



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY**

Diploma Thesis

" Three-dimensional mapping objects with
Unmanned Aerial Vehicle - UAV "



Drosos Savvas

Supervisor: Iwannidhs Charalampos, Professor of NTUA

ATHENS, 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Τρισδιάστατη αποτύπωση αντικειμένων με Μη επανδρωμένα Εναέρια Μέσα - UAV"



Δρόσος Γ. Σάββας

Επιβλέπων: Ιωαννίδης Χαράλαμπος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στον τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Είναι αποτέλεσμα εντατικής εργασίας τόσο στο πεδίο, όσο και στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής.

Για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που είχα μέχρι και την ολοκλήρωσή της, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της εργασίας Κο. Ιωαννίδη Χαράλαμπο, την Κα. Σοϊλέ Σοφία (Ε.Τ.Ε.Π.), τον Κο. Ολυμπίτη Μανώλη (Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.), τον Κο. Κουτελλά Μιχαήλ (Αρχαιολόγος) και τους υπόλοιπους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές που με βοήθησαν σε διάφορα στάδια της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τους γονείς μου και τα δύο αδέρφια μου, για την συνεχή υποστήριξη, ηθική και οικονομική, όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Ο συντάκτης,
Δρόσος Σάββας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</u>	<u>7</u>
<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</u>	<u>9</u>
<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	<u>11</u>
<u>SUMMARY.....</u>	<u>13</u>
<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	<u>15</u>
<u>1. STRUCTURE FROM MOTION (SFM).....</u>	<u>17</u>
1.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ SFM	17
1.2. ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ	20
1.2.1. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΒΑΣΕΙ ΟΜΟΙΟΤΗΤΑΣ	21
1.2.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ.....	21
1.2.3. ΠΕΡΙΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΤΟ ΧΩΡΟ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ.....	22
1.2.4. ΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗΣ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	23
1.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2 ΛΗΨΕΩΝ.....	23
1.3.1. ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΛΗΨΗΣ	24
1.3.2. ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	25
1.3.3. ΤΟ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΛΗΨΗΣ	26
1.3.4. Ο ΕΠΙΠΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ (FUNDAMENTAL MATRIX).....	26
1.3.5. Ο ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΟΣ ΕΠΙΠΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ (ESSENTIAL MATRIX)	28
1.3.6. ΕΚΤΙΜΩΝΤΑΣ ΤΟΝ ΕΠΙΠΟΛΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ	29
1.3.7. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΩΝ 8 ΣΗΜΕΙΩΝ	30
1.4. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΟΛΛΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΛΗΨΕΩΝ.....	30
1.5. ΠΥΚΝΗ ΣΥΝΤΑΥΤΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ (DENSE MATCHING)	31
1.6. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MESH) ΚΑΙ ΥΦΗΣ (TEXTURE)	31
<u>2. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ.....</u>	<u>33</u>
2.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ	33
2.1.1. ΤΟ ΚΑΣΤΡΟ ΤΗΣ ΧΡΥΣΟΧΕΡΙΑΣ	33
<i>Ιστορικά στοιχεία του κάστρου</i>	34
2.1.2. ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	35
2.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ	37
2.3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΟΔΕΥΣΕΩΝ	38
2.3.1. ΟΔΕΥΣΗ ΤΟΥ ΚΑΣΤΡΟΥ ΤΗΣ ΧΡΥΣΟΧΕΡΙΑΣ	38
2.3.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ.....	40
2.4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΤΗΣΕΩΝ	41
2.5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ	44
2.6. ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΤΗΣΕΙΣ	46

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	47
3.1. ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ SfM.....	47
3.2. ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ SfM	48
3.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	49
3.3.1. ΤΟ ΚΑΣΤΡΟ ΤΗΣ ΧΡΥΣΟΧΕΡΙΑΣ	49
<i>Εφαρμογή του Agisoft Photoscan</i>	49
<i>Εφαρμογή του VisualSfM</i>	54
<i>Συγκρίνοντας τα 2 προγράμματα</i>	55
3.3.2. ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	57
<i>Εφαρμογή του Agisoft Photoscan</i>	57
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	63

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Η λύση στο πρόβλημα του SfM, μπορεί να δοθεί με ταυτόχρονη επίλυση δύο ήδη γνωστών προβλημάτων.....	18
Εικόνα 2: Η συνθήκη συγγραμμικότητας.....	18
Εικόνα 3: Αλγόριθμος εντοπισμού βάση ομοιότητας.....	21
Εικόνα 4: Η αδυναμία εύρεσης κοινών σημείων, λόγω του προβλήματος του διαφράγματος.....	22
Εικόνα 5: Αξιοποίηση του επιπολικού επιπέδου.....	23
Εικόνα 6: Σύστημα της φωτομηχανής.....	24
Εικόνα 7: Προβολή των αξόνων x και z, του συστήματος της κάμερας.....	24
Εικόνα 8: Η γεωμετρική σχέση μεταξύ των εικόνων.....	27
Εικόνα 9: Η Νήσος Κάλυμνος.....	33
Εικόνα 10: Η θέση του κάστρου στο νησί.....	34
Εικόνα 11: Το Κάστρο της Χρυσοχεριάς.....	35
Εικόνα 12: Η θέση της κατοικίας στο νησί.....	36
Εικόνα 13: Η κατοικία προς αποτύπωση.....	36
Εικόνα 14: Το DJI Inspire 1.....	37
Εικόνα 15: Όδευση κάστρου Χρυσοχεριάς.....	38
Εικόνα 16: Μετρήσεις στο πεδίο με GPS.....	39
Εικόνα 17: Μετρήσεις στο πεδίο με GTS.....	40
Εικόνα 18: Οι κορυφές που ιδρύθηκαν στην κατοικία.....	41
Εικόνα 19: Προγραμματισμός πτήσης για το κάστρο της Χρυσοχεριάς.....	43
Εικόνα 20: Φωτοσταθερό σημείο.....	44
Εικόνα 21: Κατανομή των φωτοσταθερών του κάστρου της Χρυσοχεριάς.....	45
Εικόνα 22: Οι μετρημένες αποστάσεις στην κατοικία.....	46
Εικόνα 23: 3D μοντέλο του κάστρου της Χρυσοχεριάς, όπως προέκυψε με το Photoscan.....	49
Εικόνα 24: Κοντινή απόψη της Βόρειας πλευράς του κάστρου.....	50
Εικόνα 25: Ανατολική όψη του κάστρου.....	51
Εικόνα 27: Ορθοεικόνα του κάστρου της Χρυσοχεριάς σε ΕΓΣΑ '87.....	52
Εικόνα 28: Επιλεγμένες τομές και όψεις για το κάστρο της Χρυσοχεριάς.....	53
Εικόνα 29: Πυκνό νέφος σημείων με τη χρήση του λογισμικού VisualSfM.....	54
Εικόνα 30: Διαφορές στο υψόμετρο των σημείων στα 2 νέφη.....	56
Εικόνα 31: 3D μοντέλο του τμήματος της αστικής περιοχής.....	58
Εικόνα 32: Σφάλματα μετρημένων αποστάσεων.....	58
Εικόνα 33: Ορθοεικόνα της κάτοψης αστικής περιοχής.....	59

