δηλωθεί με κάποιον τρόπο το επίπεδο στο οποίο ζητείται να προβληθεί η ορθοφωτογραφία. Αυτό γίνεται είτε δηλώνοντας τους τρεις συντελεστές  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  της εξίσωσης όλων των παράλληλων του ζητούμενου επιπέδου  $\alpha X + \beta Y + \gamma Z = \delta$  (ο συντελεστής  $\delta$  αγνοείται, γίνεται αυτόματα επιλογή μιας τιμής από το πρόγραμμα για τους υπολογισμούς), είτε εναλλακτικά ο χρήστης μπορεί να σχεδιάζει το ίχνος του επιπέδου σε μια γραφική αναπαράσταση κάτοψης του νέφους. Επίσης, είναι δυνατή η απευθείας επιλογή του επιπέδου που ορίζεται από τους άξονες  $X$  και  $Y$  ως επίπεδο προβολής. Για τη σωστή λειτουργία της δεύτερης περίπτωσης, πρέπει να έχει προηγηθεί γεωαναφορά του νέφους ώστε να έχει εξασφαλιστεί η κατακορυφότητα του  $Y$  άξονα (κάτι που δεν είναι απαραίτητο για την πρώτη περίπτωση), ενώ για την τρίτη πρέπει να έχει προηγηθεί και η κατάλληλη στροφή  $\phi$  γύρω από τον  $Y$  άξονα. Επίσης, ανάλογα με την ζητούμενη κλίμακα της ορθοφωτογραφίας σε συνάρτηση με τη δεδομένη πυκνότητα του νέφους, δηλώνεται και η διάσταση της εικονοψηφίδας της παραγόμενης ορθοφωτογραφίας (pixel size).

#### 3.4.2 Διαχείριση νέφους σημείων

Για να διαχειρίζεται η εφαρμογή τα σημεία, δημιουργήθηκε η κλάση `rgbpoint`, με κύρια μέλη τις συντεταγμένες ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) του σημείου και τις επιπρόσθετες πληροφορίες για το χρώμα ( $R$ ,  $G$ ,  $B$ ) και ανακλαστικότητα (*intensity*).

```
class rgbpoint {
public:
    float x, y, z;
    int r, g, b, intensity;
};
```

Εικόνα 3.3: Η δομή του *rgbpoint*.

Στη συνέχεια, για να διαχειρίζεται το νέφος των σημείων δημιουργήθηκε η κλάση `pointcloud`, με βασικό μέλος μια σειρά διπλού τέλους (`deque`) που αποτελείται από σημεία `rgbpoint`.

```
class pointcloud {
public:
    deque<rgbpoint> point;
};
```

Εικόνα 3.4: Η δομή του *pointcloud*.

Με αυτόν τον τρόπο έγινε αντικειμενοστραφής προσέγγιση που διευκόλυνε τον προγραμματισμό των αλγορίθμων και των μεθόδων που συντάχθηκαν για μετάθεση, στροφή, προσθήκη και διαγραφή σημείων, ταξινόμηση και προβολή του νέφους.



### 3.4.3 Προσανατολισμοί

Για τη βαθμονόμηση της μηχανής χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε από τον J. Heikkilä [Heikkilä, 2000]. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο για την μηχανή, το οποίο επιτρέπει τον ακριβή μετασχηματισμό από το αντικείμενο στην εικόνα και αντίστροφα και διευκολύνει την χρήση κυκλικών στόχων αφαιρώντας τις ενδεχόμενες συσχετίσεις στις σκοπεύσεις τους λόγω των προοπτικών παραμορφώσεων. Αποτελεί δηλαδή μια παραλλαγή του κλασικού αλγορίθμου, που βασίζεται στην γνωστή συνθήκη συγγραμμικότητας.

Η κυριότερη βελτίωση στον αλγόριθμο αυτόν είναι το μοντέλο περιγραφής της μηχανής το οποίο επιτρέπει ακριβή απεικόνιση (μετασχηματισμό) και προς τις δύο κατευθύνσεις (αντικείμενο  $\rightarrow$  εικόνα  $\rightarrow$  αντικείμενο). Για μηχανές του εμπορίου το μοντέλο της προοπτικής προβολής συμπληρώνεται με τις αναγκαίες παραμέτρους της διαστροφής του φακού, ακτινικής και ασύμμετρης.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται δίνεται αρχικά από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} \lambda u \\ \lambda v \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sf & 0 & u_o & 0 \\ 0 & f & v_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου:

$[u \ v \ 1]^T$  το διάνυσμα των εικονοσυντεταγμένων εκφρασμένο σε ομογενείς συντεταγμένες,

$\lambda$  συντελεστής κλίμακας,

$s$  ο συντελεστής ασυμμετρίας της εικονοψηφίδας

$f$  η σταθερά της μηχανής

$u_o, v_o$  οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου

$t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$  το διάνυσμα της μετατόπισης από το σύστημα εικονοσυντεταγμένων στο γεωδαιτικό,

$R$  ο κλασικός πίνακας στροφής ( $\omega$ ,  $\phi$  και  $\kappa$ ).

Συνοψίζοντας οι παράμετροι  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $t_z$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ , and  $\kappa$  είναι οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού και οι παράμετροι  $s$ ,  $f$ ,  $u_o$  and  $v_o$  αυτές του εσωτερικού ιδανικής μηχανής (δηλ. χωρίς διαστροφή).

Επίσης η διαστροφή (ακτινική και ασύμμετρη) εισάγεται στο μαθηματικό μοντέλο με την σχέση:

$$a_c = a_d + F_D(a_d, \delta),$$

όπου:

$a_c$  οι διορθωμένες εικονοσυντεταγμένες

$a_d$  οι αρχικές -παραμορφωμένες- εικονοσυντεταγμένες και

$F_D$  η συνάρτηση παραμόρφωσης των εικονοσυντεταγμένων στην οποία συμμετέχουν οι συντελεστές της ακτινικής αλλά και της ασύμμετρης διαστροφής

Η συνολική συνάρτηση, εκφρασμένη σε ομογενείς συντεταγμένες, όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα επιλύεται άμεσα ως γραμμική συνάρτηση από τον αλγόριθμο. Οι λεπτομέρειες της επίλυσης αναλύονται από τον J. Heikkilä [Heikkilä, 2000].

Πειραματικές εφαρμογές έδειξαν μια ακρίβεια της τάξης του 1/50 του pixel, με την προϋπόθεση να ότι έχουν εξαλειφθεί ποιοτικά σφάλματα της απεικόνισης. Ο αλγόριθμος σε Matlab είναι διαθέσιμος στην σελίδα <http://www.ee.oulu.fi/~jth/calibr/>. Ο ίδιος αλγόριθμος, γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού C, περιλαμβάνεται στην βιβλιοθήκη OpenCV μέσω της ρουτίνας `CvCalibrateCamera2()` όπου και χρησιμοποιήθηκε στην προκειμένη περίπτωση.

#### 3.4.4 Απόδοση χρώματος στα σημεία του νέφους

Αφού έχουν υπολογιστεί οι πίνακες του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού μπορεί πλέον να αποκατασταθεί η συνθήκη συγγραμμικότητας και να αντιστοιχιστούν τα σημεία το νέφους σε εικονοψηφίδες της ψηφιακής εικόνας για να τους αποδοθεί χρώμα. Η προβολή των σημείων του νέφους γίνεται με την εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας μέσω της ρουτίνας `cvProjectPoints2` της OpenCV.

Η ρουτίνα δέχεται τις συντεταγμένες των σημείων και τα υπολογισμένα στοιχεία του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και υπολογίζει τις ομόλογες εικονοσυντεταγμένες στο επίπεδο της εικόνας.

Οι εικονοσυντεταγμένες που επιστρέφονται από τη ρουτίνα είναι δεκαδικής ακρίβειας, οπότε για την μέθοδο επιλογής της τιμής του χρώματος που θα δοθεί υπάρχουν τρεις επιλογές:

Επιλογή ακέραιας εικονοψηφίδας (χρησιμοποιείται μόνο το ακέραιο κομμάτι των εικονοσυντεταγμένων για ταχύτητα και χρησιμοποιείται μια εικονοψηφίδα).

Επιλογή εγγύτερου γείτονα (οι εικονοσυντεταγμένες στρογγυλοποιούνται στον κοντινότερο ακέραιο αριθμό και χρησιμοποιείται μια εικονοψηφίδα, ο εγγύτερος γείτονας).

Επιλογή διγραμμικής παρεμβολής (συλλέγονται οι τιμές των τεσσάρων γειτονικών εικονοψηφίδων και η επιλεγόμενη τιμή προκύπτει με γραμμική παρεμβολή στους δυο άξονες X και Y).

Η επιλογή δικυβικής παρεμβολής (συλλέγονται οι τιμές των εννέα γειτονικών εικονοψηφίδων και λαμβάνουν τιμή βάρους ανάλογα με την απόσταση από την κεντρική εικονοψηφίδα) κρίθηκε υπερβολική για την συγκεκριμένη εφαρμογή, γι' αυτό και ο αλγόριθμος δεν υλοποιήθηκε. Στην περίπτωση που προκύψει τέτοια ανάγκη, είναι εύκολο να τροποποιηθεί ο κώδικας του προγράμματος και να προστεθεί η λειτουργία.

Η τιμή των καναλιών των βασικών χρωμάτων κόκκινο, πράσινο, μπλε (R, G, B) για τη συγκεκριμένη εικονοψηφίδα διαβάζεται από την ψηφιακή εικόνα (ή υπολογίζεται από τις εικονοψηφίδες στη περίπτωση της διγραμμικής παρεμβολής) και

καταγράφεται στην δομή rgbpoint για το κάθε σημείο του pointcloud νέφους. Κάποια σημεία είναι πιθανόν να προβάλλονται εκτός των ορίων της διάστασης της εικόνας, οπότε και απορρίπτονται από τον χρωματισμό.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη διαδικασία είναι ένα νέφος σημείων που εκτός από συντεταγμένες περιλαμβάνει και τιμές για το χρώμα του κάθε σημείου. Το εκτεταμένο αυτό ψηφιακό μοντέλο επιφανείας - EDSM (extended digital surface model) - μπορεί με επιλογή του χρήστη να αποθηκευτεί σε αρχείο ASCII ώστε να χρησιμοποιηθεί και από άλλες εφαρμογές.

### 3.4.5 Προβολή του νέφους

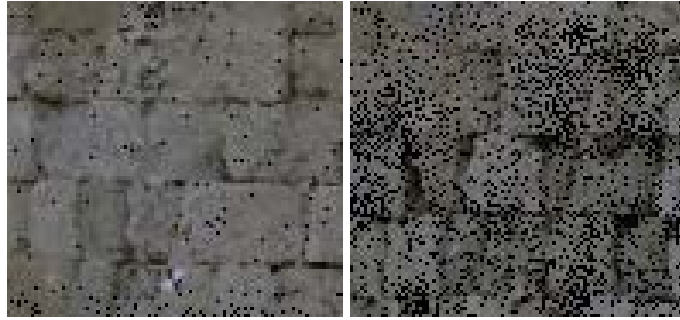
Τελευταίο βήμα για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας είναι η προβολή των σημείων του νέφους στο ζητούμενο επίπεδο προβολής και η αποτύπωσή τους σε ένα αρχείο εικόνας. Αναλόγως τον τρόπο με τον οποίο έχει δηλωθεί το επίπεδο προβολής, υπολογίζεται ο πίνακας στροφής που θα μετασχηματίσει το νέφος έτσι ώστε ο άξονας των  $Z$  συντεταγμένων να είναι κάθετος στο επίπεδο. Αφού στραφεί το νέφος, τα σημεία του έχουν συντεταγμένες  $X$  και  $Y$  στο ζητούμενο επίπεδο, ωστόσο δεν πρέπει να προβληθούν όλα αφού στην πράξη πολλά σημεία κρύβονται από άλλα κοντινότερα στο επίπεδο προβολής οπότε και δεν θα πρέπει να είναι ορατά στην τελική ορθοφωτογραφία. Για να επιλυθεί αυτό το ζήτημα, τα σημεία του νέφους τακτοποιούνται σε σειρά ανάλογα με την απόστασή τους από το επίπεδο προβολής. Έτσι, για την προβολή τους, η εφαρμογή επιλέγει πρώτα τα μακρινά σημεία και κατά συνέχεια τα κοντινότερα με αποτέλεσμα όσα σημεία δεν θα έπρεπε να είναι ορατά να επικαλύπτονται κατά τη διαδικασία της προβολής από τα μπροστινά τους, δηλαδή τα κοντινότερα – και άρα τα προβαλλόμενα – στο επίπεδο.

Στη συνέχεια, βάσει των ακραίων τιμών  $X$  και  $Y$  του νέφους και της δηλωμένης διάστασης της εικονοψηφίδας, υπολογίζονται οι διαστάσεις και η ανάλυση του αρχείου της ορθοφωτογραφίας και ο απαραίτητος μετασχηματισμός κλίμακας από συντεταγμένες  $(X, Y)$  σε εικονοσυντεταγμένες pixel  $(i, j)$ . Ένα – ένα τα σημεία του νέφους προβάλλονται από το μακρινότερο προς το κοντινότερο με τη λογική που περιγράφηκε και καταγράφονται τα χρώματά τους στην εικόνα.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μια ορθή προβολή του αποτυπωμένου αντικειμένου στο ζητούμενο επίπεδο.

### 3.4.6 Κενές εικονοψηφίδες

Εξαιτίας της μεθόδου προβολής, είναι πιθανό σε σημεία που το νέφος δεν καλύπτει τις προϋποθέσεις πυκνότητας για την ζητούμενη κλίμακα, να υπάρχουν εικονοψηφίδες που δεν πήραν χρώμα από κανένα σημείο. Το αποτέλεσμα είναι η τελική ορθοφωτογραφία να έχει ‘τρύπες’ από εικονοψηφίδες χωρίς χρώμα.

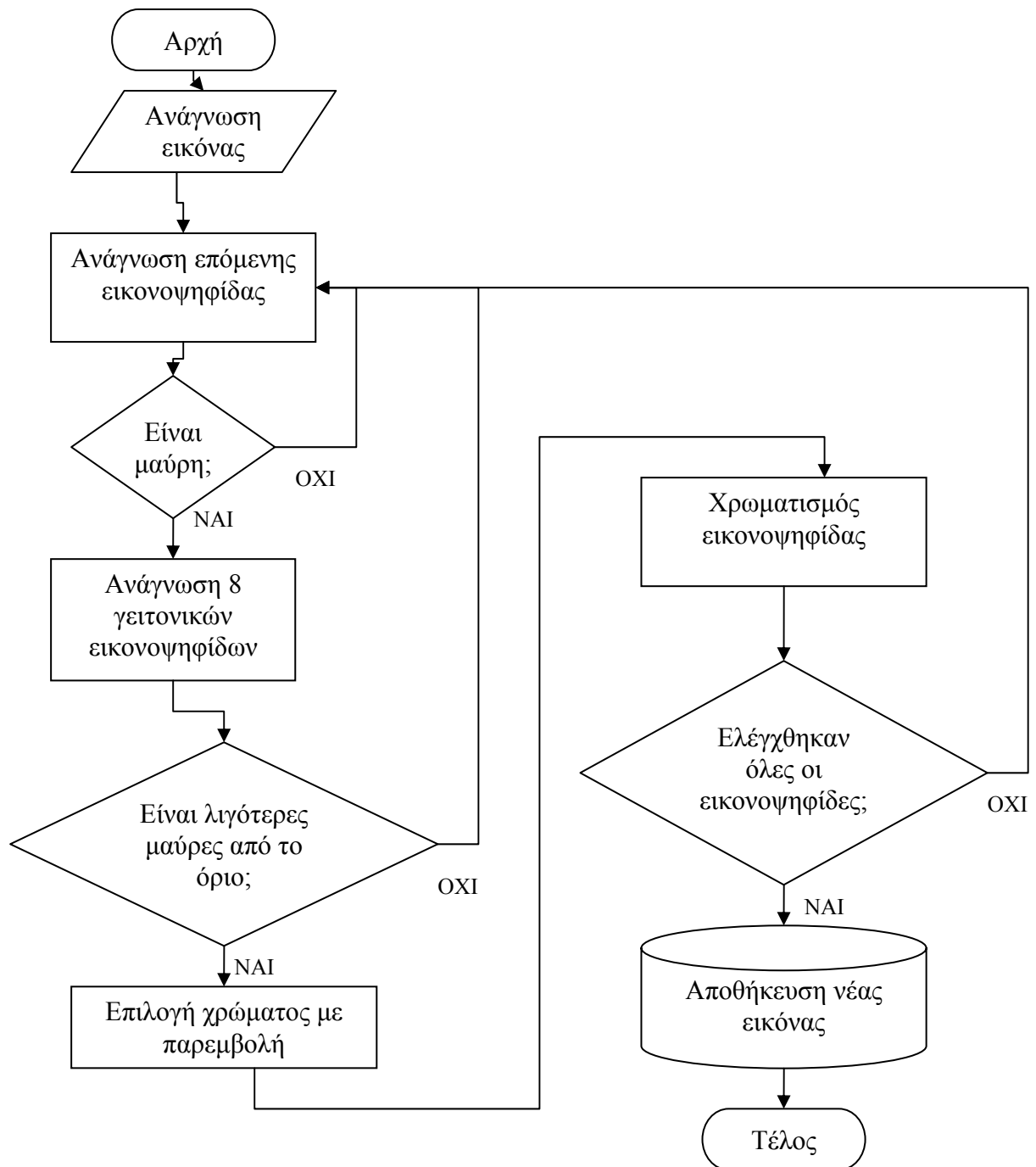


**Εικόνες 3.5, 3.6: Δύο παραδείγματα μικρής και μεγαλύτερης ανάγκης για πλήρωση κενών.**

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές πλήρωσης κενών (hole filling). Για τον λόγο αυτό συντάχθηκε ένας αλγόριθμος πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων που εφαρμόζεται μέσω της ρουτίνας holefill().

Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος είναι η εξής:

- Αρχικά φορτώνεται στη μνήμη η προς επεξεργασία εικόνα.
- Μια προς μια ελέγχονται οι εικονοψηφίδες εάν το χρώμα τους είναι μαύρο (τα κανάλια του μπλε, του πράσινου και του κόκκινου να είναι όλα 0).
- Όταν βρεθεί μαύρη εικονοψηφίδα ελέγχονται οι 8 γειτονικές εικονοψηφίδες για τον ίδιο πράγμα.
- Ανάλογα με τον αριθμό των γειτονικών μαύρων εικονοψηφίδων επιλέγεται αν η κεντρική εικονοψηφίδα πρέπει να γεμίσει με χρώμα ή όχι. Εάν πολλές γειτονικές εικονοψηφίδες είναι μαύρες, τότε πιθανόν να πρόκειται για μια περιοχή έξω ή στα όρια του μοντέλου ή για περιοχή που το φυσικό της χρώμα είναι το μαύρο οπότε και δεν χρειάζεται να παρέμβει ο αλγόριθμος. Το όριο για την επιλογή τίθεται από τον χρήστη μέσω εντολής κατά την εκτέλεση του προγράμματος, όπως φαίνεται και στις οδηγίες χρήσης του στο παράρτημα. Όταν η εικόνα έχει αρκετές κενές εικονοψηφίδες, χρειάζεται μια τιμή μεγαλύτερη συνήθως του 4 για καθαρά αποτελέσματα, ενώ σε περιπτώσεις λίγων κενών αρκεί η τιμή 1 ή 2.
- Στην περίπτωση που αποφασίζεται πως η κεντρική εικονοψηφίδα πρέπει να χρωματιστεί, πραγματοποιείται διγραμμική παρεμβολή μεταξύ των χρωματισμένων γειτονικών εικονοψηφίδων για την επιλογή του χρώματος που θα δοθεί.
- Η εικονοψηφίδα χρωματίζεται, ο αλγόριθμος συνεχίζει και όταν ολοκληρωθεί ο έλεγχος σε όλη την εικόνα, αποθηκεύεται η νέα εικόνα που προκύπτει.



Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου *holefill()*.

Ανάλογα με την ανάγκη της εικόνας για πλήρωση κενών, η εφαρμογή του αλγορίθμου μια ή περισσότερες φορές με διαφορετικό όριο μαύρων γειτονικών εικονομηφίδων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα παρουσιάζοντας συνεχείς εικόνες. Το αποτέλεσμα σταματάει να είναι οπτικά καλό όταν οι περιοχές που χρειάζεται να καλυφθούν αποτελούνται από πολλές διαδοχικές μαύρες εικονομηφίδες και για την πλήρωσή τους απαιτείται εφαρμογή του αλγορίθμου αρκετά περισσότερες φορές.

### **3.5 Πρώτη εκτίμηση του συνταχθέντος προγράμματος**

Το τελικό πρόγραμμα που προέκυψε αποτελείται από 14 αρχεία πηγαίου κώδικα συνολικής έκτασης περίπου 3.500 γραμμών χωρίς να περιλαμβάνει τα αρχεία των χρησιμοποιημένων βιβλιοθηκών. Η διανομή του σε εκτελέσιμα αρχεία για συστήματα αρχιτεκτονικής x86-32bit είναι διαθέσιμη μαζί με τον πηγαίο κώδικα από το διαδικτυακό τόπο ανοιχτού λογισμικού SourceForge.net στην διεύθυνση <http://zpr.sourceforge.net/>.

Οι πρώτες εντυπώσεις από την εκτέλεση του προγράμματος είναι η ταχύτητα με την οποία διαχειρίζεται τα μεγάλα αρχεία των νεφών και καταλήγει σε αποτελέσματα. Επίσης, σημαντική είναι η ευελιξία που προσφέρει αφού οι προδιαγραφές των δεδομένων εισόδου είναι αρκετά χαλαρές, τα απαραίτητα δεδομένα λιγιστά και τα αποτελέσματα παραμετροποιούνται μέσω της γραμμής εντολών σε μεγάλο βαθμό. Τέλος, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δείχνει ικανοποιητική και η εκτέλεση του προγράμματος αξιόπιστη καθώς δεν έχουν παρουσιαστεί αναπάντεχα σφάλματα κατά την εκτέλεση. Όλα τα παραπάνω είναι δείγματα ορθού προγραμματισμού και σωστών και έξυπνων λύσεων στα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν. Για να μπορέσει να εκτιμηθεί καλύτερα όμως το πρόγραμμα ακολουθεί η πρακτική του εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες μέσω της αποτύπωσης της ανατολικής όψης του Ναού των Αγ. Αποστόλων στο Θησείο, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προγράμματος με τα αντίστοιχα παραδοσιακών μεθόδων παραγωγής ορθοφωτογραφίας.

## 4 Εφαρμογή

Για να μπορέσουν να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου και η αποτελεσματικότητα του συνταχθέντος προγράμματος, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή τους στην εκκλησία των Αγίων Αποστόλων στο Θησείο. Πιο συγκεκριμένα, αποτυπώθηκε η ανατολική όψη του ναού και παρήχθησαν ορισμένες ψηφιακές ορθοφωτογραφίες τόσο με την προτεινόμενη μέθοδο όσο και με την ‘κλασσική’ μέσω του ψηφιακού φωτογραμμετρικού σταθμού SSK του εργαστηρίου φωτογραμμετρίας της σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Στη συνέχεια παρουσιάζονται το αντικείμενο της μελέτης, τα όργανα και οι διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα που προέκυψαν και η αξιολόγησή τους.



Εικόνα 4.1: Ο Ναός των Αγίων Αποστόλων στο Θησείο.

### 4.1 Το αντικείμενο της εφαρμογής

Ο ναός των Αγίων Αποστόλων βρίσκεται στην περιοχή του Θησειού, στο τέλος της οδού Πολυγνώτου και εντός του αρχαιολογικού χώρου της Αρχαίας Αγοράς των Αθηνών. Οι Άγιοι Απόστολοι χτίστηκαν στα 1000 – 1025 μ.Χ. κοντά στην νότια είσοδο της Αγοράς. Ήταν η πρώτη αξιόλογη αθηναϊκή εκκλησία και αφιερώθηκε στους Αγίους Αποστόλους σε ανάμνηση της διδασκαλίας του Αποστόλου Παύλου στους Αθηναίους το 51 μ.Χ. Αναστηλώθηκε το 1956 και απέκτησε την αρχική της

μορφή με αφαίρεση των επεμβάσεων που είχαν γίνει τον 19ο αιώνα. Ως μνημείο, αποτελεί μια τυπική περίπτωση εφαρμογής φωτογραμμετρικών μεθόδων για τη γεωμετρική τεκμηρίωσή του, γι' αυτό και επιλέχθηκε ως αντικείμενο δοκιμής του προτεινόμενου αλγορίθμου.

#### **4.2 Ο σαρωτής laser**

Για τη συλλογή του απαραίτητου νέφους σημείων, χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής laser Cyrax 2500 του εργαστηρίου φωτογραμμετρίας. Ο σαρωτής χρησιμοποιεί παλμικό laser διαμέτρου 6mm στα 50m απόστασης και την αρχή «χρόνου πτήσης» για την μέτρηση αποστάσεων, μετράει δηλαδή τον χρόνο που κάνει ο παλμός να επιστρέψει στον δέκτη από την στιγμή που έφυγε από τον πομπό. Η ακρίβεια στις μετρήσεις αποστάσεων είναι  $\pm 4\text{mm}$ . Για την γωνιακή εκτροπή του παλμού laser υπάρχει οπτικό σύστημα με καθρέπτες οι οποίοι περιστρέφονται με ακρίβεια  $\pm 60\mu\text{rad}$  (micro-radians). Η πυκνότητα της σάρωσης μπορεί να φτάσει τα 0,25mm στα 50m απόστασης και το μέγιστο πλήθος σημείων σε μία σάρωση μπορεί να φτάσει τα 1.000.000 (1.000 στον οριζόντιο και 1.000 στον κατακόρυφο άξονα). Έτσι, μπορεί να μετρηθεί η θέση μεμονωμένων σημείων με ακρίβεια  $\pm 6\text{mm}$  στον χώρο ή να παραχθεί ψηφιακό μοντέλο επιφανείας με ακρίβεια  $\pm 2\text{mm}$ .

#### **4.3 Η φωτογραφική μηχανή**

Για τη συλλογή των εικόνων πραγματοποιήθηκαν λήψεις με την ψηφιακή reflex φωτογραφική μηχανή Canon EOS 1D Mark II του εργαστηρίου φωτογραμμετρίας. Η συγκεκριμένη μηχανή έχει αισθητήρα CMOS 8 megapixel συνολικής επιφάνειας  $28,7 \times 19,1\text{mm}^2$  με διάσταση εικονοψηφίδας  $8,1\mu\text{m}$  και χρησιμοποιεί φακό 24mm. Οι ψηφιακές εικόνες που παράγει φτάνουν στην μέγιστη ανάλυση τις  $3504 \times 2336$  εικονοψηφίδες.

#### **4.4 Οι μετρήσεις**

Για την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου και τη σωστή του λειτουργία είναι απαραίτητη η συνταύτιση τουλάχιστον έξη φωτοσταθερών σημείων μεταξύ του νέφους των σημείων και της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης ψηφιακής εικόνας. Για αυτόν τον λόγο, και για να υπάρχει το περιθώριο μετρήσεων ελέγχου στο τελικό αποτέλεσμα, πριν τη συλλογή των δεδομένων τοιχοκολλήθηκαν 15 ειδικοί ανακλαστικοί στόχοι απλωμένοι στην επιφάνεια της ανατολικής όψης του ναού. Οι στόχοι αυτοί έχουν πολύ συγκεκριμένη και έντονη ανακλαστικότητα ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν αυτόματα από το λογισμικό του σαρωτή laser και να εξαχθούν οι συντεταγμένες τους.

Στη συνέχεια, η ανατολική όψη του ναού των Αγίων Αποστόλων σαρώθηκε από απόσταση 10m, με πυκνότητα σημείων 10mm και προέκυψε νέφος αποτελούμενο από 514281 σημεία. Το λογισμικό του σαρωτή αναγνωρίζει αυτόματα τις θέσεις των



στόχων μέσω της αυξημένης ανακλαστικότητάς τους και του σχήματος. Έτσι, σαρώνει τις περιοχές των στόχων με αυξημένη ακρίβεια ώστε να μπορέσει να γίνει ο υπολογισμός των συντεταγμένων των κέντρων τους. Το νέφος στη συνέχεια υπέστη κατάλληλη επεξεργασία για να αφαιρεθούν τμήματά του που δεν ανήκαν στην περιοχή ενδιαφέροντος της ανατολικής όψης του ναού, όπως σημεία του εδάφους καθώς και ορισμένα φυτά. Το νέφος που προέκυψε και αποτέλεσε το πρωτογενές υλικό για την υπόλοιπη διαδικασία εμπεριείχε 473736 σημεία και αποθηκεύτηκε σε σειριακό ASCII αρχείο.

Μετά την ολοκλήρωση της σάρωσης, η ανατολική όψη του ναού φωτογραφήθηκε με διαφορετικούς τρόπους για να πραγματοποιηθούν δοκιμές του αλγορίθμου. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν λήψεις με μικρές στροφές ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες του ψηφιακού φωτογραμμετρικού σταθμού SSK όπου πραγματοποιήθηκε η ορθοαναγωγή. Στη συνέχεια, και για τις ανάγκες των δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν λήψεις πολύ κοντά από το οπτικό κέντρο του σαρωτή, ώστε οι πορείες των οπτικών ακτινών να είναι παρόμοιες για τη φωτογραφία και τη σάρωση, και λήψεις μακριά από τον σαρωτή και με γωνίες στροφής μεγάλες έως πολύ έντονες. Στις τελευταίες προκλήθηκε σκόπιμα απόκρυψη πληροφορίας εξαιτίας του αναγλύφου του Ιερού του ναού όπου και θα σχολιαστεί παρακάτω.

Τέλος, οι θέσεις των στόχων προσδιορίστηκαν και με γεωδαιτικές μεθόδους, με γεωδαιτικό σταθμό Leica TCR303 και μέτρηση αποστάσεων με laser, χωρίς τη χρήση πρίσματος.

## **4.5 Η διαδικασία για το SSK**

Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας στον ψηφιακό σταθμό SSK ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία.

### **4.5.1 Προετοιμασία δεδομένων**

Για να χρησιμοποιηθεί το νέφος των σημείων στον ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό SSK πρέπει πρώτα να προηγηθεί διαδικασία γεωαναφοράς και μετασχηματισμού του συστήματος συντεταγμένων. Το σύστημα συντεταγμένων πρέπει να στραφεί έτσι ώστε το επίπεδο που ορίζουν οι άξονες X και Y να είναι παράλληλο στην ανατολική όψη του ναού, και στο επίπεδο δηλαδή που πρόκειται να προβληθεί η ορθοφωτογραφία.

Αρχικά, υπολογίζονται οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών (X, Y, Z), από τις γεωδαιτικές μετρήσεις (Hz, Vz, S). Στη συνέχεια, από τα φωτοσταθερά σημεία που ανήκουν στο ζητούμενο επίπεδο υπολογίζονται οι γωνίες στροφής που απαιτούνται για να γίνει αυτό παράλληλο με το επίπεδο που ορίζεται από τους άξονες X και Y. Αφού πραγματοποιηθεί η στροφή, το σύστημα συντεταγμένων μετασχηματίζεται από το γεωδαιτικό (X, Y, Z) στο φωτογραμμετρικό (X, Z, -Y) και προκύπτουν οι τελικές συντεταγμένες των 15 στόχων.

Η γεωαναφορά γίνεται με λογισμικό του σαρωτή και συνταυτίζοντας τα ομόλογα σημεία των στόχων από το νέφος με τις τελικές υπολογισμένες γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Καθώς οι απαραίτητες παράμετροι για τις τρεις στροφές ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) και τις τρεις μεταθέσεις ( $\chi$ ,  $\psi$ ,  $\zeta$ ) της γεωαναφοράς είναι έξη, η περίσσεια εξισώσεων που

προκύπτει από τα 15 φωτοσταθερά σημεία χρησιμοποιούνται για συνόρθωση με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με μέσο σφάλμα 3mm, μέγεθος που δηλώνει την αξιοπιστία των δυο μεθόδων υπολογισμού των συντεταγμένων των στόχων (αυτόματα μέσω του σαρωτή και χειροκίνητα με γεωδαιτικές μετρήσεις).

Ο ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός SSK δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτούσιο το νέφος σημείων, αλλά χρειάζεται ένα ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου αποτελούμενο από δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN – triangulated irregular network). Το δίκτυο κατασκευάζεται αυτοματισμένα με εφαρμογή τριγωνισμού Delaunay σε τρεις διαστάσεις.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας έχουμε όλα τα δεδομένα έτοιμα για εισαγωγή στον φωτογραμμετρικό σταθμό.

#### 4.5.2 Εισαγωγή δεδομένων

Πρώτη διαδικασία στον σταθμό SSK είναι η εισαγωγή της ψηφιακής εικόνας και η δήλωση του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής που πραγματοποίησε τη λήψη. Στη συνέχεια εισάγονται οι υπολογισμένες συντεταγμένες των φωτοσταθερών στο φωτογραμμετρικό σύστημα (και στοχεύονται στην εικόνα για να μετρηθούν οι εικονοσυντεταγμένες τους. Ακολουθεί οπισθοτομία και υπολογισμός του εξωτερικού προσανατολισμού της λήψης. Τέλος, εισάγεται το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου σε μορφή δικτύου ακανόνιστων τριγώνων και δηλώνεται η επιθυμητή διάσταση της εικονοψηφίδας στην τελική ορθοφωτογραφία. Η διαδικασία ολοκληρώνεται και ο φωτογραμμετρικός σταθμός υπολογίζει και αποθηκεύει την ορθοφωτογραφία σε αρχείο εικόνας TIFF.

Η διαδικασία όπως περιγράφηκε χρειάστηκε περίπου 2 ώρες εργασίας γραφείου.

### **4.6 Η διαδικασία με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε**

Για την παραγωγή της ίδιας ορθοφωτογραφίας με τη χρήση του προτεινόμενου αλγορίθμου μέσω του συνταχθέντος προγράμματος η απαραίτητη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί έχει ως εξής:

#### 4.6.1 Προετοιμασία Δεδομένων

Στο νέφος των σημείων δεν χρειάζεται να έχει προηγηθεί γεωαναφορά ούτε και να είναι σε μορφή επιφανείας ακανόνιστων τριγώνων, οπότε το πρωτογενές νέφος που προκύπτει μετά τον καθαρισμό της άχρηστης πληροφορίας είναι αμέσως έτοιμο για χρήση. Απαραίτητο είναι να συνταχθούν δύο αρχεία με τις συντεταγμένες των φωτοσταθερών σημείων και με τις ομόλογες εικονοσυντεταγμένες τους στην ψηφιακή εικόνα.

#### 4.6.2 Εισαγωγή Δεδομένων

Τα δεδομένα εισάγονται στην εφαρμογή με την μορφή παραμέτρων στη γραμμή εντολών (command line parameters) όπως παρουσιάζονται στις οδηγίες του προγράμματος στο παράρτημα. Τα εισαγόμενα δεδομένα είναι το νέφος σημείων που χρησιμοποιείται, η αρχική ψηφιακή εικόνα, οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών σημείων και οι εικονοσυντεταγμένες των εικόνων τους στην εικόνα, μια εκτίμηση της τιμής της εστιακής απόστασης του φακού της φωτομηχανής μετρημένη σε μονάδες pixel (στην προκειμένη περίπτωση η μια εικονοψηφίδα έχει διάσταση 8,1μm), το επίπεδο στο οποίο θα γίνει η ορθή προβολή και η διάσταση της εικονοψηφίδας στην τελική ορθοφωτογραφία. Σημειώνεται ότι η κλίμακα φωτογράφισης και η πυκνότητα του νέφους σημείων που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται πάντα από τη ζητούμενη κλίμακα της παραγόμενης ορθοφωτογραφίας. Στην περίπτωση που η ανάλυση της αρχικής εικόνας είναι χαμηλή ή το νέφος των σημείων αραιό, αυτό περιορίζει την ανάλυση άρα και την κλίμακα της ορθοφωτογραφίας.