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά DJI Inspire 1	37
Πίνακας 2: Συντεταγμένες των στάσεων 1 και 2.....	39
Πίνακας 3: Συντεταγμένες κορυφών της όδευσης του κάστρου της Χρυσοχειριάς....	40
Πίνακας 4: Σύγκριση διαφορετικών υψών πτήσης.....	42
Πίνακας 5: Υπολογισμός απαιτούμενων αεροφωτογραφιών	42
Πίνακας 6: Συντεταγμένες φωτοσταθερών σημείων του κάστρου της Χρυσοχειριάς .	44
Πίνακας 7: Αποστάσεις μετρημένων φωτοσταθερών στην κατοικία	45
Πίνακας 8: Ακρίβειες φωτοσταθερών στο κάστρο της Χρυσοχειριάς	50
Πίνακας 9: Αποτελέσματα γεωαναφοράς του νέφους από το VisualSfM.....	55
Πίνακας 10: Σύγκριση αριθμού σημείων των 2 νεφών	55
Πίνακας 11: Σύγκριση χρόνου και υπολογιστικής δύναμης.....	56
Πίνακας 12: Σύγκριση ακρίβειας των 2 νεφών.....	56

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο " Τρισδιάστατη αποτύπωση αντικειμένων με Μη επανδρωμένα Εναέρια Μέσα - UAV", αφορά στη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και την ένταξή τους σε επιθυμητό σύστημα αναφοράς, χρησιμοποιώντας αεροφωτογραφίες που λήφθηκαν μέσω ενός UAV (μη επανδρωμένο πτητικό μέσο). Ή πιο κοινά γνωστό και ως drone.

Επιλέχθηκε να αποτυπωθεί ένα αρχαιολογικό μνημείο και τμήμα αστικής περιοχής στη Νήσο Κάλυμνο (Δωδεκάνησα). Αφού φωτογραφήθηκαν τα επιθυμητά αντικείμενα, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική SfM (Structure from Motion) για τη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων τους. Με συνδυασμό επίγειων τοπογραφικών μετρήσεων, τα τρισδιάστατα μοντέλα απέκτησαν την πραγματική τους κλίμακα.

Η εργασία αυτή, αποτελείται από 4 ενότητες:

Στην **πρώτη** ενότητα, αναλύεται το πρόβλημα του SfM, τόσο θεωρητικά, όσο και μαθηματικά. Γίνεται, επίσης, αναφορά, στους βασικότερους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται από τα υπάρχοντα λογισμικά που επιλύουν το πρόβλημα του SfM.

Στην **δεύτερη** ενότητα, αρχικά περιγράφονται τα 2 αντικείμενα που θα αποτυπωθούν και θα φωτογραφηθούν. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση όλων των μέσων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο αλλά και η διαδικασία του προγραμματισμού των πτήσεων.

Στην **τρίτη** ενότητα, αφού αναφερθούν και σχολιαστούν τα υπάρχοντα λογισμικά για την επίλυση του προβλήματος, αναλύονται περαιτέρω τα 2 λογισμικά που επιλέχθηκαν και τα αποτελέσματα που έδωσε το καθένα από αυτά. Στο τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Στην **τέταρτη** ενότητα, παρουσιάζονται αρχικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των εργασιών και ολοκληρώνοντας, υπάρχουν προτάσεις για παρόμοιες μελλοντικές αποτυπώσεις.

SUMMARY

This senior thesis entitled "Three-dimensional mapping objects with Unmanned Aerial Vehicle - UAV", concerns the creation of three-dimensional models and their integration into a desired reference system, by using aerial photographs which were taken through an UAV (unmanned aerial vehicle), also known as drone.

An ancient monument and a portion of urban area, from the island of Kalymnos (Dodecanese), have been chosen to be mapped. After the desired objects had been photographed, there has been used the technique of SfM (Structure for Motion), for the creation of these three-dimensional models. In combination with the terrestrial topographical measurements, the three-dimensional models acquired their full scale.

This thesis consists of 4 sections:

*The **first** section analyzes the problem of SfM, both theoretically and mathematically. Reference is also made, at the most basic algorithms that are used by today's software that solve SfM's problem.*

*In the **second** section, the two items that are going to be mapped and photographed are initially described. Following that, all the means and the equipment that has been used, the measurements carried out in the field and also the process of planning the flight are getting analyzed.*

*In the **third** section, once the existing software for the solution of our problem is reported and commented, the two softwares that have been chosen and the results of each one are being further analyzed. At the end of course, both these results are getting compared.*

*In the **fourth** section, at first the conclusions emerging from the total work are presented and ultimately, there are proposals for similar future impressions.*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη χρήση των drones και των καμερών μικρών διαστάσεων (*action camegas*), είναι πλέον γεγονός. Τα drones, συνήθως μικρά ελικόπτερα με 4 έλικες, έχουν πάνω τους μια κάμερα μικρών διαστάσεων, ώστε να κουβαλάνε το μικρότερο δυνατό βάρος. Απευθύνονται στο ευρύ κοινό για λόγους, κυρίως, ψυχαγωγίας (π.χ. για βιντεοσκόπηση δραστηριοτήτων).

Ως Μηχανικοί, πρέπει να συμβαδίζουμε με τη σύγχρονη τεχνολογία. Το μεγάλο κόστος για την πραγματοποίηση μιας πτήσης για τη λήψη αεροφωτογραφιών με τις κλασικές Φωτογραμμετρικές μεθόδους, σε σχέση με το συνεχώς μειούμενο κόστος των drones/UAV's, δεν μπορεί να περάσει απαρατήρητο.

Οι φωτογραμμετρικές/μετρητικές μηχανές έχουν πολύ καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά από οποιοδήποτε UAV υπάρχει στο εμπόριο, αλλά είναι ασύμφορες από θέμα κόστους και ευελιξίας. Έτσι οι κλασικές μέθοδοι της Φωτογραμμετρίας, χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές δεδομένων για την επίλυση του προβλήματος του SfM στις αρχές του 2000. Δηλαδή για την απόκτηση της γεωμετρίας ενός ακίνητου άκαμπτου σώματος όταν κινείται η κάμερα ή το αντίθετο. Η παράλληλη εξάπλωση των κατά πολύ οικονομικότερων drones (σε σχέση με τις μετρητικές μηχανές), αποτέλεσε νέα σημαντική πηγή δεδομένων για το SfM, ώστε να μπορεί να δοθεί λύση σε τοπογραφικά προβλήματα, με τις ακρίβειες που απαιτούνται.

Ο λόγος που χρησιμοποιείται το SfM και όχι οι κλασικές Φωτογραμμετρικές μέθοδοι, είναι πως αφενός το drone δεν είναι ακριβές στην πτήση του (άγνωστες στροφές, παρασύρεται εύκολα από τον αέρα, συνεχώς μεταβαλλόμενο ύψος πτήσης κτλ) και αφετέρου η κάμερα που διαθέτει, δεν είναι μετρητική και επομένως είναι άγνωστος ο εσωτερικός προσανατολισμός της με την ακρίβεια που απαιτείται.

Αποφασίστηκε, λοιπόν, να αεροφωτογραφηθούν με drone δύο αντικείμενα που ήταν ασύμφορο να αποτυπωθούν εξ ολοκλήρου με τις κλασικές τοπογραφικές μεθόδους (από θέμα χρόνου/κόπου). Σκοπός είναι να δημιουργηθούν τα 3D μοντέλα αυτών των 2 αντικειμένων, οι αντίστοιχες ορθοεικόνες τους (σε πραγματική κλίμακα) και να εξαχθούν οι επιθυμητές τομές/όψεις. Όλα αυτά βέβαια, θα συνδυαστούν με επίγειες τοπογραφικές μετρήσεις, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ένταξης τους στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς.

Τελειώνοντας και αφού έχουν αποκτηθεί όλες οι απαραίτητες αεροφωτογραφίες, θα χρησιμοποιηθούν τα πιο γνωστά λογισμικά πάνω στο αντικείμενο, ώστε να συγκριθούν οι ακρίβειες και να εντοπισθούν πιθανά προβλήματα.

1. STRUCTURE FROM MOTION (SfM)

Όλοι οι άνθρωποι, ζούμε, αντιλαμβανόμαστε και αλληλεπιδρούμε μέσα σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον. Ωστόσο δεν παρατηρούμε άμεσα σε 3 διαστάσεις. Η πληροφορία που δεχόμαστε μέσω της λειτουργίας της όρασης, είναι οι δισδιάστατες προβολές του χώρου. Στη συνέχεια, μέσω σύνθετων μηχανισμών στον εγκέφαλό μας, εξάγονται τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά.

Η αλματώδης ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών, έκανε όλο και μεγαλύτερη την ανάγκη της εύκολης ανάκτησης 3D πληροφορίας στον Η/Υ από 2D εικόνες (η απόκτηση των οποίων ήταν πολύ εύκολη). Το πρόβλημα είχε λυθεί αρχικά με την επιστήμη της στερεο-φωτογραμμετρίας, από τις αρχές του 20ου αιώνα. Ωστόσο, μαζί και με την ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης, το πρόβλημα ανάκτησης 3D πληροφορίας, έπρεπε να μπορεί να επιλυθεί μέσω Η/Υ, γρήγορα και με αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Για το σκοπό αυτό λοιπόν, δημιουργήθηκε το Computer Vision.

Computer vision (όραση με υπολογιστές), είναι μια επιστήμη που μελετά το πως μπορεί να ανακατασκευαστεί, να ερμηνευτεί και να κατανοηθεί μια 3D σκηνή και οι πληροφορίες που δίνει, προερχόμενη από 2D εικόνες/προβολές, σε σχέση με τις ιδιότητες των δομών που παρουσιάζει η σκηνή. Η ανθρώπινη όραση έχει αρκετούς περιορισμούς, όπως είναι η μειωμένη μνήμη, η αδυναμία να θυμηθεί γρήγορα μια συγκεκριμένη εικόνα και η λειτουργία της μόνο στο ορατό φάσμα. Έτσι λοιπόν, απώτερος στόχος της επιστήμης του Computer vision, είναι να υπερβεί την ανθρώπινη όραση, με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και του κατάλληλου λογισμικού. Η επιστήμη αυτή, απαιτεί γνώσεις στην επιστήμη των υπολογιστών, ηλεκτρολόγων μηχανικών, μαθηματικών, φυσιολογίας, βιολογίας και γνωσιακής επιστήμης. (Qiang Ji, 2007)

Το παραπάνω γενικό πρόβλημα ωστόσο, μπορεί να γίνει πιο ειδικό και συγκεκριμένο, ώστε να μπορεί να επιλυθεί και ευκολότερα. Έτσι λοιπόν, καταλήγουμε στο πρόβλημα της ανάκτησης 3D γεωμετρίας, από 2D εικόνες/προβολές ή αλλιώς, στο πρόβλημα υπολογισμού τρισδιάστατης κίνησης και σχήματος (Structure from Motion). Η κίνηση αφορά στον παρατηρητή (θέση λήψης της εικόνας) και το σχήμα αφορά στο αντικείμενο της φωτογράφισης.