Με την εκτέλεση του προγράμματος υπολογίζονται ο εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός της ψηφιακής εικόνας, χρωματίζεται το νέφος και προβάλλεται ορθά στο επιλεγμένο επίπεδο προβολής. Η διαδικασία της εκτέλεσης χρειάζεται μερικά δευτερόλεπτα για να ολοκληρωθεί ενώ η συνολική διαδικασία παραγωγής της ορθοφωτογραφίας μόλις μερικά λεπτά.

# 5 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

## 5.1 Αποτελέσματα του SSK

Για να μπορέσει να αξιολογηθεί και να εκτιμηθεί η προτεινόμενη μέθοδος παραγωγής ορθοφωτογραφίας, πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη διαδικασία και σε ένα εμπορικό ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό και προέκυψαν ορισμένες ορθοφωτογραφίες. Οι ορθοφωτογραφίες αυτές χωρίστηκαν ανάλογα με την κλίμακά τους και ανάλογα με τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν για τον εξωτερικό προσανατολισμό ώστε να υπάρχει μια αντιστοιχία μεταξύ των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων και να μπορούν αυτά να συγκριθούν. Έτσι, προέκυψαν ορθοφωτογραφίες με εικονοψηφίδα μεγέθους 5mm, 10mm, 15mm και 20mm και με τη χρήση 7, 8, 10 και 15 φωτοσταθερών σημείων για τον προσανατολισμό. Για όλες τις ορθοφωτογραφίες χρησιμοποιήθηκε η ίδια αρχική εικόνα η οποία παρουσιάζει μικρές μόνο στροφές και το ίδιο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου που προέκυψε από το αρχικό νέφος σημείων.

## 5.2 Αποτελέσματα του προγράμματος

Οι ίδιες ορθοφωτογραφίες που δημιουργήθηκαν με τον ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό δημιουργήθηκαν και με το προτεινόμενο πρόγραμμα με την προσθήκη μιας ορθοφωτογραφίας παραγμένης με τη χρήση 6 μόνο φωτοσταθερών. Ωστόσο, πέρα από τις 17 αυτές ορθοφωτογραφίες δημιουργήθηκαν ακόμα δύο, με μέγεθος εικονοψηφίδας 10mm και τη χρήση διαφορετικών αρχικών ψηφιακών εικόνων οι οποίες παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες γωνίες στροφής σε σχέση με το επίπεδο προβολής. Αυτές οι φωτογραφίες δεν θα μπορούσαν να αποτελέσουν αρχικά δεδομένα για χρήση στον φωτογραμμετρικό σταθμό, ωστόσο τα αποτελέσματα που προκύπτουν με την προτεινόμενη μέθοδο είναι ικανοποιητικά.

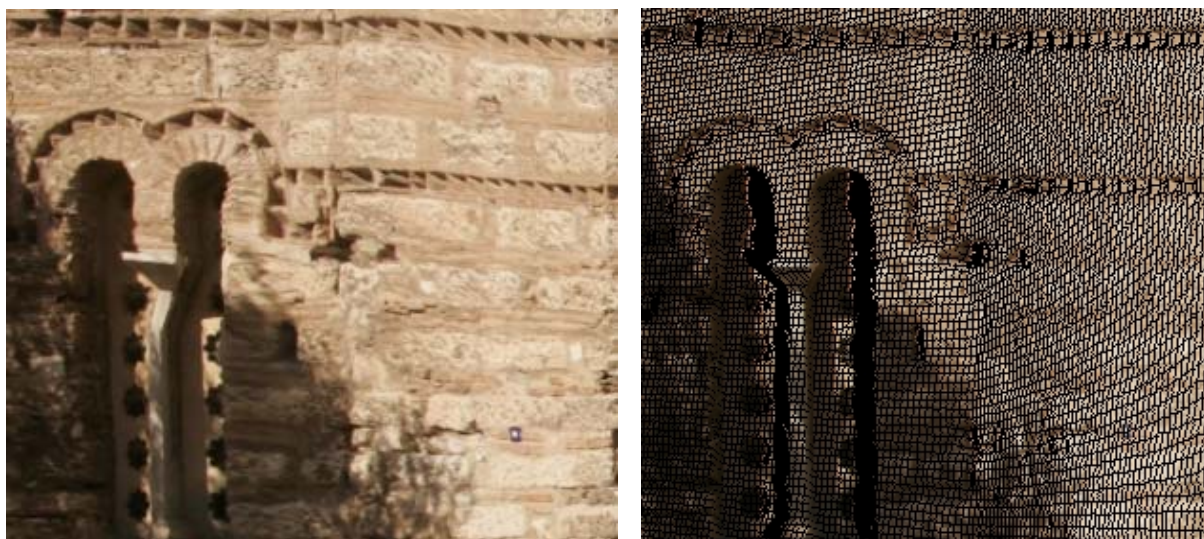
## 5.3 Σε πρώτο στάδιο αξιολόγηση

Μελετώντας τις ορθοφωτογραφίες που παρήχθησαν από το ψηφιακό φωτογραμμετρικό σταθμό SSK, οπτικά και χωρίς τη διενέργεια μετρήσεων ελέγχου, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Το αποτέλεσμα φαίνεται οπτικά σωστό στις περιοχές που καλύπτουν τα φωτοσταθερά. Στις ψηλότερες περιοχές ωστόσο που δεν υπάρχουν φωτοσταθερά η εικόνα φαίνεται αλλοιωμένη, με τις ευθείες να καμπυλώνονται και τις οριζόντιες γραμμές να χάνουν την παραλληλία τους.
- Η αισθητική ποιότητα του αποτελέσματος δεν δείχνει να επηρεάζεται όσο η κλίμακα της ορθοφωτογραφίας μεγαλώνει. Έτσι, προκύπτουν αποτελέσματα αντίστοιχης ποιότητας είτε το μέγεθος της εικονοψηφίδας είναι 20mm, είτε είναι 5mm.

Μελετώντας τις ορθοφωτογραφίες που παρήχθησαν από το συνταχθέν λογισμικό μέσω της προτεινόμενης μεθόδου, οπτικά και χωρίς τη διενέργεια μετρήσεων ελέγχου, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Το αποτέλεσμα φαίνεται οπτικά σωστό τόσο στις περιοχές που καλύπτονται από φωτοσταθερά όσο και στις ψηλότερες περιοχές. Οι ευθείες δεν καμπυλώνονται και η παραλληλία δείχνει ανέπαφη σε ολόκληρη την έκταση του αντικειμένου.
- Η αισθητική ποιότητα του αποτελέσματος επηρεάζεται αρνητικά όσο η κλίμακα της ορθοφωτογραφίας μεγαλώνει, δημιουργώντας κενά στην εικόνα. Αυτό, ωστόσο, ήταν αναμενόμενο και αποτελεί έναν βασικό περιορισμό της προτεινόμενης μεθόδου, πως η κλίμακα της παραγόμενης ορθοφωτογραφίας είναι άμεσα εξαρτώμενη από την πυκνότητα του νέφους των σημείων. Το αποτέλεσμα βελτιώνεται σε μερικό βαθμό με την εφαρμογή του αλγορίθμου πλήρωσης κενών εικονοψηφίδων επιτρέποντας την σχετική αύξηση της κλίμακας.

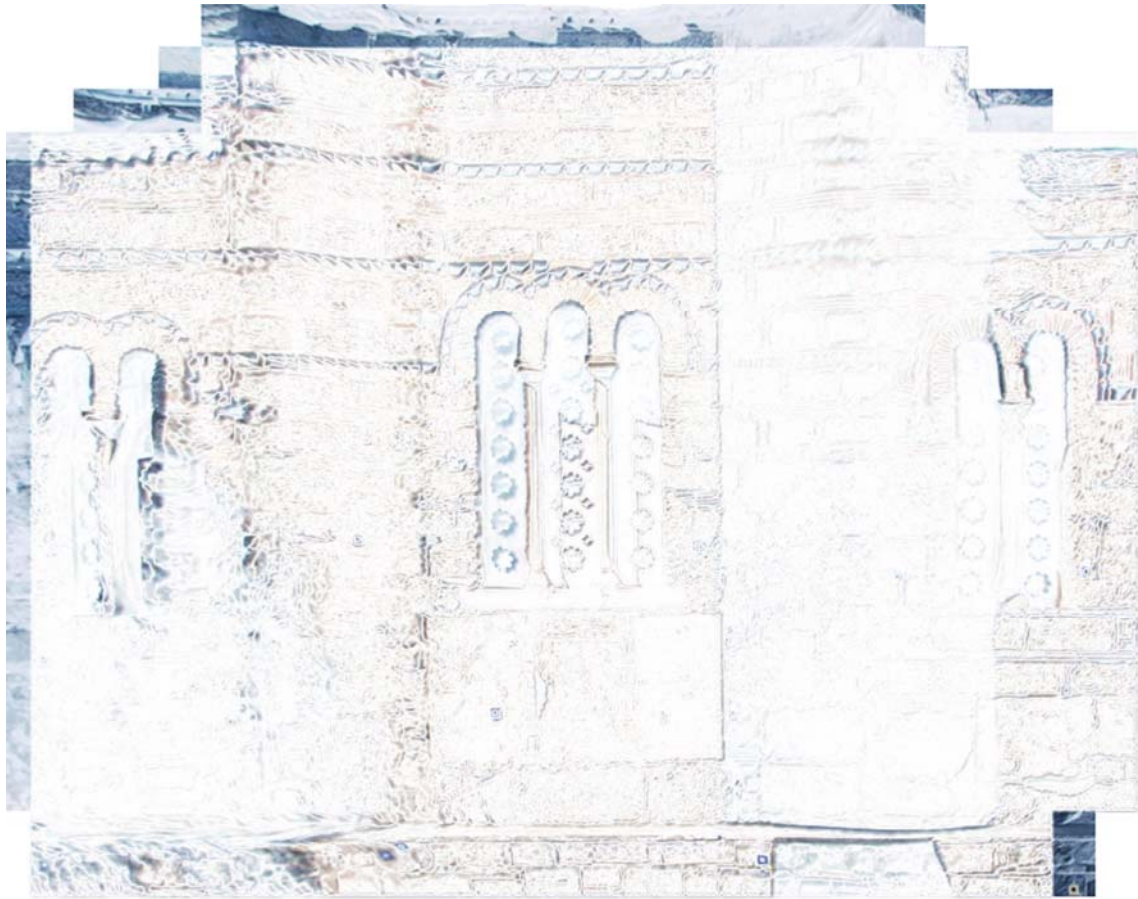


**Εικόνες 5.1, 5.2: Η ίδια λεπτομέρεια πρώτα από το SSK και στη συνέχεια από το πρόγραμμα που συντάχθηκε. Η διάσταση της εικονοψηφίδας είναι 10mm. Στην πρώτη εικόνα φαίνονται παραμορφώσεις, ενώ στην δεύτερη παρουσιάζονται κενές εικονοψηφίδες.**

Μια πρώτη σύγκριση μεταξύ των ορθοφωτογραφιών που δημιουργήθηκαν με τον φωτογραμμετρικό σταθμό SSK έγινε πραγματοποιώντας πράξεις μεταξύ των εικόνων. Συγκεκριμένα, μέσω του ελεύθερου λογισμικού επεξεργασίας εικόνας GIMP [<http://www.gimp.org/>] παρήχθησαν οι εικόνες ‘διαφοράς’ μεταξύ των ορθοφωτογραφιών του SSK. Κατά την διαδικασία της πράξης της ‘διαφοράς’, συγκρίνονται μία – μία οι τιμές των τριών καναλιών των χρωμάτων (R, G, B – κόκκινο, πράσινο, μπλε) των εικονοψηφίδων δύο εικόνων και η αριθμητική διαφορά των τιμών αποθηκεύεται σε εικονοψηφίδα μιας νέα τελικής εικόνας. Για οπτική διευκόλυνση, εδώ παρουσιάζονται οι αρνητικές των τελικών εικόνων. Έτσι, οι περιοχές της εικόνας της διαφοράς που φαίνονται λευκές δηλώνουν την ομοιότητα των δύο αρχικών εικόνων.



**Εικόνα 5.3: Η εικόνα διαφοράς μεταξύ των ορθοφωτογραφιών του SSK με εικονοψηφίδα 10 και 15mm.**



**Εικόνα 5.4: Η εικόνα διαφοράς μεταξύ των ορθοφωτογραφιών του SSK με εικονοψηφίδα 10 και 20mm.**

Επίσης, παρήχθησαν εικόνες διαφοράς μεταξύ των ορθοφωτογραφιών που προέκυψαν με τη χρήση 7, 8, 10 και 15 φωτοσταθερά σημεία.



**Εικόνα 5.5: Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του SSK με χρήση 15 και 10 φωτοσταθερών.**





**Εικόνα 5.6: Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του SSK με χρήση 15 και 8 φωτοσταθερών.**

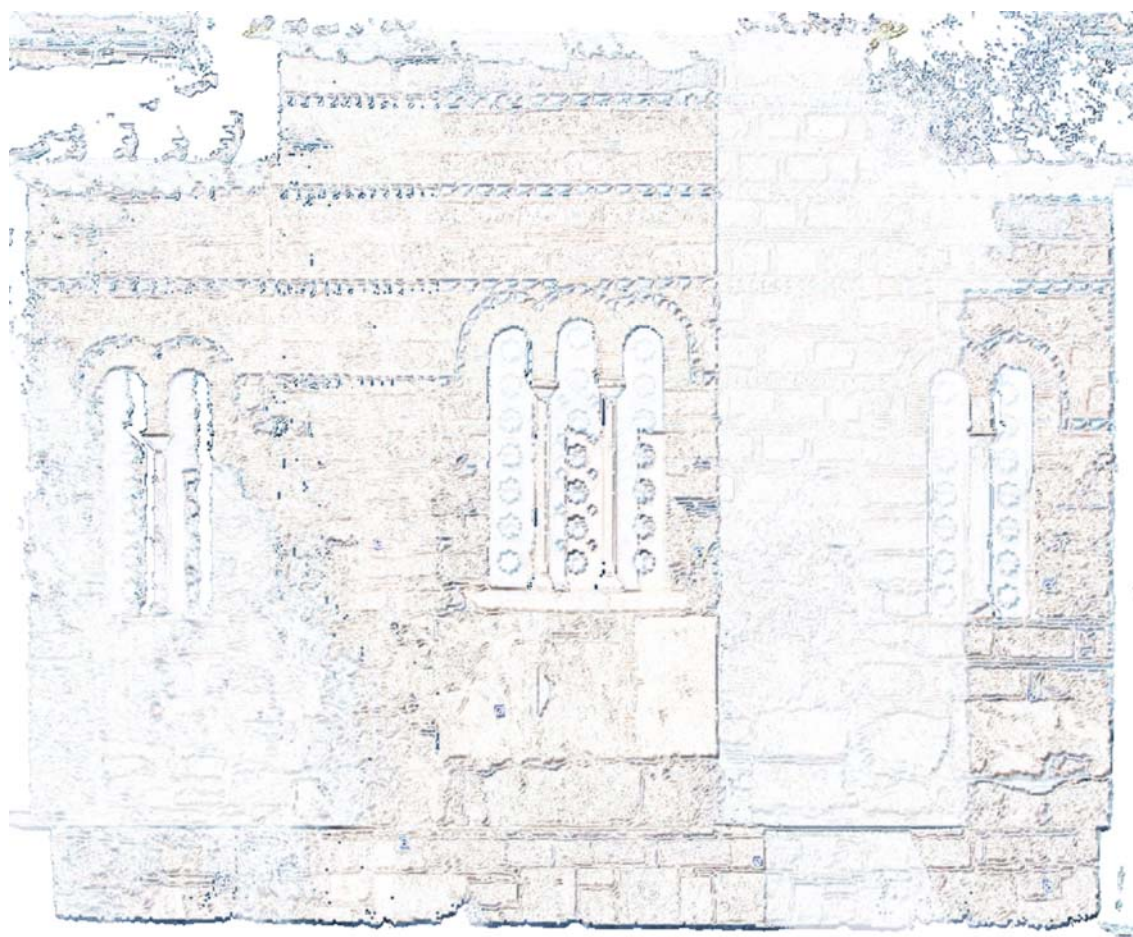


**Εικόνα 5.7: Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του SSK με χρήση 15 και 7 φωτοσταθερών.**

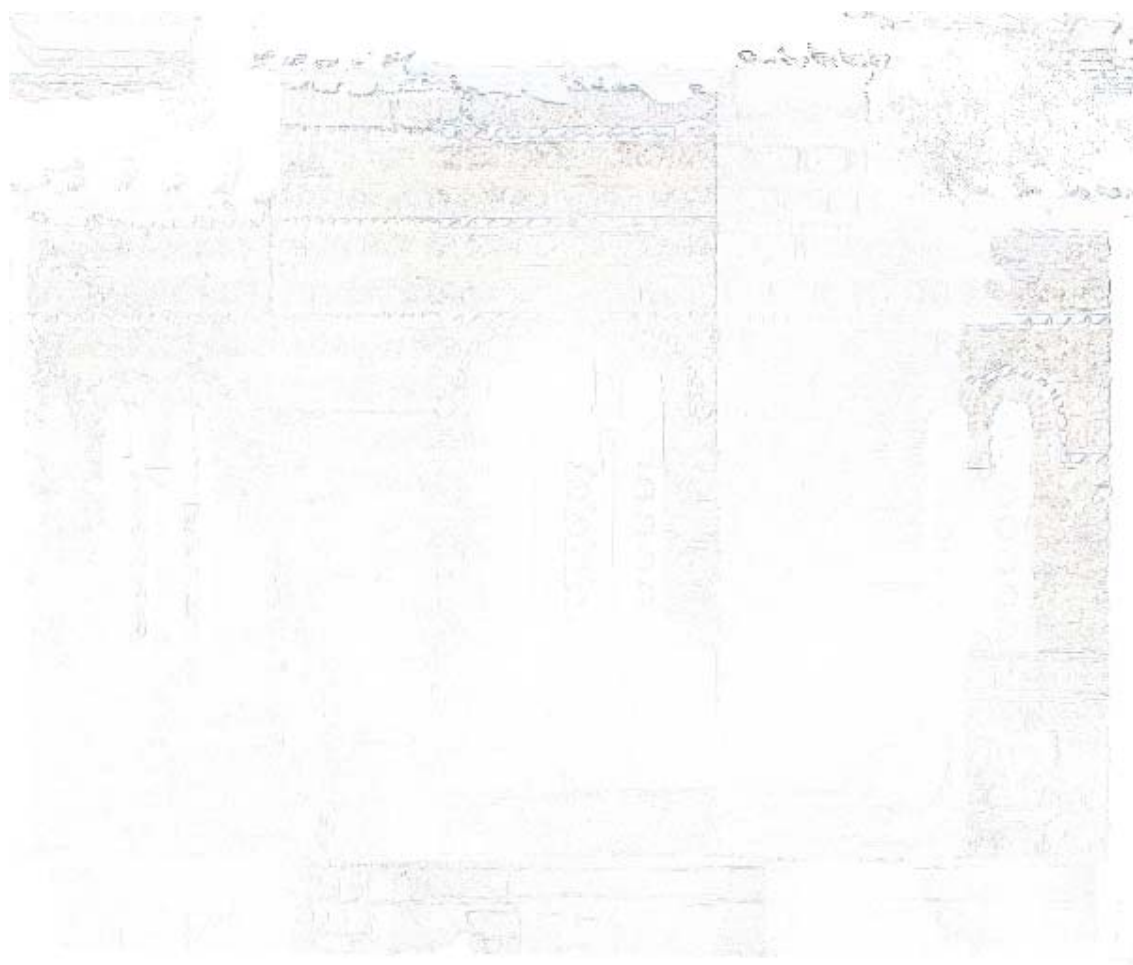
Αντίστοιχα, παρουσιάζονται οι εικόνες διαφοράς για τις ορθοφωτογραφίες που προέκυψαν από το πρόγραμμα που συντάχθηκε.