1.1. Περιγραφή του SfM

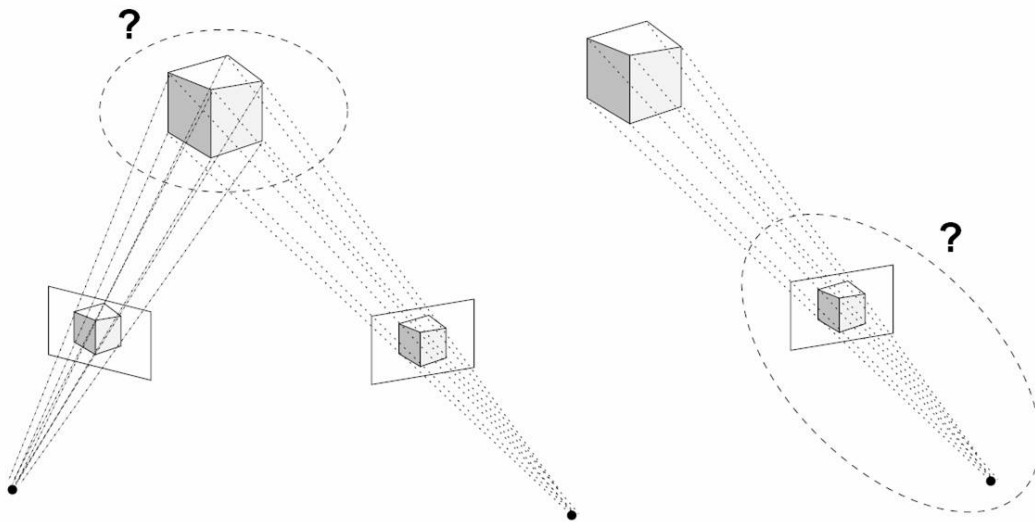
Το "Structure from Motion" (SfM) λοιπόν, είναι το πρόβλημα εκτίμησης της τρισδιάστατης γεωμετρίας, από εικόνες δύο διαστάσεων ($2D \rightarrow 3D$). Είναι ένα πολύ δημοφιλές, αλλά και παράλληλα πολύ καλά μελετημένο πρόβλημα, που υλοποιείται πλέον μέσω της επιστήμης του Computer vision και βρίσκεται στην καρδιά της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας.

Ένας πιο τυπικός ορισμός αυτού του προβλήματος, είναι η εκτίμηση της 3D γεωμετρίας ενός συνήθως άκαμπτου αντικειμένου και με σχετική κίνηση της κάμερας, λαμβάνοντας 2D εικόνες. Οι εξωτερικοί παράμετροι της κάμερας είναι άγνωστοι(π.χ. θέσεις φωτομηχανών), αλλά μπορούν να

υπολογιστούν. Άγνωστος μπορεί να είναι ακόμα και ο εσωτερικός προσανατολισμός. (Henrik Aanæs, 2003)

Μια πρώτη λύση στο πρόβλημα, είναι η πολλαπλή και ταυτόχρονη επίλυση δύο, αλλά πολύ καλά γνωστών προβλημάτων στη Φωτογραμμετρία:

1. Η αποτύπωση μιας δομής, από γνωστές θέσεις κάμερας (εμπροσθοτομία)
2. Ο προσδιορισμός της θέσης της κάμερας, από γνωστά σημεία (οπισθοτομία).

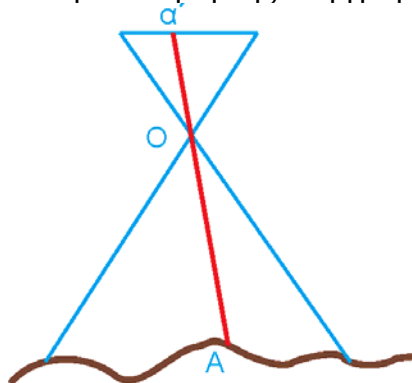


Εικόνα 1: Η λύση στο πρόβλημα του SfM, μπορεί να δοθεί με ταυτόχρονη επίλυση δύο ήδη γνωστών προβλημάτων

(ΠΗΓΗ: *Methods for Structure from Motion* - Henrik Aanæs, 2003)

Ωστόσο με αυτόν το συνδυασμό προβλημάτων (εμπροσθοτομίας και οπισθοτομίας), η λύση θα υπολογιστεί μόνο με έναν μετασχηματισμό ομοιότητας (μετάθεσης, κλίμακας ή περιστροφής). Αυτή η μεγάλη αδυναμία, η οποία θα έχει επιπτώσεις φυσικά στην τελική ακρίβεια της 3D γεωμετρίας, δεν καθιστά τα αποτελέσματα πλήρως άχρηστα. Είναι μια γρήγορη και εύκολη λύση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως σε εφαρμογές ψυχαγωγίας και ανάστροφης μηχανικής (reverse engineering).

Είναι προφανές όμως, πως δεν καλύπτει τις ανάγκες και τις ακρίβειες που απαιτεί ένας Τοπογράφος Μηχανικός. Αντιθέτως για την επίλυση αυτών των 2 προβλημάτων στη Φωτογραμμετρία (της εμπροσθοτομίας και της οπισθοτομίας), αξιοποιείται η συνθήκη της συγγραμμικότητας.