**Εικόνα 5.8:** Η εικόνα διαφοράς μεταξύ των ορθοφωτογραφιών του συνταχθέντος προγράμματος με εικονοπηφίδα 10 και 15mm.



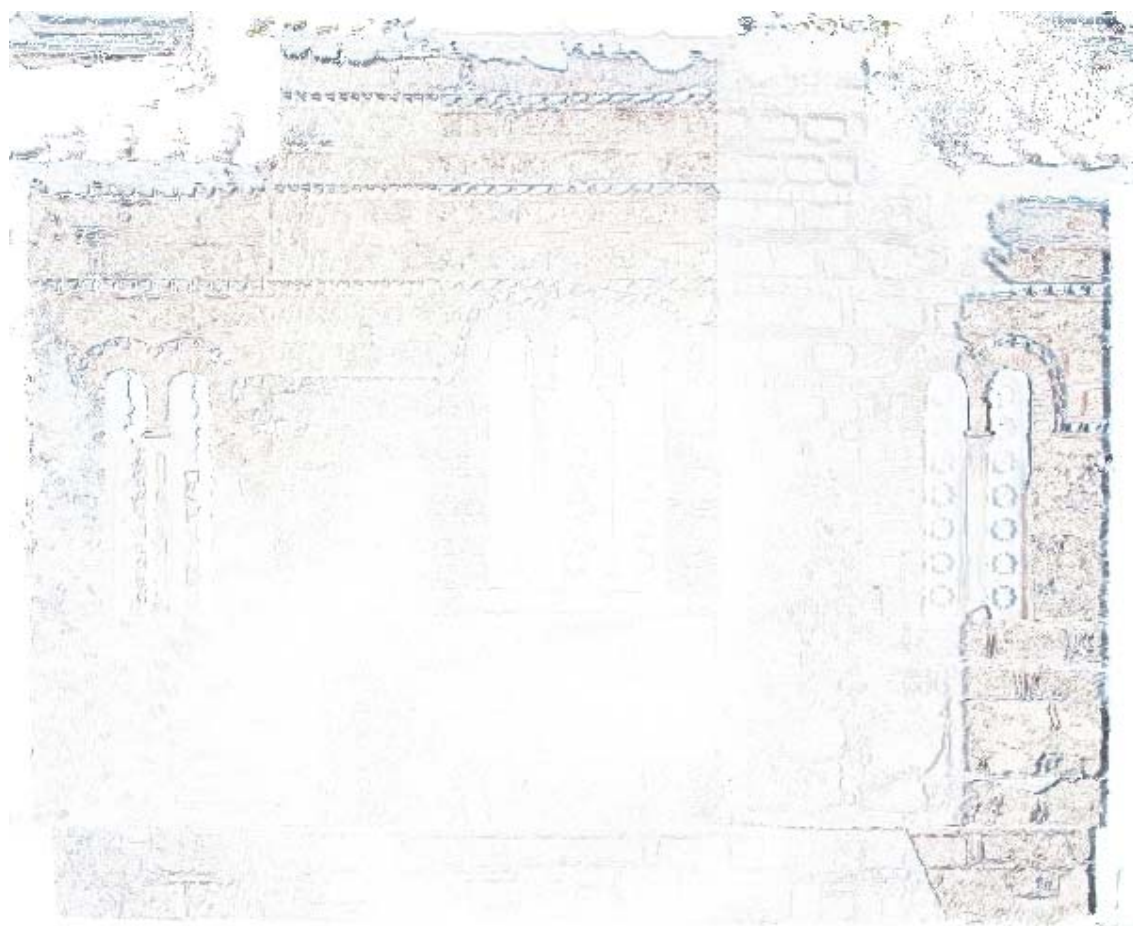
**Εικόνα 5.9: Η εικόνα διαφοράς μεταξύ των ορθοφωτογραφιών του συνταχθέντος προγράμματος με εικονοψηφίδα 10 και 20mm.**



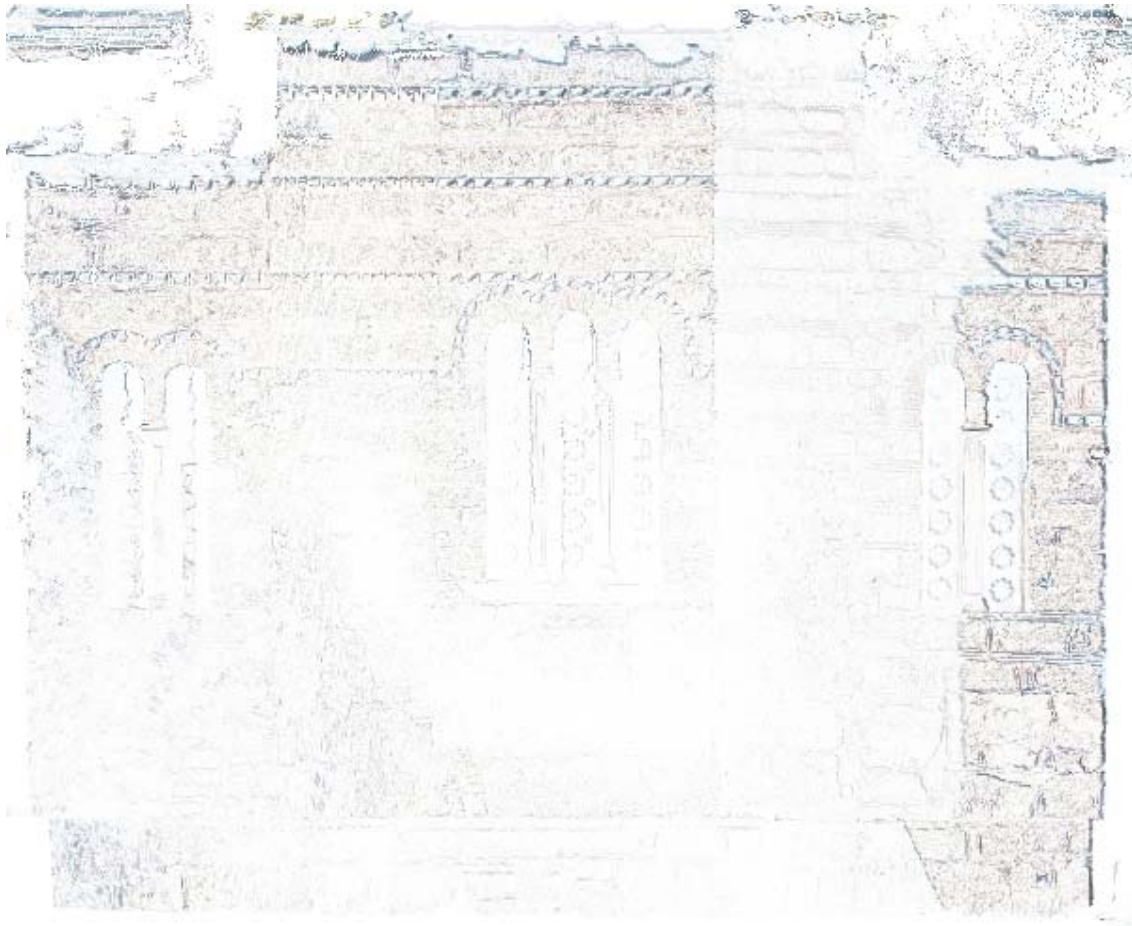
**Εικόνα 5.10:** Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του συνταχθέντος προγράμματος με χρήση 15 και 10 φωτοσταθερών.



**Εικόνα 5.11: Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του συνταχθέντος προγράμματος με χρήση 15 και 8 φωτοσταθερών.**



**Εικόνα 5.12: Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του συνταχθέντος προγράμματος με χρήση 15 και 7 φωτοσταθερών.**



**Εικόνα 5.13: Η εικόνα διαφοράς των ορθοφωτογραφιών του συνταχθέντος προγράμματος με χρήση 15 και 6 φωτοσταθερών.**

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις διαφορές των εικόνων είναι τα εξής:

Παρατηρούνται αρκετές διαφορές μεταξύ των ορθοφωτογραφιών του SSK ανάλογα με τα φωτοσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν. Αντίθετα, τα αποτελέσματα του προγράμματος που συντάχθηκε παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια. Αυτό δείχνει ότι τα αποτελέσματα του φωτογραμμετρικού σταθμού εξαρτώνται πολύ περισσότερο από τον επαρκή αριθμό και την σωστή επιλογή των φωτοσταθερών, σε αντίθεση με το συνταχθέν πρόγραμμα που δίνει παρόμοια αποτελέσματα ανεξάρτητα του αριθμού των φωτοσταθερών.

Τόσο για το συνταχθέν πρόγραμμα όσο και για το SSK, η ποιότητα της ορθοφωτογραφίας αλλοιώνεται όσο το σημείο ενδιαφέροντος απομακρύνεται από τα φωτοσταθερά. Έτσι, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στις ψηλές περιοχές που δεν καλύπτονται από φωτοσταθερά, και στις ακραίες δεξιά και αριστερά περιοχές.

Πρέπει να σημειωθεί πως στις περιοχές της αρχικής εικόνας που καλύπτονται από σκιές, η συγκεκριμένη μέθοδος σύγκρισης δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Το γεγονός ότι οι περιοχές είναι σκιερές έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μικρότερη αντίθεση χρωμάτων, συνεπώς και μικρότερες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών ορθοφωτογραφιών. Έτσι, η δεξιά πλευρά του Ιερού του ναού που στην αρχική εικόνα είναι υπό σκιά, θα έπρεπε να παρουσιάζει μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των ορθοφωτογραφιών από αυτές που αποτυπώνονται με τη μέθοδο. Για να προέκυπταν



συνολικά αξιόπιστα αποτελέσματα, θα έπρεπε να είχε προηγηθεί ραδιομετρική επεξεργασία στις εικόνες ώστε να εξαλειφθούν τα φαινόμενα των σκιών.

#### **5.4 Μετρητική αξιολόγηση**

Για να μπορέσει να γίνει μια αντικειμενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του προγράμματος, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες μετρήσεις σε ορθοφωτογραφίες που παρήχθησαν με διαφορετικές ρυθμίσεις και διαφορετικά αρχικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, για τη μετρητική αξιολόγηση επιλέχθηκαν ορθοφωτογραφίες με εικονοψηφίδα 10mm καθώς αυτή η ανάλυση κρίθηκε πως έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα για την πυκνότητα του νέφους σημείων που χρησιμοποιήθηκε. Οι ορθοφωτογραφίες προέκυψαν με τη χρήση 7, 8, 10 και 15 φωτοσταθερών σημείων και αρχική εικόνα με ελάχιστες γωνίες λήψης για να δώσει αποδεκτά αποτελέσματα ο φωτογραμμετρικός σταθμός SSK. Μετρητική σύγκριση ακολούθησε και για ορθοφωτογραφίες με εικονοψηφίδα 10mm, χρήση 15 φωτοσταθερών σημείων αλλά από διαφορετικές αρχικές εικόνες που παρουσιάζουν μεγάλες στροφές και που οι 'κλασσικές' μέθοδοι παραγωγής ορθοφωτογραφίας θα αδυνατούσαν να δώσουν αποτελέσματα.

Αρχικά παρουσιάζεται η αρχική εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών μέσω του συνταχθέντος προγράμματος, που χάριν συντομίας θα γράφεται με την κωδική του ονομασία «ZPR», αλλά και του φωτογραμμετρικού σταθμού SSK, με προσημασμένα τα 15 φωτοσταθερά σημεία που περιέχει.



**Εικόνα 5.14: Η αρχική εικόνα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών με προσημασμένα τα 15 φωτοσταθερά.**

Με βάση την παραπάνω εικόνα παρήχθησαν 4 σετ ορθοφωτογραφιών με τις δυο μεθόδους:

A) με χρήση 10 φωτοσταθερών

B) με χρήση 8 φωτοσταθερών

C) με χρήση 7 φωτοσταθερών

D) με χρήση και των 15 μετρημένων φωτοσταθερών.

Με το συνταχθέν πρόγραμμα δημιουργήθηκε και η ορθοφωτογραφία:

E) με χρήση μόλις 6 φωτοσταθερών.

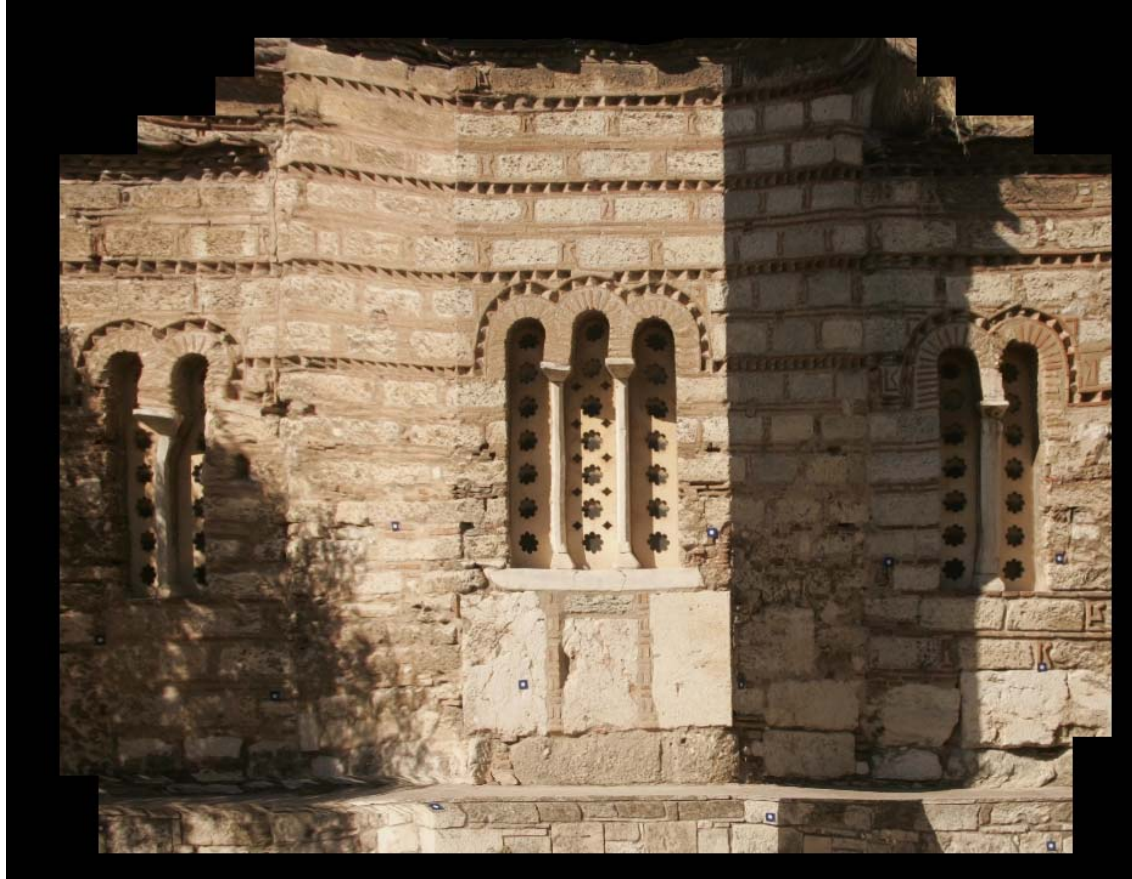
Οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών στις ορθοφωτογραφίες μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν οι διαφορές τους από τις πραγματικές συντεταγμένες που έχουν υπολογιστεί γεωδαιτικά. Επίσης, υπολογίστηκαν όλες οι αποστάσεις μεταξύ των 15 φωτοσταθερών, και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες αποστάσεις όπως προκύπτουν από τις γεωδαιτικές μετρήσεις.

Σημειώνεται πως ως σημείο αναφοράς για να βρεθούν όλες οι ορθοφωτογραφίες στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων επιλέχθηκε ο στόχος 6, οπότε και θα έπρεπε να εξαιρεθεί της στατιστικής επεξεργασίας.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για την κάθε ορθοφωτογραφία:

Για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών Α χρησιμοποιήθηκαν τα 10 φωτοσταθερά: 2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15.

### Με το SSK



Εικόνα 5.15: Ορθοφωτογραφία, SSK, 10 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

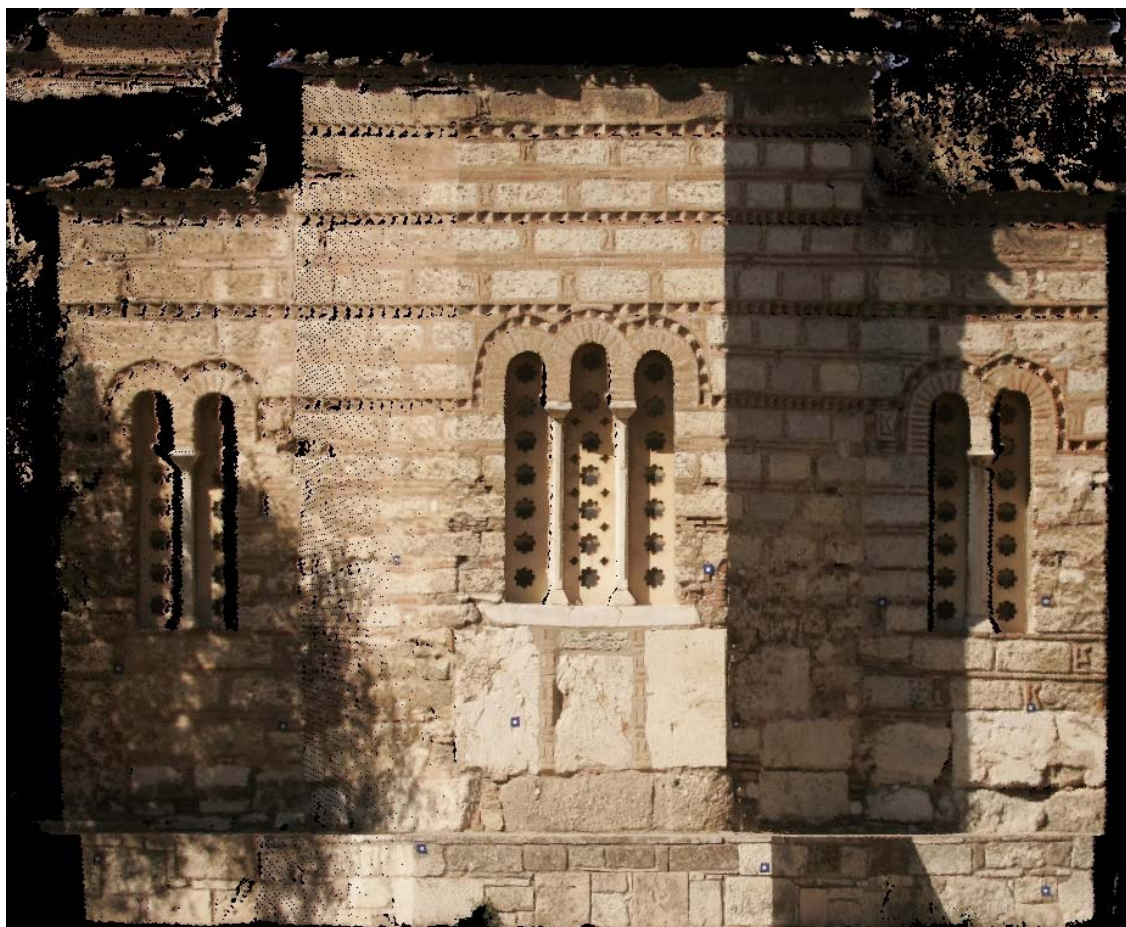
	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-103	-80	130	91	-162
2	65	-21	68	<b>RMS <math>\Delta y</math></b>	<b>Max <math>\Delta y</math></b>
3	-70	-60	92	66	139
4	24	-10	26	<b>RMS Απόσταση</b>	<b>Max Απόσταση</b>
5	-45	-67	81	113	190
6	0	0	0	<b>Μέσο <math>\Delta x</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση x</b>
7	74	71	103	-61	70
8	-90	-41	99	<b>Μέσο <math>\Delta y</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση y</b>
9	-81	14	82	13	67
10	-86	139	163	<b>Μέση Απόσταση</b>	<b>Τυπική απόκλιση Απόστασης</b>
11	-111	-4	111	102	50
12	-123	115	168		
13	-98	19	100		
14	-111	23	113		
15	-162	99	190		

Πίνακας 5.1: Διαφορές συντεταγμένων σε χιλιοστά. SSK, 10 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-68													
3	25	-132												
4	36	-40	-56											
5	59	-110	9	-98										
6	93	-55	72	-34	64									
7	83	13	32	71	168	-105								
8	19	-148	-12	-161	-64	-127	-232							
9	14	-135	-10	-148	-51	-115	-219	13						
10	-44	-151	-67	-156	-58	-122	-226	6	-7					
11	-1	-162	-28	-191	-93	-157	-262	-30	-42	-35				
12	-71	-191	-95	-208	-110	-174	-279	-47	-59	-52	17			
13	13	-146	-14	-173	-75	-139	-243	-11	-24	-17	18	35		
14	-12	-166	-38	-191	-93	-157	-262	-30	-42	-35	0	17	18	
15	-97	-230	-122	-263	-165	-229	-334	-102	-115	-107	-72	-55	91	-72
Max		RMS	Μέσο	Τυπική Απόκλιση										
	-334	130	-89	95										

Πίνακας 5.2: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
SSK, 10 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

Με το συνταχθέν πρόγραμμα



Εικόνα 5.16: Ορθοφωτογραφία, ZPR, 10 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-2	5	5	3	-8
2	-8	3	9	RMS $\Delta y$	Max $\Delta y$
3	-3	2	4	3	7
4	3	4	5	RMS Απόσταση	Max Απόσταση
5	-3	3	4	5	9
6	0	0	0	Μέσο $\Delta x$	Τυπική απόκλιση x
7	5	6	8	-1	3
8	-5	-1	5	Μέσο $\Delta y$	Τυπική απόκλιση y
9	-1	1	1	2	3
10	-2	-2	3	Μέση Απόσταση	Τυπική απόκλιση Απόστασης
11	0	4	4	4	3
12	-3	1	3		
13	2	7	7		
14	0	2	2		
15	0	0	0		

Πίνακας 5.3: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 10 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	3													
3	0	3												
4	4	11	-3											
5	-2	4	1	-8										
6	3	7	3	-4	4									
7	6	13	3	3	11	-7								
8	-4	1	-3	-11	-3	-7	-14							
9	1	6	2	-6	3	-1	-8	6						
10	2	6	2	-7	1	-3	-10	4	-1					
11	2	8	3	-4	4	0	-7	7	1	3				
12	0	5	0	-8	0	-4	-11	3	-3	-1	4			
13	4	11	6	-1	7	3	-4	10	4	6	3	7		
14	2	8	3	-4	4	0	-7	7	1	3	0	4	3	
15	3	8	3	-4	4	0	-7	7	1	3	0	4	3	0
<b>Max</b>	<b>RMS</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>											
	-14	6	1	6										

Πίνακας 5.4: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 10 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$fx=3144.15$ ,  $fy=3133.24$

$x_0=1811.98$ ,  $y_0=1204.49$

Distortion Coefficients:

-0.121235

0.036514

0.001284

0.001675

Rotation matrix:

0.999899 -0.012206 0.007275

-0.011879 -0.998985 -0.043454

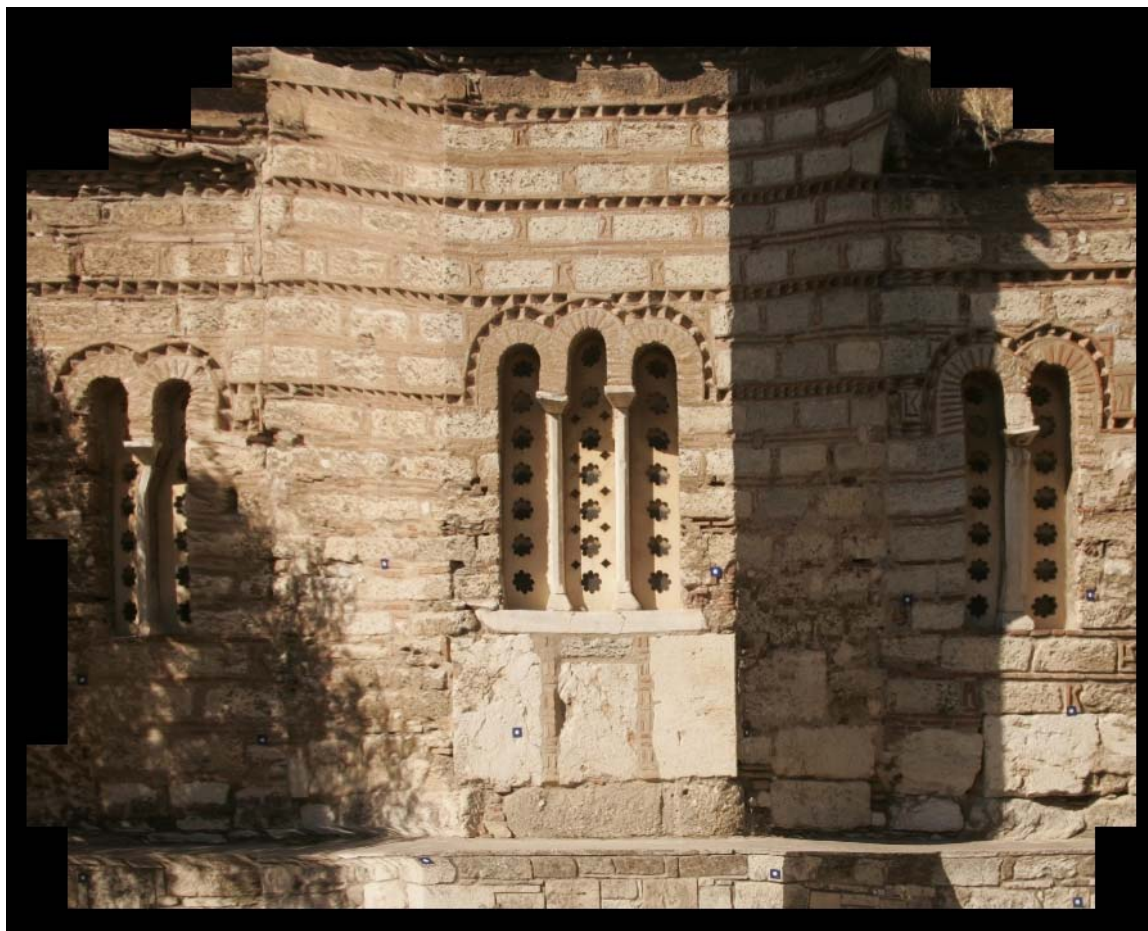
0.007798 0.043363 -0.999029

Translation matrix:

-0.085169 0.167570 -1.043494

Για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών Β χρησιμοποιήθηκαν τα 8 φωτοσταθερά: 1, 2, 5, 7, 8, 10, 13, 15.

### Με το SSK



Εικόνα 5.17: Ορθοφωτογραφία, SSK, 8 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-128	-26	131	61	-128
2	41	-6	41	<b>RMS <math>\Delta y</math></b>	<b>Max <math>\Delta y</math></b>
3	-78	-26	82	49	91
4	-15	-3	15	<b>RMS Απόσταση</b>	<b>Max Απόσταση</b>
5	-62	-11	63	78	136
6	0	0	0	<b>Μέσο <math>\Delta x</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση x</b>
7	57	45	73	-8	62
8	-46	0	46	<b>Μέσο <math>\Delta y</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση y</b>
9	-23	13	26	28	42
10	-41	91	100	<b>Μέση Απόσταση</b>	<b>Τυπική απόκλιση Απόστασης</b>
11	23	54	59	68	39
12	-37	82	90		
13	104	88	136		
14	81	51	96		
15	8	66	66		

Πίνακας 5.5: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά. SSK, 8 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-29													
3	47	-107												
4	60	-55	-28											
5	67	-76	21	-66										
6	124	-37	79	21	88									
7	127	18	60	102	168	-81								
8	85	-76	39	-44	23	-65	-146							
9	101	-59	55	-11	55	-33	-113	33						
10	51	-82	4	-37	30	-58	-139	7	-25					
11	158	2	115	54	120	33	-48	98	65	91				
12	59	-80	12	-31	35	-52	-133	13	-20	6	85			
13	240	86	198	168	235	147	66	212	180	205	115	199		
14	206	49	161	136	202	115	34	180	147	173	82	167	33	
15	112	-35	66	33	99	11	-69	76	44	69	-21	64	136	-103
Max	RMS	Μέσο	Τυπική Απόκλιση											
	240	99	38	92										

Πίνακας 5.6: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
SSK, 8 φωτοσταθερά, 10mm pixel.



Με το συνταχθέν πρόγραμμα:



Εικόνα 5.18: Ορθοφωτογραφία, ZPR, 8 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-8	5	9	9	-16
2	-16	12	20	RMS $\Delta y$	Max $\Delta y$
3	13	-9	16	7	12
4	14	6	15	RMS Απόσταση	Max Απόσταση
5	-12	11	16	11	20
6	0	0	0	Μέσο $\Delta x$	Τυπική απόκλιση x
7	-6	9	11	-4	8
8	-9	8	12	Μέσο $\Delta y$	Τυπική απόκλιση y
9	0	2	2	5	6
10	-7	6	9	Μέση Απόσταση	Τυπική απόκλιση Απόστασης
11	-4	-3	5	10	6
12	-3	2	4		
13	-9	10	13		
14	-8	1	8		
15	-5	9	10		

Πίνακας 5.7: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά. ZPR, 8 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-6													
3	24	12												
4	14	29	-15											
5	-2	2	3	-37										
6	9	11	-13	-20	17									
7	0	10	-26	-28	8	8								
8	0	5	-15	-33	4	-13	-4							
9	8	14	-13	-20	17	0	8	13						
10	1	9	-23	-30	7	-10	-1	3	-10					
11	3	7	-15	-25	11	-6	3	7	-6	4				
12	6	13	-18	-24	13	-4	4	8	-4	6	-1			
13	-1	6	-19	-33	4	-13	-4	0	-13	-3	-7	-8		
14	0	6	-21	-31	6	-11	-3	1	-11	-1	-6	-7	-1	
15	2	11	-21	-27	10	-7	1	6	-7	3	-1	-3	0	4
	<b>Max</b>	<b>RMS</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>										
	-37	14	-4	13										

Πίνακας 5.8: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 8 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$f_x=3252.9$ ,  $f_y=3199.59$

$x_0=1845.16$ ,  $y_0=1258.09$

Distortion Coefficients:

-0.207214

0.194816

0.024952

0.010255

Rotation matrix:

0.999621 -0.007792 0.026418

-0.007431 -0.999878 -0.013750

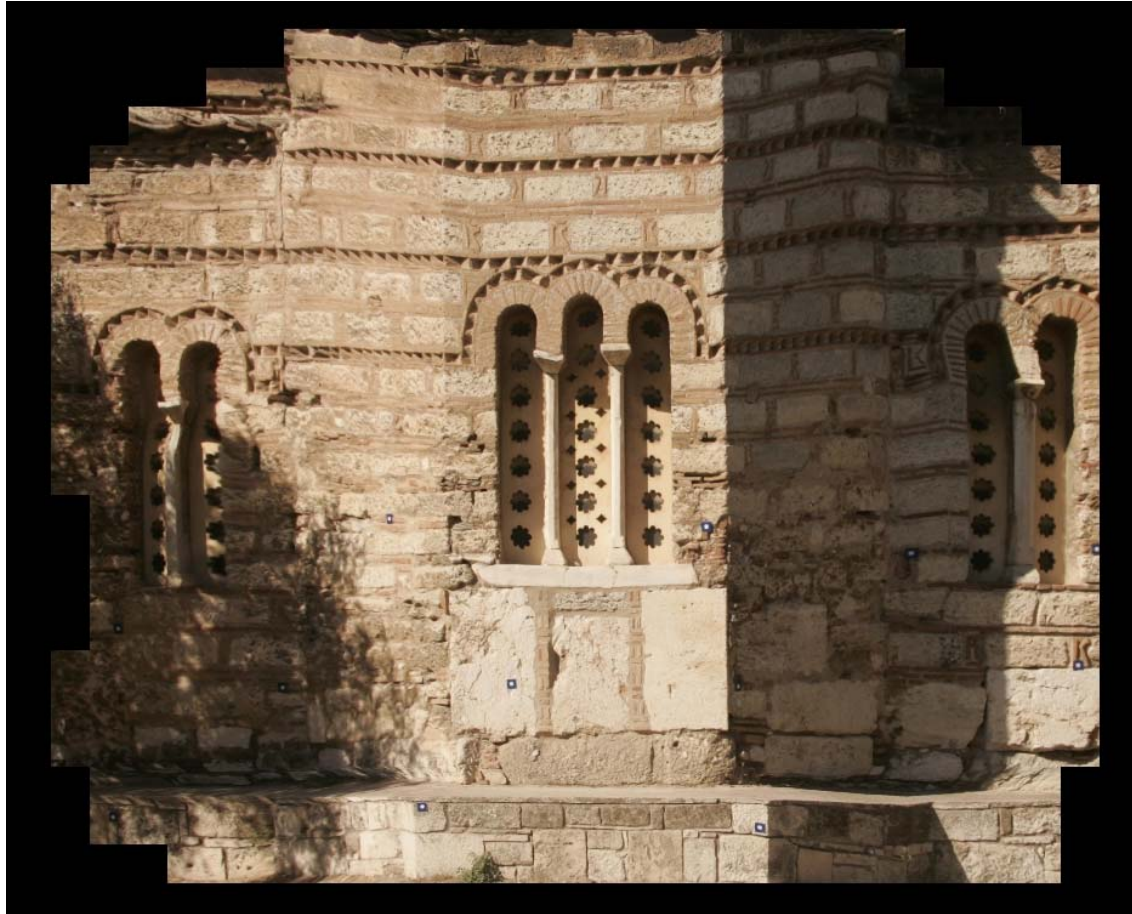
0.026522 0.013548 -0.999556

Translation matrix:

0.022171 0.330098 -0.721739

Για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών C χρησιμοποιήθηκαν τα 7 φωτοσταθερά: 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10.