Εικόνα 2: Η συνθήκη συγγραμμικότητας

Η συνθήκη συγγραμμικότητας, είναι η εξίσωση ευθείας στον τρισδιάστατο χώρο, για την οποία είναι αντίστοιχα γνωστά:

Οπισθοτομία

- Οι βασικές παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού (x_0, y_0, c)
- Η θέση του σημείου a' στην εικόνα (x, y)
- Οι συντεταγμένες του σημείου στο χώρο (X, Y, Z)

Εμπροσθοτομία

- Οι βασικές παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού (x_0, y_0, c)
- Οι θέσεις του σημείου a' στις 2 εικόνες (x', y', x'', y'')
- Η θέση του κέντρου προβολής O στις 2 εικόνες ($X'_0, Y'_0, Z'_0, X''_0, Y''_0, Z''_0$)
- Οι στροφές στις 2 εικόνες ($\omega', \phi', \kappa', \omega'', \phi'', \kappa''$)

Η συνθήκη με την οποία υπολογίζονται τα άγνωστα στοιχεία, είναι ότι τα a', A και O κείνται επί ευθείας. Η χρήση της συνθήκης συγγραμμικότητας, δίνει ακριβή λύση (και όχι προσεγγιστική).

Έτσι λοιπόν, μια πιο σοβαρή αλλά και αναλυτική προσέγγιση στο πρόβλημα, είναι η παρακάτω:

1. Εντοπισμός και εξαγωγή χαρακτηριστικών ομόλογων (κοινών) σημείων μεταξύ των εικόνων.

Επιλέγονται σημεία με εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως είναι συνήθως τα σημεία με υψηλή καμπυλότητα. Το πρόβλημα αυτό, είναι γνωστό στη Φωτογραμμετρία ως συνταύτιση σημείων (Matching).

2. Προσαρμογή του κατάλληλου γεωμετρικού μοντέλου

Αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά συνταυτισμένα σημεία, εφαρμόζεται το γεωμετρικό μοντέλο λήψης και η επιπολική γεωμετρία, για να προσδιοριστούν:

- οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού
- οι σχετικές θέσεις των φωτομηχανών στον τρισδιάστατο χώρο του μοντέλου (προσανατολισμός εικόνων)
- ένα αρχικό νέφος συνταυτισμένων σημείων (sparse cloud)

Η ολοκλήρωση αυτών των δύο σταδίων, για την επίλυση του προβλήματος του SfM, ονομάζεται ως Alignment.

Πρακτικά αυτά τα 2 στάδια, σημαίνουν την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού και το σχετικό προσανατολισμό των εικόνων (δηλαδή τη μεταξύ συσχέτιση ενός ζεύγους εικόνων, με τη δημιουργία τουλάχιστον 5 επιπολικών επιπέδων). Είναι γνωστό πως ο σχετικός προσανατολισμός χρησιμοποιεί απλώς ομόλογα σημεία και όχι φωτοσταθερά. Αυτό σημαίνει πως η απόκτηση του τρισδιάστατου μοντέλου, μπορεί να γίνει και χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών, αλλά βέβαια σε αυθαίρετη κλίμακα και σύστημα αναφοράς.

3. Γεωαναφορά νέφους σημείων

Το στάδιο αυτό μπορεί να παραληφθεί ή να πραγματοποιηθεί αργότερα, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν είναι απαραίτητη η χρήση φωτοσταθερών (σημείων με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες) για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου. Η χρήση τους ωστόσο, θα γεωαναφέρει και θα δώσει ορθή κλίμακα στο τελικό μοντέλο.

Αυτός είναι και ο απόλυτος προσανατολισμός του μοντέλου. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν 3D μετασχηματισμό ομοιότητας από ένα τρισδιάστατο σύστημα (του μοντέλου), σε ένα άλλο σύστημα (στο γεωδαιτικό). Για την πραγματοποίηση αυτού του μετασχηματισμού, απαιτούνται τουλάχιστον δύο πλήρη φωτοσταθερά (X,Y,Z) και ένα υψομετρικό (Z).

4. Πυκνή συνταύτιση σημείων

Το αρχικό νέφος συνταυτισμένων σημείων (Sparse cloud), θα πρέπει να γίνει αρκετά πυκνότερο, με την ανίχνευση περισσότερων συνταυτισμένων σημείων. Σκοπός είναι η καλύτερη τελική ακρίβεια του μοντέλου. Το τελικό πυκνό νέφος, που δημιουργείται με τη χρήση διαφόρων αλγορίθμων, ονομάζεται ως Dense cloud.

5. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου

Στο στάδιο αυτό, πραγματοποιείται η ένωση του πυκνού νέφους σημείων (Dense cloud), με την δημιουργία τριγώνων. Πρακτικά δημιουργείται η επιφάνεια του τελικού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή, είναι γνωστή ως Meshing.

6. Δημιουργία υφής

Σε αυτή τη φάση, έχει ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος του SfM. Το μοναδικό που μένει, είναι να συνδυαστεί το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο, με μια φωτορεαλιστική απεικόνιση. Η τελευταία αυτή διαδικασία, ονομάζεται Texturing.

1.2. Συνταύτιση Σημείων

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην ερμηνεία εικόνων από τον υπολογιστή, είναι η αναγνώριση κοινών σημείων μεταξύ διαφόρων εικόνων (Feature tracking/Matching/Συνταύτιση). Μπορεί για τον άνθρωπο να είναι πολύ εύκολο να αντιστοιχήσει δύο εικόνες, αλλά αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αξιοποιεί πολύ σημαντική ποσότητα πληροφορίας της εικόνας.

Αντιθέτως μια εικόνα στον υπολογιστή, περιέχει απλώς στοιχεία έντασης της φωτεινότητας. Αν για παράδειγμα πάρουμε μια ασπρόμαυρη εικόνα(8bit), το κάθε pixel μπορεί να πάρει τιμές από το 0 έως και 255. Εάν η εικόνα έχει διαστάσεις 4000 x 3000 pixels, σημαίνει πως έχει συνολικά 12.000.000 pixels. Αν πάρουμε ακόμα μια εικόνα με σκοπό να εντοπίσουμε κοινά σημεία, είναι φανερό πως αυτό δεν μπορεί να γίνει συγκρίνοντας τις τιμές των pixel τους. Θα εντοπίζονταν 100άδες κοινά σημεία για κάθε ένταση της φωτεινότητας και μάλιστα τα σημεία αυτά, θα ήταν και λανθασμένα (καθώς η φωτεινότητα ενός σημείου, δεν είναι πάντοτε σταθερή σε διαφορετικές θέσεις λήψης). Ειδικά όταν έχουμε

έγχρωμες εικόνες (24bit) όπου δεν υπάρχει μόνο μία τιμή μεταξύ 0 και 255 για κάθε pixel, αλλά τρεις (πράσινο, κόκκινο, μπλε).