### Με το SSK



Εικόνα 5.19: Ορθοφωτογραφία, SSK, 7 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

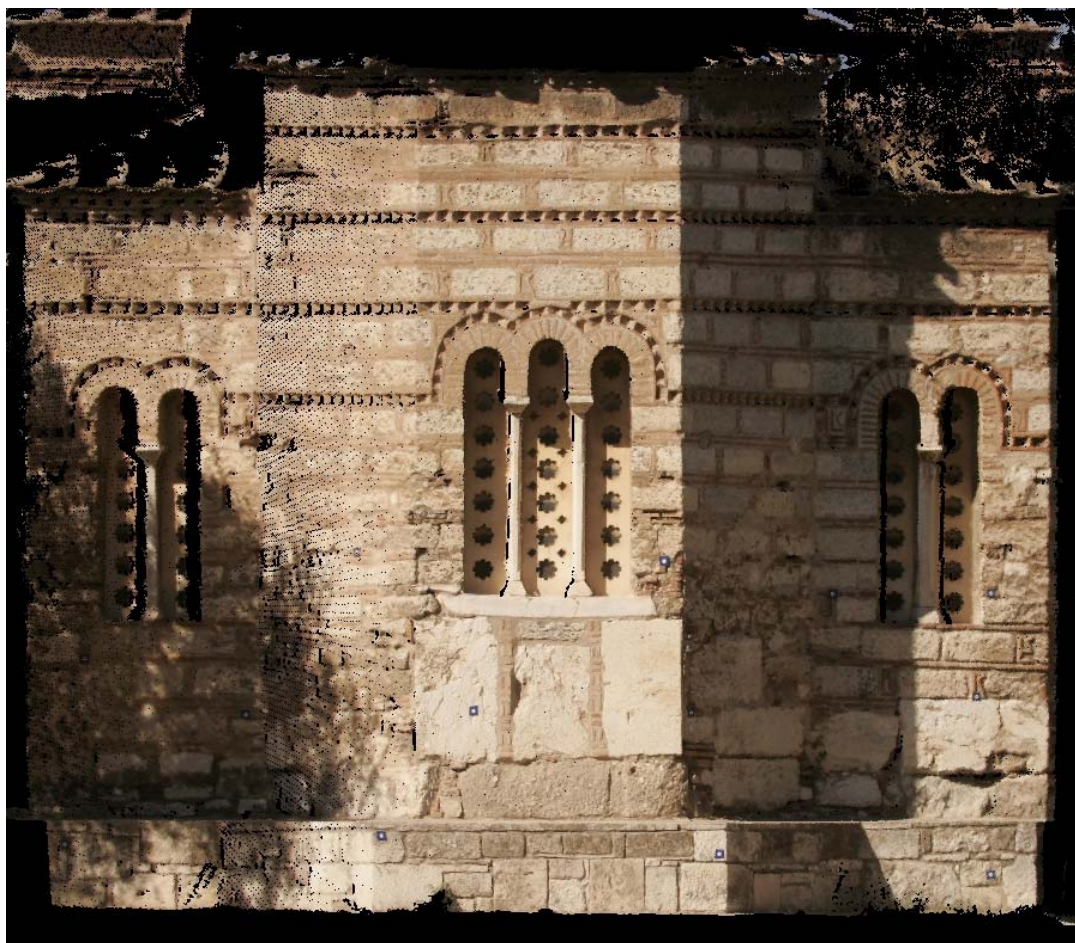
	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	15	20	25	196	467
2	137	28	140	<b>RMS <math>\Delta y</math></b>	<b>Max <math>\Delta y</math></b>
3	17	4	17	263	-965
4	90	20	92	<b>RMS Απόσταση</b>	<b>Max Απόσταση</b>
5	-37	-965	966	328	966
6	0	0	0	<b>Μέσο <math>\Delta x</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση x</b>
7	33	34	47	118	163
8	16	41	44	<b>Μέσο <math>\Delta y</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση y</b>
9	53	-3	53	-44	269
10	-3	4	5	<b>Μέση Απόσταση</b>	<b>Τυπική απόκλιση Απόστασης</b>
11	279	96	295	197	272
12	144	-57	155		
13	467	124	483		
14	435	36	436		
15					

Πίνακας 5.9: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά. SSK, 7 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-16													
3	7	-111												
4	50	-48	-21											
5	-218	-763	-688	-180										
6	-12	-139	-17	-127	52									
7	8	-104	-8	-81	99	-47								
8	5	-103	12	-105	75	23	-24							
9	40	-89	36	-52	127	75	28	52						
10	-12	-140	-19	-132	48	-4	-51	-27	-79					
11	270	156	275	267	447	395	348	372	320	399				
12	145	10	139	76	256	204	157	181	129	208	191			
13	459	344	464	533	713	660	614	638	585	665	266	457		
14	419	296	419	488	668	615	569	593	540	619	221	412	45	
15														
Max		RMS	Μέσο	Τυπική Απόκλιση										
	-763	338	172	293										

Πίνακας 5.10: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
SSK, 7 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

Με το συνταχθέν πρόγραμμα



Εικόνα 5.20: Ορθοφωτογραφία, ZPR, 7 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	13	3	13	21	-46
2	10	10	14	RMS $\Delta y$	Max $\Delta y$
3	2	4	4	7	18
4	4	9	10	RMS Απόσταση	Max Απόσταση
5	-4	1	4	22	48
6	0	0	0	Μέσο $\Delta x$	Τυπική απόκλιση x
7	2	2	3	-10	19
8	0	0	0	Μέσο $\Delta y$	Τυπική απόκλιση y
9	0	3	3	4	6
10	-1	-4	4	Μέση Απόσταση	Τυπική απόκλιση Απόστασης
11	-22	1	22	15	16
12	-19	11	22		
13	-46	2	46		
14	-38	7	39		
15	-44	18	48		

Πίνακας 5.11: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 7 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-7													
3	-11	-10												
4	-10	-6	-5											
5	-17	-16	-6	-11										
6	-12	-13	-2	-6	6									
7	-9	-8	1	-3	8	-3								
8	-13	-13	-3	-6	6	0	-3							
9	-13	-11	-2	-6	6	0	-3	0						
10	-11	-11	-1	-7	4	-1	-4	-1	-1					
11	-35	-33	-24	-37	-25	-31	-34	-31	-31	-30				
12	-33	-29	-22	-33	-21	-27	-30	-27	-27	-25	-4			
13	-59	-56	-48	-71	-59	-65	-68	-65	-65	-64	-34	-38		
14	-51	-48	-40	-59	-48	-54	-57	-54	-54	-52	-23	-27	-11	
15	-59	-54	-48	-68	-57	-62	-65	-62	-62	-61	-31	-35	-3	-8
Max		RMS	Μέσο	Τυπική Απόκλιση										
	-71	36	-27	24										

Πίνακας 5.12: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 7 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$f_x=3274.34$ ,  $f_y=3263.1$

$x_0=1826.48$ ,  $y_0=1144.81$

Distortion Coefficients:

-0.098734

0.025764

-0.002909

0.005558

Rotation matrix:

0.999895 -0.013786 0.004364

-0.013495 -0.998052 -0.060903

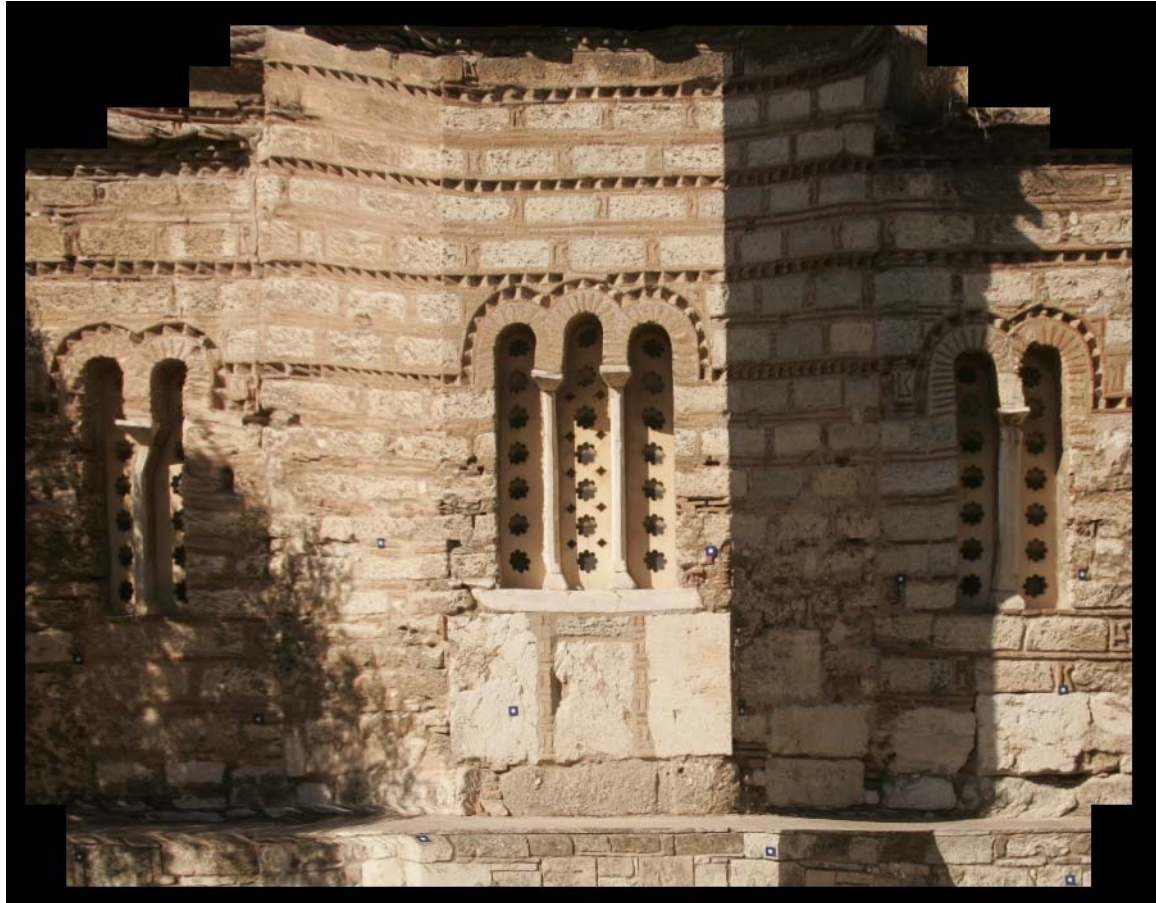
0.005195 0.060838 -0.998134

Translation matrix:

-0.170720 0.166631 -0.605577

Για την παραγωγή των ορθοφωτογραφιών D χρησιμοποιήθηκαν και τα 15 φωτοσταθερά: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15.

### Με το SSK



Εικόνα 5.21: Ορθοφωτογραφία, SSK, 15 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-139	-31	142	60	-139
2	34	-10	35	<b>RMS <math>\Delta y</math></b>	<b>Max <math>\Delta y</math></b>
3	-86	-30	91	52	98
4	2	-6	6	<b>RMS Απόσταση</b>	<b>Max Απόσταση</b>
5	-64	-19	67	79	142
6	0	0	0	<b>Μέσο <math>\Delta x</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση x</b>
7	65	49	81	-14	60
8	-51	-2	51	<b>Μέσο <math>\Delta y</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση y</b>
9	-31	18	36	27	45
10	-44	98	107	<b>Μέση Απόσταση</b>	<b>Τυπική απόκλιση Απόστασης</b>
11	8	52	53	69	40
12	-43	92	102		
13	83	83	117		
14	58	50	77		
15	-9	68	69		

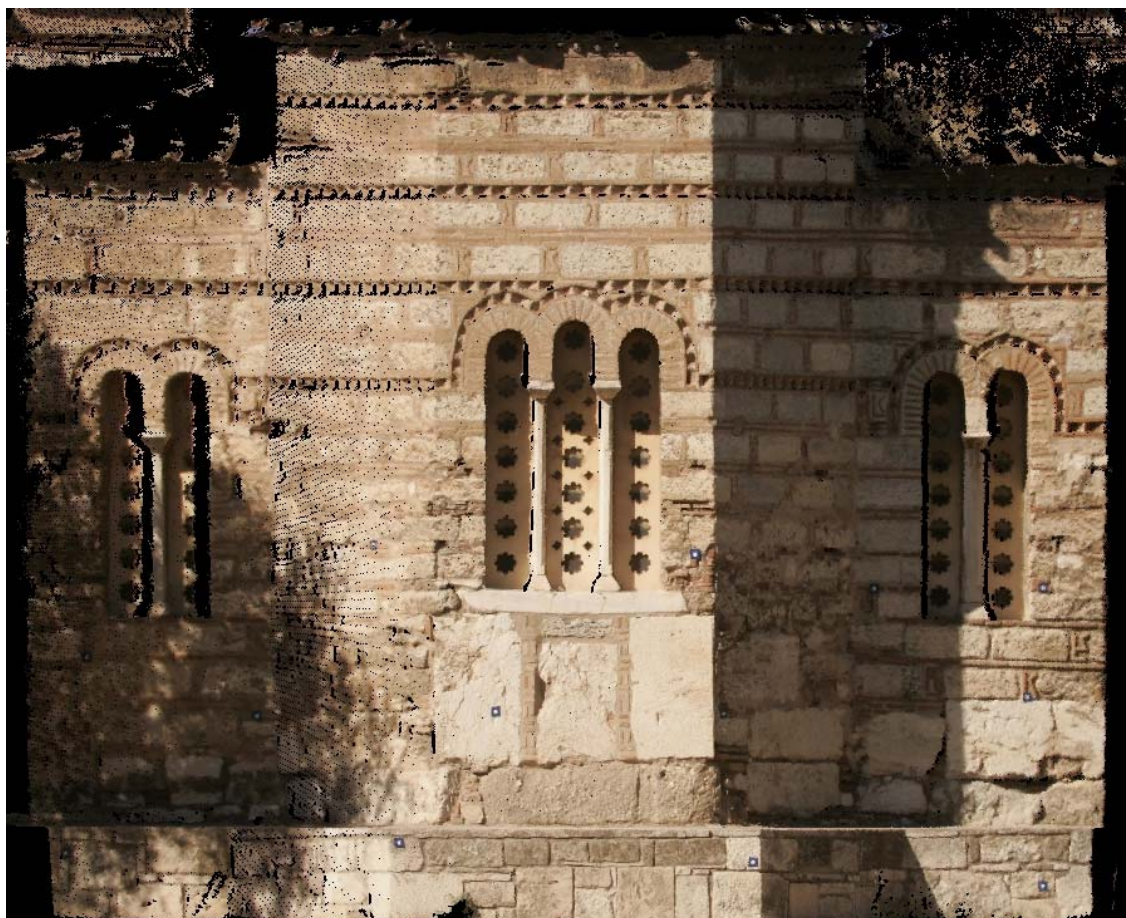
Πίνακας 5.13: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά. SSK, 15 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-30													
3	50	-108												
4	78	-31	-30											
5	74	-75	22	-93										
6	134	-29	87	-3	91									
7	139	33	68	89	182	-92								
8	92	-73	43	-75	18	-72	-164							
9	104	-58	56	-47	47	-44	-136	28						
10	55	-78	6	-65	28	-62	-154	10	-18					
11	154	-5	109	8	102	11	-81	83	55	74				
12	60	-79	11	-64	30	-61	-153	11	-17	1	72			
13	230	72	185	115	208	117	25	190	161	180	106	178		
14	194	34	146	79	173	82	-10	154	126	144	71	143	35	
15	104	-45	56	-16	78	-13	-105	59	31	49	-24	48	130	-95
Max	RMS	Μέσο	Τυπική Απόκλιση											
230	92	25	89											

Πίνακας 5.14: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
SSK, 15 φωτοσταθερά, 10mm pixel.



Με το συνταχθέν πρόγραμμα



Εικόνα 5.22: Ορθοφωτογραφία, ZPR, 15 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-1	2	2	2	-5
2	-5	1	5	<b>RMS <math>\Delta y</math></b>	<b>Max <math>\Delta y</math></b>
3	1	4	4	3	5
4	3	5	6	<b>RMS Απόσταση</b>	<b>Max Απόσταση</b>
5	-4	3	5	3	6
6	0	0	0	<b>Μέσο <math>\Delta x</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση x</b>
7	3	2	4	0	2
8	-2	-1	2	<b>Μέσο <math>\Delta y</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση y</b>
9	1	3	3	2	2
10	-1	-3	3	<b>Μέση Απόσταση</b>	<b>Τυπική απόκλιση Απόστασης</b>
11	0	3	3	3	2
12	0	0	0		
13	1	3	3		
14	-2	2	3		
15	0	0	0		

Πίνακας 5.15: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 15 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	1													
3	1	7												
4	0	8	-1											
5	-2	2	-4	-10										
6	1	4	-1	-4	6									
7	3	8	3	0	10	-4								
8	-1	2	-5	-7	3	-3	-7							
9	2	6	0	-3	7	1	-3	4						
10	1	4	0	-6	4	-1	-6	1	-3					
11	1	5	-1	-4	6	0	-4	3	-1	1				
12	2	5	0	-4	6	0	-4	3	-1	1	0			
13	2	6	0	-3	7	1	-3	4	0	3	1	1		
14	-1	3	-3	-7	3	-3	-7	0	-4	-1	-3	-3	4	
15	1	5	0	-4	6	0	-4	3	-1	1	0	0	1	3
<b>Max</b>	<b>RMS</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>											
-10	4	0	4											

Πίνακας 5.16: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 15 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$f_x=3194.91$ ,  $f_y=3190.96$

$x_0=1802.4$ ,  $y_0=1152.28$

Distortion Coefficients:

-0.152355

0.084381

-0.000211

-0.000170

Rotation matrix:

0.999908 -0.013042 0.003806

-0.012788 -0.998086 -0.060505

0.004588 0.060451 -0.998161

Translation matrix:

-0.094133 0.144103 -0.860201

Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας Ε χρησιμοποιήθηκαν τα 6 φωτοσταθερά: 5, 6, 7, 8, 9, 10.

**Μόνο με το συνταθέν πρόγραμμα**



Εικόνα 5.23: Ορθοφωτογραφία, ZPR, 6 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	3	-5	6	14	31
2	31	9	32	<b>RMS <math>\Delta y</math></b>	<b>Max <math>\Delta y</math></b>
3	-3	-8	9	6	-12
4	3	2	4	<b>RMS Απόσταση</b>	<b>Max Απόσταση</b>
5	-3	2	4	15	32
6	0	0	0	<b>Μέσο <math>\Delta x</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση x</b>
7	1	2	2	-4	14
8	-1	0	1	<b>Μέσο <math>\Delta y</math></b>	<b>Τυπική απόκλιση y</b>
9	-1	2	2	-2	6
10	0	-3	3	<b>Μέση Απόσταση</b>	<b>Τυπική απόκλιση Απόστασης</b>
11	-13	-9	16	11	11
12	-10	2	10		
13	-23	-12	26		
14	-22	-11	25		
15	-25	-3	25		

Πίνακας 5.17: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 6 φωτοσταθερά, 10mm pixel.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	-17													
3	-5	-38												
4	-5	-29	-11											
5	-3	-29	8	-8										
6	-4	-32	3	-4	4									
7	-5	-30	-4	-3	6	-1								
8	-3	-33	5	-6	3	-1	-3							
9	-5	-33	2	-6	3	-1	-3	0						
10	-3	-31	1	-4	4	0	-1	1	1					
11	-16	-47	-10	-23	-14	-18	-20	-17	-17	-18				
12	-14	-41	-9	-18	-10	-14	-16	-13	-13	-14	-4			
13	-26	-58	-20	-37	-28	-33	-34	-31	-31	-33	-14	-18		
14	-25	-56	-19	-35	-27	-31	-33	-30	-30	-31	-13	-17	-1	
15	-28	-56	-23	-40	-31	-35	-37	-34	-34	-35	-17	-21	3	-4
Max		RMS	Μέσο	Τυπική Απόκλιση										
	-58	24	-18	16										

**Πίνακας 5.18: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 6 φωτοσταθερά, 10mm pixel.**

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$f_x=3200.72$ ,  $f_y=3190.43$

$x_0=1760.41$ ,  $y_0=1152.54$

Distortion Coefficients:

-0.175278

0.486148

-0.004457

0.000456

Rotation matrix:

0.999821 -0.013680 -0.013042

-0.014383 -0.998358 -0.055439

-0.012262 0.055617 -0.998377

Translation matrix:

-0.149556 0.204776 -0.879087

#### 5.4.1 Αρχικές εικόνες με μεγάλες στροφές

Ακολουθούνε δύο ορθοφωτογραφίες που παρήχθησαν με το πρόγραμμα που συντάχθηκε χρησιμοποιώντας ως αρχικά δεδομένα δύο εικόνες που παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες γωνίες στροφής ως προς το επίπεδο προβολής.

Η πρώτη εικόνα έχει 14 φωτοσταθερά ορατά – ο στόχος 4 δεν διακρίνεται – και χρησιμοποιήθηκαν όλα. Η δεύτερη εικόνα έχει 13 φωτοσταθερά ορατά – οι στόχοι 4 και 5 βρίσκονται σε επίπεδο που δεν φαίνεται στην εικόνα – και χρησιμοποιήθηκαν όλα.



**Εικόνα 5.24: Η πρώτη εικόνα με μέτρια στροφή.**



Εικόνα 5.25: Η ορθοφωτογραφία που προέκυψε από την πρώτη εικόνα με μέτριες στροφές.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	2	7	7	4	8
2	-1	1	1	RMS $\Delta y$	Max $\Delta y$
3	2	3	4	4	7
4				RMS Απόσταση	Max Απόσταση
5	-1	6	6	5	9
6	0	0	0	Μέσο $\Delta x$	Τυπική απόκλιση x
7	2	4	4	2	3
8	0	0	0	Μέσο $\Delta y$	Τυπική απόκλιση y
9	4	4	6	3	3
10	0	-2	2	Μέση Απόσταση	Τυπική απόκλιση Απόστασης
11	4	5	6	5	3
12	6	-2	6		
13	8	4	9		
14	5	4	6		
15	3	5	6		

Πίνακας 5.19: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά. ZPR, 14 φωτοσταθερά, 10mm pixel, αρχική εικόνα με στροφή.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	6													
3	1	4												
4														
5	-3	4	1											
6	-1	1	-2		1									
7	2	3	-1		4	-3								
8	-3	0	-3		1	0	-3							
9	2	6	2		7	6	3	6						
10	1	1	-1		1	0	-3	0	-6					
11	2	6	2		7	6	3	6	0	6				
12	6	7	5		10	8	6	8	3	8	-3			
13	6	9	6		13	11	8	11	6	11	6	3		
14	3	6	3		8	7	4	7	1	7	1	-1	4	
15	1	4	1		6	4	1	4	-1	4	-1	-4	7	-3
<b>Max</b>	<b>RMS</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>											
13	5	4	4											

Πίνακας 5.20: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 14 φωτοσταθερά, 10mm pixel, αρχική εικόνα με στροφή.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$f_x=3104.36$ ,  $f_y=3100.06$

$x_0=1731.14$ ,  $y_0=1211.75$

Distortion Coefficients:

-0.141294

0.209302

-0.000799

-0.003818

Rotation matrix:

0.933684 -0.002918 -0.358085

-0.011118 -0.999721 -0.020841

-0.357924 0.023440 -0.933456

Translation matrix:

-3.940508 0.162661 0.576667



**Εικόνα 5.26: Η δεύτερη εικόνα με μεγάλη στροφή.**





Εικόνα 5.27: Η ορθοφωτογραφία που προέκυψε από την δεύτερη εικόνα με μεγάλη στροφή.

	$\Delta x$	$\Delta y$	Απόσταση	RMS $\Delta x$	Max $\Delta x$
1	-5	7	9	4	-12
2	-12	1	12	RMS $\Delta y$	Max $\Delta y$
3	-2	4	4	3	7
4				RMS Απόσταση	Max Απόσταση
5				5	12
6	0	0	0	Μέσο $\Delta x$	Τυπική απόκλιση x
7	0	2	2	-2	4
8	-3	-1	3	Μέσο $\Delta y$	Τυπική απόκλιση y
9	2	3	4	2	2
10	-4	0	4	Μέση Απόσταση	Τυπική απόκλιση Απόστασης
11	0	5	5	4	3
12	-1	0	1		
13	-3	4	5		
14	0	2	2		
15	0	1	1		

Πίνακας 5.21: Διαφορές συντεταγμένων φωτοσταθερών σε χιλιοστά. ZPR, 13 φωτοσταθερά, 10mm pixel, αρχική εικόνα με μεγάλη στροφή.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1														
2	7													
3	4	10												
4														
5														
6	6	11	2											
7	7	12	3			0								
8	1	7	-3			-4	-4							
9	7	14	4			3	3	7						
10	3	8	-1			-6	-6	-1	-8					
11	5	13	2			0	0	4	-3	6				
12	6	11	2			-1	-1	3	-4	4	1			
13	2	9	-1			-4	-4	0	-7	1	-4	-3		
14	5	12	2			0	0	4	-3	6	0	1	-4	
15	6	12	3			0	0	4	-3	6	0	1	-1	0
<b>Max</b>	<b>RMS</b>	<b>Μέσο</b>	<b>Τυπική Απόκλιση</b>											
14	6	2	5											

Πίνακας 5.22: Διαφορές αποστάσεων φωτοσταθερών σε χιλιοστά.  
ZPR, 13 φωτοσταθερά, 10mm pixel, αρχική εικόνα με μεγάλη στροφή.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μέσω του μαθηματικού μοντέλου του J. Heikkilä έχουν ως εξής:

Calibration Results:

$f_x=3016.17$ ,  $f_y=3018.87$

$x_0=1762.63$ ,  $y_0=1180.19$

Distortion Coefficients:

-0.127069

-0.118597

-0.003448

0.000153

Rotation matrix:

0.840025 -0.006910 -0.542503

-0.046118 -0.997209 -0.058710

-0.540584 0.074337 -0.838000

Translation matrix:

-6.008375 -0.286917 2.147564

## **5.5 Αξιολόγηση και συμπεράσματα για το πρόγραμμα και τη μέθοδο**

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις ορθοφωτογραφίες του φωτογραμμετρικού σταθμού SSK δείχνουν γενικά μεγάλες αποκλίσεις από τις γεωδαιτικές μετρήσεις και καθιστούν τα αποτελέσματα μη ικανοποιητικά για τις απαιτήσεις της ζητούμενης κλίμακας. Αντίθετα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα που συντάχθηκε, στις περισσότερες περιπτώσεις, βρίσκονται στα όρια της διάστασης της εικονοψηφίδας. Υπό τις συγκεκριμένες προϋποθέσεις που πραγματοποιήθηκε η αποτύπωση, οι οποίες δεν είναι οι ιδανικές για τον φωτογραμμετρικό σταθμό SSK, το πρόγραμμα που συντάχθηκε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό δείχνει πως, σε αντίθεση με το SSK, το πρόγραμμα που συντάχθηκε δεν επηρεάζεται αρνητικά από τη χαμηλή ποιότητα και ποσότητα των δεδομένων και μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα με τη χρήση μόλις 6 φωτοσταθερών σημείων και με μηδενικό σχεδόν προγραμματισμό λήψεων, αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν τυχαίες φωτογραφίες του αντικειμένου.

Οι ορθοφωτογραφίες που προέκυψαν από τις δύο αρχικές εικόνες με μεγάλες στροφές φ, δίνουν μετρητικά αποτελέσματα αντίστοιχης ποιότητας με τις προηγούμενες. Οι μέγιστες διαφορές στις συντεταγμένες δεν ξεπερνάνε τα όρια της κλίμακας και οι μικρές τυπικές αποκλίσεις δείχνουν πως τα φωτοσταθερά που παρουσιάζουν τις σχετικά μεγαλύτερες διαφορές στις συντεταγμένες αποτελούν μεμονωμένες περιπτώσεις. Τα νούμερα, λοιπόν, επιβεβαιώνουν πως η επιλογή του αλγορίθμου προσανατολισμού των φωτογραφιών στο τρισδιάστατο μοντέλο είναι καλή και πως η επιλογή του επιπέδου προβολής της ορθοφωτογραφίας δεν επηρεάζεται από τους προσανατολισμούς της αρχικής εικόνας.

Εμφανές μειονέκτημα των τελευταίων ορθοφωτογραφιών αποτελεί το γεγονός ότι ο αλγόριθμος του συνταχθέντος προγράμματος δεν διαχειρίζεται κατάλληλα, κατά τον χρωματισμό του νέφους, τις περιοχές αναγλύφου με αποκρύψεις, με αποτέλεσμα ομάδες σημείων να χρωματίζονται λανθασμένα. Χαρακτηριστικά τέτοια σημεία είναι οι εσοχές των παραθύρων όπου και εμφανίζονται διπλά είδωλα των αψίδων και η αριστερή πλευρά του Ιερού, που δεν απεικονίζεται στην αρχική εικόνα, και έχει χρωματιστεί με χρωματική πληροφορία της μπροστινής όψης. Η αδυναμία, ωστόσο, αυτή του προγράμματος ήταν γνωστή εκ των προτέρων και μπορεί να αντιμετωπιστεί ελαττώνοντας την απόσταση μεταξύ του σαρωτή laser και της φωτογραφικής μηχανής κατά την διαδικασία των λήψεων.

Από τη σύγκριση των μεθόδων και των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας μέσω του προγράμματος που συντάχθηκε.

### **Τα πλεονεκτήματα συνοψίζονται στα εξής:**

- Απλότητα και ταχύτητα: Η προτεινόμενη μέθοδος είναι γρήγορη και δεν απαιτεί από τον χρήστη ιδιαίτερες φωτογραμμετρικές γνώσεις.
- Μικρές απαιτήσεις φωτοσταθερών: Το πρόγραμμα δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με τη χρήση ακόμα και μόλις έξι φωτοσταθερών σημείων.
- Χαλαρές προδιαγραφές φωτογράφισης: Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται ελάχιστο από τις γωνίες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι λήψεις, πολλαπλασιάζοντας τις δυνατότητες φωτογράφισης.

- Αυτοβαθμονόμηση: Δεν απαιτείται η γνώση των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής που πραγματοποίησε τις λήψεις, παρά μόνο η σταθερά της μηχανής και η διάσταση της εικονοψηφίδας του αισθητήρα της.
- Ευκολία συλλογής υψομετρικών δεδομένων: Η χρήση του σαρωτή laser καθιστά την συλλογή της χωρικής πληροφορίας εύκολη, γρήγορη και αξιόπιστη.
- Ευελιξία: Από τα ίδια δεδομένα μπορούν να παραχθούν ορθοφωτογραφίες σε διαφορετικά επίπεδα χωρίς επιπλέον εργασία.
- Διαθεσιμότητα και Επεκτασιμότητα: Το πρόγραμμα διανέμεται ελεύθερα μαζί με τον ανοιχτό του κώδικα επιτρέποντας σε οποιονδήποτε να το χρησιμοποιήσει και να το παραμετροποιήσει σύμφωνα με τις ανάγκες του.

#### **Υπάρχουν, ωστόσο, τα ακόλουθα μειονεκτήματα:**

- Η κλίμακα της ορθοφωτογραφίας περιορίζεται από την ακρίβεια που μπορεί να καλύψει ο σαρωτής laser.
- Οι σαρωτές laser είναι ακόμα μηχανήματα ακριβά, σχετικά ογκώδη και γενικότερα δεν είναι εύκολα διαθέσιμα για όλους.
- Το πρόγραμμα δεν έχει αλγόριθμο ελέγχου ορατότητας (occlusion detection) κατά τον χρωματισμό του νέφους, με αποτέλεσμα σε σημεία έντονου αναγλύφου να μην γίνεται σωστός χρωματισμός του νέφους.

### **5.6 Προτάσεις για το μέλλον**

Το συνταχθέν λογισμικό διανέμεται ελεύθερα μαζί με τον πηγαίο του κώδικα έτσι ώστε να είναι δυνατή η παραμετροποίησή του, η βελτιστοποίησή του και η προσθήκη περισσότερων λειτουργιών. Οι παρακάτω είναι ιδέες και προτάσεις για πιθανές βελτιώσεις που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν αλλά ήταν έξω από το πεδίο της παρούσας διπλωματικής εργασίας .

#### Βελτιστοποιήσεις ταχύτητας

Το λογισμικό, αν και εκτελείται γρήγορα χωρίς μεγάλες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος, δεν έχει συνταχθεί με κύριο γνώμονα την ταχύτητα εκτέλεσης. Συνεπώς, υπάρχουν ορισμένες βελτιώσεις καθαρά προγραμματιστικού χαρακτήρα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ταχύτητα εκτέλεσης αλλά και την ταχύτητα ανάγνωσης και εγγραφής αρχείων.

#### Προσθήκη γραφικού περιβάλλοντος

Η δημιουργία ενός γραφικού περιβάλλοντος (Graphical User Interface – GUI) θα βοηθούσε το λογισμικό να γίνει ακόμα πιο φιλικό προς τον ανειδίκευτο χρήστη. Με τη χρήση διαδραστικού παραθυρικού περιβάλλοντος θα μπορούσε να είναι πιο εύκολη η επιλογή των χρησιμοποιούμενων φωτοσταθερών καθώς και όλων των παραμέτρων που χρειάζεται να δηλώνονται από τη γραμμή εντολών.

#### Αυτόματος εντοπισμός φωτοσταθερών

Ένα μεγάλο βήμα προς τον ολικό αυτοματισμό της διαδικασίας παραγωγής ορθοφωτογραφίας είναι ο αυτόματος εντοπισμός των φωτοσταθερών. Έχουν δημιουργηθεί μέθοδοι με τις οποίες ένας στόχος μπορεί αυτόματα να εντοπιστεί και

βασικότερα να αναγνωριστεί και να προσημανθεί στην ψηφιακή εικόνα [Valanis and Tsakiri, 2004]. Επίσης, είναι δυνατόν ο προσανατολισμός της εικόνας με το νέφος των σημείων να μην γίνει βάσει προσημασμένων και προ-τοποθετημένων στόχων, αλλά με την αυτόματη αναγνώριση και συνταύτιση χαρακτηριστικών σημείων, ευθύγραμμων τμημάτων ή επιπέδων [Deveau et al., 2004]. Η ενσωμάτωση μιας τέτοιας δυνατότητας στο λογισμικό θα επέτρεπε την εξολοκλήρου αυτόματη παραγωγή ορθοφωτογραφίας χωρίς την ανάγκη για τη χειροκίνητη μέτρηση εικονοσυντεταγμένων.

#### Έλεγχος ορατότητας για τον χρωματισμό σημείων

Ένα θέμα που δεν αντιμετωπίστηκε από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο έλεγχος κοινής ορατότητας μεταξύ των συσκευών του σαρωτή laser και της φωτομηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον εσφαλμένο χρωματισμό σημείων σε περιπτώσεις που υπάρχουν αποκρύψεις λόγω έντονου ανάγλυφου και μεγάλων αποστάσεων και στροφών μεταξύ των σημείων λήψης του σαρωτή laser και της φωτομηχανής. Υπάρχουν τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν και σε αυτή τη περίπτωση ώστε ο χρωματισμός να είναι αληθής στις περιοχές των αποκρύψεων. [Grammatikopoulos et al., 2004]

#### Χρωματισμός από πολλαπλές εικόνες

Στην περίπτωση που το λογισμικό μπορούσε να ελέγξει τα σημεία αποκρύψεων και να μην χρωματίσει σε αυτά το νέφος, θα προέκυπταν περιοχές που το νέφος θα παρέμενε μαύρο. Αυτές οι περιοχές για να χρωματιστούν θα έπρεπε να πάρουν την τιμή του χρώματος που τους αντιστοιχεί από μια ή περισσότερες άλλες ψηφιακές εικόνες. Έτσι, συνολικά, θα μπορούσαν τα δεδομένα του προγράμματος να αποτελούνται από πολλές ψηφιακές εικόνες του αντικειμένου, φωτογραφημένου περιμετρικά, και η εφαρμογή να αποφασίζει ποια είναι η ιδανική εικόνα για να δώσει χρώμα σε κάθε σημείο [Grammatikopoulos et al., 2004]. Αυτό θα επέτρεπε την ολοκληρωτική και αυτοματοποιημένη αποτύπωση ενός αντικειμένου με την προτεινόμενη μέθοδο.