Είναι φανερό, πως ειδικά για την επίλυση του προβλήματος του SfM, απαιτούνται ειδικοί αλγόριθμοι, ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός κοινών σημείων μεταξύ δύο ή περισσότερων εικόνων.

Το πρόβλημα της συνταύτισης σημείων ωστόσο, δεν είναι κάτι καινούργιο. Έχει ήδη αντιμετωπιστεί με διάφορους τρόπους από την επιστήμη της Φωτογραμμετρίας. Οι πιο γνωστοί εξ' αυτών, είναι (Krauss, 2001):

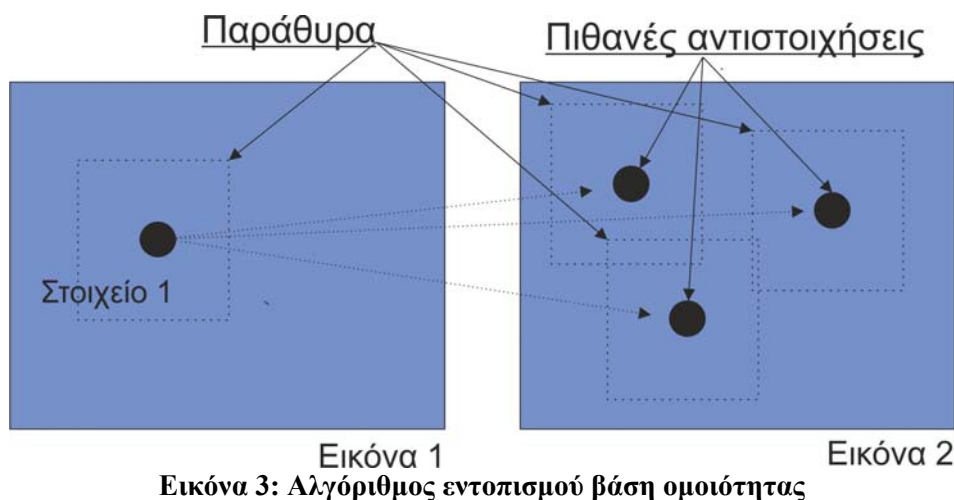
1. Με μονοδιάσταση συσχέτιση
2. Με τελεστές ενδιαφέροντος
3. Με τη βοήθεια ακμών
4. Με την πυραμίδα εικόνας

Βάση αυτών, κατασκευάστηκαν και οι αλγόριθμοι εντοπισμού, όπου αναλύονται αμέσως παρακάτω.

1.2.1. Εντοπισμός βάσει ομοιότητας

Μιας και είναι ανώφελη η σύγκριση ενός pixel με κάθε μεμονωμένο pixel της άλλης εικόνας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια πιο ορθή λύση. Η πιο απλή λύση, είναι να συγκρίνουμε την ένταση κάθε pixel μιας μικρής περιοχής (παράθυρο), γύρω από το σημείο που μας ενδιαφέρει. Κάθε pixel δηλαδή, χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα που περιέχει τις τιμές έντασης, όλων των pixels εντός του επιλεγμένου παραθύρου. (Παπαχρήστου, 2009)

Όταν εκτελείται λοιπόν ο εντοπισμός βάσει ομοιότητας, γίνονται αντιστοιχήσεις των ίδιων παραθύρων, παίρνοντας ως παραδοχή ότι κάθε σημείο του παραθύρου εκτελεί την ίδια κίνηση.

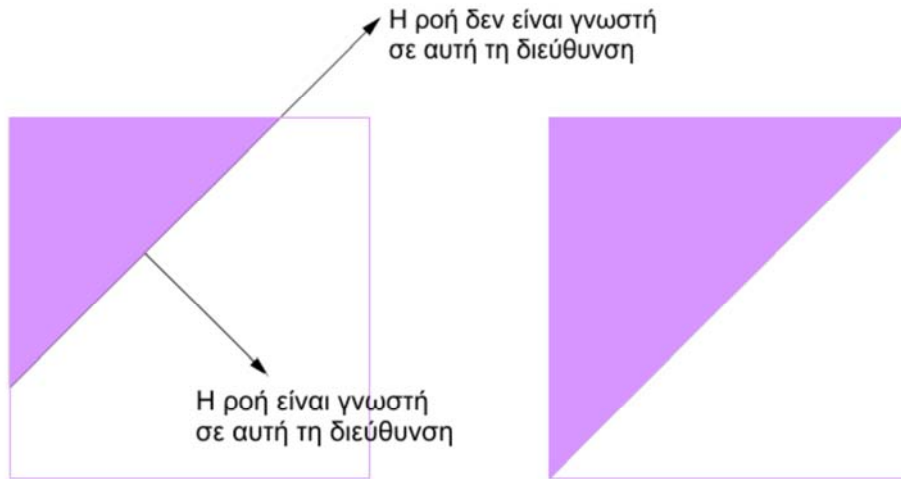


Εικόνα 3: Αλγόριθμος εντοπισμού βάσει ομοιότητας

1.2.2. Το πρόβλημα του διαφράγματος

Ο αλγόριθμος εντοπισμού βάσει ομοιότητας, μπορεί να δώσει ορθά αποτελέσματα για ένα μεγάλο πλήθος εικόνων. Δεν μπορεί όμως να εφαρμοστεί αποτελεσματικά, σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις.

Εδώ έρχεται το λεγόμενο πρόβλημα του διαφράγματος (ή του λευκού τοίχου). Το πρόβλημα αυτό, εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου η ένταση σε μια περιοχή δεν έχει αρκετές μεταβολές (π.χ. μια σκακιέρα ή ένας λευκός τοίχος) ή όταν η ροή της φωτεινότητας, δεν είναι γνωστή σε κάθε κατεύθυνση.



Εικόνα 4: Η αδυναμία εύρεσης κοινών σημείων, λόγω του προβλήματος του διαφράγματος

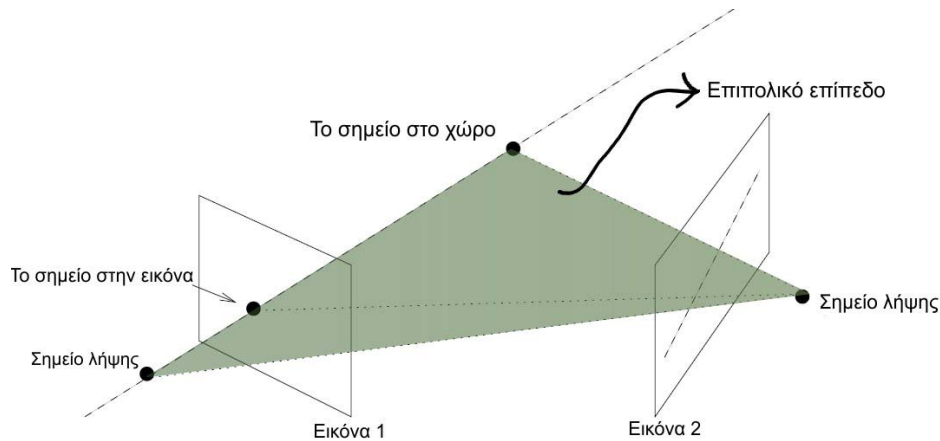
Σε τέτοιες περιπτώσεις και προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα του διαφράγματος, θα πρέπει να περιορίσουμε την προσοχή μας, στις περιοχές για τις οποίες το πρόβλημα εύρεσης κοινών σημείων, μπορεί να λυθεί. Αυτές οι περιοχές, αποκαλούνται "χαρακτηριστικές περιοχές".

1.2.3. Περιορίζοντας το χώρο αναζήτησης

Μια σημαντική βελτίωση μπορεί να γίνει στον βασικό αλγόριθμο εντοπισμού κοινών σημείων, εάν περιοριστεί ο χώρος αναζήτησης των κοινών σημείων. Αυτός είναι ένας τρόπος για να διευκρινίσουμε ότι μόνο ορισμένα χαρακτηριστικά της μιας εικόνας, μπορούν να ταιριάξουν μόνο με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της άλλης εικόνας. Τα βασικά οφέλη αυτής βελτίωσης, είναι:

1. Περιορίζεται ο αριθμός των υπολογισμών
2. Δίνεται τη δυνατότητα να μπορεί να ενσωματώνει προηγούμενη γνώση ή εκτιμήσεις για το πώς σχηματίστηκαν οι εικόνες

Υποθέτοντας παράλληλα πως το αντικείμενο στην εικόνα είναι στερεό(δηλαδή κινείται μόνο η κάμερα) ή το αντίθετο, μπορούμε χρησιμοποιώντας το επιπολικό επίπεδο, να περιορίσουμε την αναζήτηση ενός χαρακτηριστικού σημείου σε μία γραμμή.



Εικόνα 5: Αξιοποίηση του επιπολικού επιπέδου

1.2.4. Οι αλγόριθμοι συνταύτισης σημείων

Πλέον υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι για τον εντοπισμό κοινών σημείων. Οι αλγόριθμοι αυτοί περιλαμβάνονται στην ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκη OpenCV (Open Source Computer Vision), που στοχεύει αποκλειστικά σε προβλήματα Computer Vision.

Οι αλγόριθμοι αυτοί, έχουν χωριστεί σε 2 κατηγορίες:

1. Αλγόριθμοι εντοπισμού γωνιών

Είναι οι αλγόριθμοι που επιλέγουν ως σημεία, αυτά που ξεχωρίζουν σε σχέση με τα γειτονικά τους, βάσει του έντονου περιεχομένου φωτεινότητας. Αν και αυτοί οι αλγόριθμοι κάνουν καλές και ορθές επιλογές κοινών σημείων, δεν θεωρούνται τόσο αποτελεσματικοί, καθώς τείνουν να εντοπίζουν σημεία σε συγκεκριμένες περιοχές μιας εικόνας και όχι σε όλη την εικόνα. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας, είναι ο Harris και ο Canny.

2. Αλγόριθμοι εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων

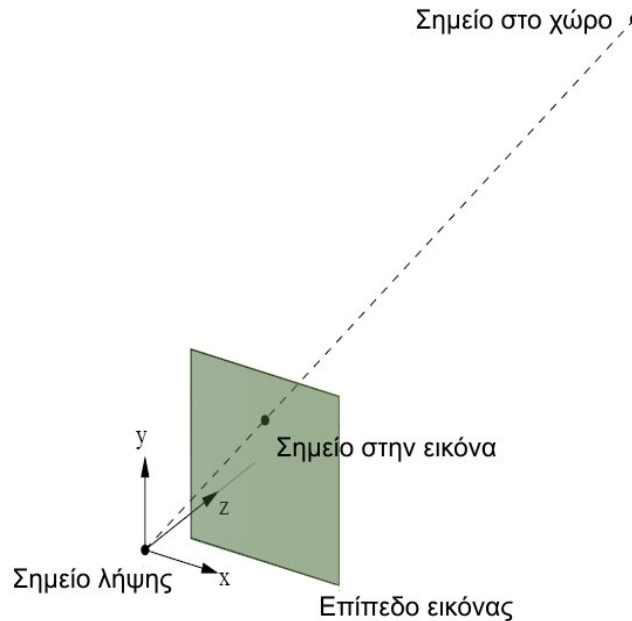
Οι αλγόριθμοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, υπολογίζουν σημεία με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως το ότι παραμένουν αμετάβλητα σε αλλαγές κλίμακας και περιστροφής, ενώ έχουν και υψηλή αντίθεση. Αυτοί οι αλγόριθμοι θεωρούνται καλύτεροι από αυτούς της πρώτης κατηγορίας, αλλά απαιτούν περισσότερο χρόνο εκτέλεσης. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι από αυτούς, είναι ο SURF και κυρίως ο SIFT.