#### Δυνατότητα επιλογής επιπέδου που τέμνει το αντικείμενο

Πολύ χρήσιμο θα ήταν το επίπεδο στο οποίο προβάλλεται η ορθοφωτογραφία να μπορούσε να τέμνει το αντικείμενο. Τελικά, όσα σημεία βρίσκονται μπροστά από το επίπεδο θα προβάλλονταν κανονικά, ενώ όσα βρίσκονται πίσω από το επίπεδο θα αγνοούνταν. Με αυτό το τρόπο θα γινόταν εφικτή η παραγωγή ορθοφωτογραφίας χωρίς την ύπαρξη αποκρύψεων από μέρη του αντικειμένου που βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο όπως κολώνες και στηθαία ή η παραγωγή ορθοφωτογραφίας από κλειστά σχήματα εσωτερικού χώρου όπως θολωτοί τάφοι, δεδομένου πάντα πως θα είναι εφικτή η κατάλληλη φωτογράφιση.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

### Οδηγίες χρήσης της εφαρμογής

#### Λίστα παραμέτρων γραμμής εντολών

-help --help -? /? /help		-	Προβολή οδηγιών εκτέλεσης του προγράμματος
-cloud -c		Όνομα αρχείου	Το ASCII αρχείο εισόδου που περιέχει το νέφος των σημείων
-nxyz -xyz		Όνομα αρχείου	Το ASCII αρχείο εισόδου που περιέχει τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών
-nxy -xy	Προαιρετικό	Όνομα αρχείου	Το ASCII αρχείο εισόδου που περιέχει τις εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών
-image -i		Όνομα αρχείου	Το αρχείο εισόδου της ψηφιακής εικόνας του αντικειμένου
-interpolation -int	Προαιρετικό, προεπιλεγμένη τιμή το 2	0, 1, 2	Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος παρεμβολής κατά τον χρωματισμό του νέφους των σημείων
-focallength -focal -length -fl		Ακέραιος αριθμός	Η αρχική εκτίμηση της τιμής της σταθεράς της μηχανής μετρημένη σε pixel
-dump -d	Προαιρετικό	Όνομα αρχείου	Το ASCII αρχείο εξόδου που περιέχει το εκτεταμένο ψηφιακό μοντέλο επιφανείας
-calibration -calib -cal	Προαιρετικό	Όνομα αρχείου	Το ASCII αρχείο εξόδου που περιέχει τις πληροφορίες για τον προσανατολισμό της λήψης

-ortho -o		Όνομα αρχείου	Το αρχείο εξόδου στο οποίο αποθηκεύεται η ορθοφωτογραφία
-pixelsize -pixel -p		Δεκαδικός αριθμός	Η διάσταση της εικονοψηφίδας στην παραγόμενη ψηφιακή ορθοφωτογραφία
-fill -f	Προαιρετικό	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Το κατώφλι μαύρων γειτονικών εικονοψηφίδων για την εφαρμογή του αλγορίθμου πλήρωσης κενών της εικόνας
-A -B -C	Προαιρετικό	Δεκαδικός αριθμός	Ορισμός των συντελεστών A, B, C της εξίσωσης του επιπέδου προβολής $Ax+By+Cz=D$
-omega -phi -kappa	Προαιρετικό	Δεκαδικός αριθμός	Ορισμός των τριών γωνιών στροφής $\omega$ , $\phi$ , $\kappa$
-rad -grad	Προαιρετικό	-	Επιλογή μονάδας γωνιών
-XOY	Προαιρετικό	-	Επιλογή του επιπέδου XoY ως επίπεδο προβολής της ορθοφωτογραφίας

--help || -help || -? || /? || /help

Η εντολή αυτή παρουσιάζει χρήσιμες πληροφορίες για τη χρήση του προγράμματος καθώς και τη λίστα με τις παραμέτρους που δέχεται.

-cloud [filename] || -c [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου που περιέχει το νέφος των σημείων. Αν το αρχείο δεν υπάρχει ή δεν δηλωθεί, το πρόγραμμα δεν μπορεί να λειτουργήσει.

-xyz [filename] || -nxyz [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου που περιέχει τις γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών. Το αρχείο πρέπει να έχει ένα σημείο σε κάθε του γραμμή και οι συντεταγμένες να χωρίζονται με κενά. Στην περίπτωση που το αρχείο περιέχει μόνο τις συντεταγμένες (x, y, z) χρησιμοποιείται η πρώτη παράμετρος (-xyz), ενώ σε περίπτωση που στην αρχή κάθε σειράς υπάρχει και αύξων αριθμός του σημείου, χρησιμοποιείται η δεύτερη (-nxyz).

-xy [filename] || -nxy [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου που περιέχει τις εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών. Το αρχείο πρέπει να έχει ένα σημείο σε κάθε του γραμμή και οι συντεταγμένες να χωρίζονται με κενά. Στην περίπτωση που το αρχείο περιέχει μόνο τις εικονοσυντεταγμένες (x, y) χρησιμοποιείται η πρώτη παράμετρος (-xy), ενώ σε περίπτωση που στην αρχή κάθε σειράς υπάρχει και αύξων αριθμός του σημείου, χρησιμοποιείται η δεύτερη (-nxy). Η χρήση της παραμέτρου είναι προαιρετική και στην περίπτωση που παραλειφθεί, ο χρήστης καλείται να στοχεύσει τα φωτοσταθερά στην εικόνα σε γραφικό περιβάλλον.

-image [filename] || -i [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου που περιέχει τη ψηφιακή εικόνα που θα χρησιμοποιηθεί για τον χρωματισμό του νέφους.

-interpolation [0,1,2] || -int [0,1,2]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή του χρώματος από τις αντίστοιχες εικονοψηφίδες της εικόνας. Με την επιλογή 0, χρησιμοποιείται μόνο το ακέραιο τμήμα των υπολογισμένων εικονοσυντεταγμένων. Με την επιλογή 1, γίνεται στρογγυλοποίηση στον κοντινότερο ακέραιο (μέθοδος εγγύτερου γείτονα). Με την επιλογή 2 γίνεται διγραμμική παρεμβολή και επιλέγεται χρώμα βάσει των γειτονικών εικονοψηφίδων. Η χρήση της παραμέτρου είναι προαιρετική και στην περίπτωση που παραλειφθεί χρησιμοποιείται η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής.

-focallength [n] || -focal [n] || -length [n] || -fl [n]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται η εκτιμώμενη τιμή της σταθεράς της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη μετρημένη σε μονάδες εικονοψηφίδων. Έτσι, αν για παράδειγμα η εικονοψηφίδα της εικόνας έχει διάσταση 8μm και ο φακός είναι 40mm, τότε η ζητούμενη τιμή είναι  $n = 40 / 0,008 = 5000$  εικονοψηφίδες.

-dump [filename] || -d [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου που χρησιμοποιείται για να αποθηκευτεί το χρωματισμένο νέφος σημείων. Η χρήση της παραμέτρου είναι προαιρετική και έχει βοηθητικό χαρακτήρα.

-calibration [filename] || -calib [filename] || -cal [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των στοιχείων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού που υπολογίστηκαν για τον χρωματισμό του νέφους. Η χρήση της παραμέτρου είναι προαιρετική και στην περίπτωση που παραλειφθεί, οι πληροφορίες αυτές εμφανίζονται μόνο στην οθόνη.

-ortho [filename] || -o [filename]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτεί η τελική παραγόμενη ορθοφωτογραφία. Το format της εικόνας καθορίζεται από την κατάληξη του ονόματος του αρχείου.

-pixelsize [n] || -pixel [n] || -p [n]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται η διάσταση της εικονοψηφίδας στην εικόνα της παραγόμενης ορθοφωτογραφίας. Η τιμή που δηλώνεται είναι μετρημένη σε μέτρα.



-fill [0,1,2,3,4,5,6,7] || -f [0,1,2,3,4,5,6,7]

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται πως θα γίνει εφαρμογή του αλγορίθμου πλήρωσης κενών, με χρήση κατωφλίου γειτονικών μαύρων εικονοψηφίδων την τιμή που δηλώνεται. Η χρήση της παραμέτρου είναι προαιρετική και στην περίπτωση που παραληφθεί, ο αλγόριθμος πλήρωσης κενών δεν εφαρμόζεται.

-A [α] || -B [β] || -C [γ]

Με αυτές τις παραμέτρους δηλώνεται το επίπεδο στο οποίο θα προβληθεί το νέφος των σημείων για τη δημιουργία της ορθοφωτογραφίας. Οι αριθμοί α, β, γ που δηλώνονται ικανοποιούν την εξίσωση του ζητούμενου επιπέδου  $ax + by + cz = d$ . Η χρήση των παραμέτρων αυτών είναι προαιρετική και στην περίπτωση που παραλειφθούν, ζητείται από τον χρήστη να δηλώσει το ζητούμενο επίπεδο σχεδιάζοντας το ίχνος του σε μια προβολή κάτοψης του αντικειμένου.

-X0Y

Με αυτή τη παράμετρο δηλώνεται πως το επίπεδο στο οποίο θα προβληθεί το νέφος των σημείων για τη δημιουργία της ορθοφωτογραφίας είναι αυτό που ορίζεται από τους άξονες X και Y. Η χρήση της παραμέτρου είναι προαιρετική και χρησιμοποιείται για διευκόλυνση στις περιπτώσεις που στο νέφος των σημείων έχει προηγηθεί γεωαναφορά. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ζητούμενο επίπεδο είναι αυτό που ορίζεται από τους άξονες X και Y, οπότε δεν χρειάζεται ο χρήστης να δηλώνει το επίπεδο γραφικά, επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη εκτέλεση του προγράμματος (batch processing).

-omega [ω] || -phi [φ] || -kappa [κ]

Με τις παραμέτρους αυτές δηλώνονται σε μοίρες οι γωνίες του πίνακα στροφής σύμφωνα με τον οποίο θα μετασχηματιστούν οι συντεταγμένες των σημείων του νέφους. Η χρήση τους είναι προαιρετική και αποτελεί δευτερεύουσα λειτουργία του προγράμματος.

-rad || -grad

Με αυτές τις παραμέτρους δηλώνονται οι μονάδες στις οποίες είναι μετρημένες οι γωνίες στροφής που δηλώθηκαν με τις παραμέτρους -omega, -phi, -kappa. Η χρήση τους είναι προαιρετική και σε περίπτωση που παραληφθούν χρησιμοποιούνται ως δεδομένη μονάδα οι μοίρες.

### Τρόποι χρήσης και Παραδείγματα

Το πρόγραμμα έχει τρεις βασικούς τρόπους χρήσης, εκτελώντας τρεις διαφορετικές λειτουργίες.

Η βασική λειτουργία είναι η παραγωγή ορθοφωτογραφίας.

Για τη βασική λειτουργία είναι απαραίτητο να δηλωθούν το αρχείο του νέφους, η ψηφιακή εικόνα, το αρχείο των γεωδαιτικών συντεταγμένων των φωτοσταθερών, η εκτιμώμενη σταθερά της φωτομηχανής, η διάσταση της εικονοψηφίδας της ορθοφωτογραφίας και το αρχείο στο οποίο θα αυτή αποθηκευτεί. Επιπροσθέτως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προαιρετικές παράμετροι για διευκολύνσεις.

Παράδειγμα 1: Παραγωγή ορθοφωτογραφίας από νέφος σημείων nefos.txt, ψηφιακή εικόνα ikona.tif, αρχείο γεωδαιτικών συντεταγμένων geo.txt, σταθερά μηχανής 3400 pixel, διάσταση εικονοψηφίδας στην ορθοφωτογραφία 1cm και αρχείο εικόνας για την αποθήκευση της ορθοφωτογραφίας ortho.tif.

```
Zpr.exe -c nefos.txt -i ikona.tif -xyz geo.txt -fl 3400 -p 0.01 -o ortho.tif
```

Σε αυτό το παράδειγμα δεν δηλώνεται αρχείο με τις εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών, γι' αυτό και θα ζητηθεί η στόχευσή τους κατά την εκτέλεση. Επίσης, δεν δηλώνεται επίπεδο προβολής οπότε και θα ζητηθεί το ίχνος του επιπέδου σε κάτοψη.

Παράδειγμα 2: Παραγωγή ορθοφωτογραφίας από νέφος σημείων nefos.txt, ψηφιακή εικόνα ikona.tif, αρχείο προσημασμένων γεωδαιτικών συντεταγμένων geo.txt, αρχείο προσημασμένων εικονοσυντεταγμένων φωτοσταθερών img.txt, σταθερά μηχανής 3400 pixel, διάσταση εικονοψηφίδας στην ορθοφωτογραφία 5mm, αρχείο εικόνας για την αποθήκευση της ορθοφωτογραφίας ortho.tif, αρχείο αποθήκευσης του χρωματισμένου νέφους colored.txt, αρχείο αποθήκευσης πληροφορίας για τους προσανατολισμούς της λήψης calib.txt, προβολή στο επίπεδο που ορίζεται από τους άξονες X και Y και εφαρμογή του αλγορίθμου πλήρωσης κενών στην ορθοφωτογραφία με κατώφλι γειτονικών μαύρων εικονοψηφίδων 4.

```
Zpr.exe -c nefos.txt -i ikona.tif -nxyz geo.txt -nxy img.txt -fl 3400 -p 0.005 -o ortho.tif -d colored.txt -cal calib.txt -X0Y -fill 4
```

Σε αυτό το παράδειγμα δεν απαιτείται καμία συμπληρωματική ενέργεια από τον χρήστη κατά την εκτέλεση οπότε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτοματοποιημένη εκτέλεση – batch processing.

Η δεύτερη λειτουργία είναι η μεμονωμένη εφαρμογή του αλγορίθμου πλήρωσης κενών σε ψηφιακές εικόνες.

Παράδειγμα 3: Εφαρμογή του αλγορίθμου πλήρωσης κενών στην εικόνα image.tif, χρωματισμός εικονοψηφίδων που έχουν μέχρι 5 γειτονικά μαύρα pixel και αποθήκευση στο αρχείο image\_holefilled.tif.

```
Zpr.exe -i image.tif -o image_holefilled.tif -f 5
```

Η τρίτη λειτουργία είναι η στροφή νεφών σημείων σύμφωνα με δεδομένο πίνακα στροφής.

Παράδειγμα 4: Στροφή του νέφους σημείων nefos.txt κατά  $(\omega, \phi, \kappa) = (34, 100, 53.2)$  μετρημένα σε grad και αποθήκευση στο αρχείο nefos\_rotated.txt.

```
Zpr.exe -c nefos.txt -d nefos_rotated.txt -omega 34 -phi 100 -kappa 53.2 -grad
```

#### Σημειώσεις:

Η σειρά που δηλώνονται οι παράμετροι δεν επηρεάζουν την εκτέλεση.

Στις περιπτώσεις που τα δηλωμένα αρχεία εξόδου ήδη υπάρχουν, αυτόματα αυτά θα αντικαθίστανται.

## Βιβλιογραφία

A. Abdelhafiz, W. Niemeier, **DEVELOPED TECHNIQUE FOR AUTOMATIC POINT CLOUD TEXTURING USING MULTI IMAGES APPLIED TO A COMPLEX SITE**, IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September 2006.

Abmayr T., Härtl F., Mettenleiter M., Heinz I., Hildebrand A., Neumann B., Fröhlich C., **REALISTIC 3D RECONSTRUCTION – COMBINING LASERSCAN DATA WITH RGB COLOR INFORMATION**, Proceedings of ISPRS XXth Congress, Commission V papers, Vol. XXXV, 12 to 23 July 2004 in Istanbul, Turkey.

R. Brumana, L. Fregonese, F. Fassi, F. De Pascalis, **3D LASER SCANNER POINTS CLOUDS AND 2D MULTI-SPECTRAL IMAGES: A DATA MATCHING SOFTWARE FOR CULTURAL HERITAGE CONSERVATION**, Proceedings of CIPA 2005 XX International Symposium, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy.

Matthieu Deveau, Marc Pierrot-Deseilligny, Nicolas Paparoditis, Xin Chen, **RELATIVE LASER SCANNER AND IMAGE POSE ESTIMATION FROM POINTS AND SEGMENTS**, Proceedings of ISPRS XXth Congress, Commission III papers, 2004, Istanbul, Turkey.

Christoph Dold, Claus Brenner, **REGISTRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA USING PLANAR PATCHES AND IMAGE DATA**, Proceedings of ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', 25.-27. September 2006, Dresden, Germany.

A. Georgopoulos, G.N. Makris, A. Dermentzopoulos, **AN ALTERNATIVE METHOD FOR LARGE SCALE ORTHOPHOTO PRODUCTION**, Proceedings of CIPA 2005 XX International Symposium, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy.

L. Grammatikopoulos, I. Kalisperakis, G. Karras, T. Kokkinos, E. Petsa, **ON AUTOMATIC ORTHOPROJECTION AND TEXTURE-MAPPING OF 3D SURFACE MODELS**, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2004, 35(5), pp. 360-365.

Heikkilä, J, **"Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points"**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 10, pp. 1066-1077, Oct 2000.

R. Reulke, A. Wehr, D. Griesbach, **HIGH RESOLUTION MAPPING USING CCD-LINE CAMERA AND LASER SCANNER WITH INTEGRATED POSITION AND ORIENTATION SYSTEM**, Proceedings of ISPRS Commission III Symposium 20-22 September 2006, Bonn, Germany.

K. Seidl, J. Knobbe, D. Schneider, H.-J. Schönherr, H. Lakner, **OPTO-MECHANICAL COMBINATION OF A LINE SCANNING CAMERA AND A MICRO LASER SCANNER SYSTEM**, Proceedings of ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', 25.-27. September 2006, Dresden, Germany.

Valanis A., Tsakiri M., **AUTOMATIC TARGET IDENTIFICATION FOR LASER SCANNERS**, Proceedings of XX ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turkey.

Ιωαννίδης Χαράλαμπος, **ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΟΡΘΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ για το μάθημα ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ ΙΙ**, Αθήνα, 2003.

### Παγκόσμιος Ιστός

(τελευταία επίσκεψη για όλες τις ιστοσελίδες, Ιανουάριος 2008)

[http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner/](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner/)

<http://getpot.sourceforge.net/>

<http://opencvlibrary.sourceforge.net/>

<http://www.gimp.org/>

<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>

<http://www.gnu.org/licenses/>

<http://www.gnu.org/software/gsl/>