1.3. Γεωμετρία 2 Λήψεων

Στην παρούσα ενότητα, αναλύεται το γεωμετρικό μοντέλο λήψης και οι αντίστοιχοι πίνακες συσχέτισης των εικόνων. Η ολοκλήρωση και αυτού του σταδίου (Alignment), συνεπάγεται με την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού και την πραγματοποίηση του σχετικού προσανατολισμού. Η γεωμετρία 2 λήψεων, σημαίνει πως αναφερόμαστε μόνο για ένα ζεύγος εικόνων (2 λήψεις δηλαδή). Συνδυάζοντας τη γεωμετρία των 2 λήψεων για περισσότερες λήψεις/εικόνες, καταλήγουμε στη γεωμετρία των πολλών λήψεων (ενότητα 1.4.), όπου είναι και το πραγματικό αντικείμενο ενδιαφέροντος μας.

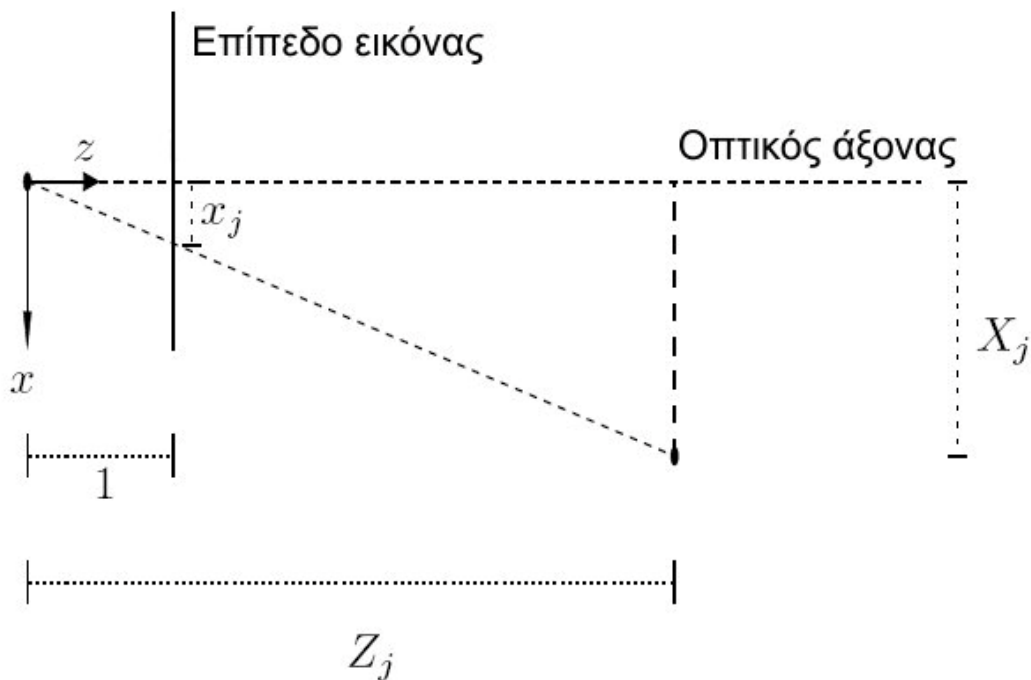
1.3.1. Το βασικό μοντέλο λήψης

Πριν γίνει οποιαδήποτε άλλη ανάλυση της γεωμετρίας, θα πρέπει αρχικά να δοθεί το βασικό μαθηματικό μοντέλο της λήψης. Θεωρούμε ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα, που έχει ως κέντρο το σημείο λήψης. Οι άξονες x και y , είναι παράλληλοι στο επίπεδο της εικόνας, ενώ ο άξονας z βρίσκεται κατά μήκος του οπτικού άξονα.



Εικόνα 6: Σύστημα της φωτομηχανής

Όσον αφορά την κλίμακα του συστήματος, θεωρούμε πως η απόσταση της κάμερα από το επίπεδο της εικόνας, ισούται με 1. Εάν λοιπόν προβάλλουμε τους άξονες x και z , έχουμε:



Εικόνα 7: Προβολή των αξόνων x και z , του συστήματος της κάμερας

Βλέπουμε πως:

$$x_j = \frac{x_j}{1} = \frac{X_j}{Y_j}, \quad (1.1)$$

Εάν πάρουμε με παρόμοιο τρόπο την προβολή των επιπέδων y και z , καταλήγουμε στο τελικό μοντέλο της λήψης:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_j} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

1.3.2. Ομογενείς συντεταγμένες

Είναι φανερό πως θα χρησιμοποιηθούν μετασχηματισμοί, για την επίλυση του προβλήματος του SfM. Για να υπάρχουν γραμμικές εξισώσεις ώστε να μη χρειάζονται οι αρχικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων και να γίνονται γρήγορα οι επιλύσεις, χρησιμοποιούνται ομογενείς συντεταγμένες. Οι ομογενείς συντεταγμένες, είναι ένας δισδιάστατος γεωμετρικός μετασχηματισμός, που προκύπτει από πολλαπλασιασμό πινάκων. Με τη χρήση των ομογενών συντεταγμένων, δίνεται η δυνατότητα να παραστήσουμε όλους τους μετασχηματισμούς με πίνακες, οι οποίοι παρέχουν ευνοϊκή μεταχείριση (από άποψη υπολογισμών).

Η ομογενής αναπαράσταση των 2D σημείων, γίνεται με την προσθήκη μιας τρίτης διάστασης, όπου είναι ένας συντελεστής κλίμακας. Δηλαδή το σημείο $[x \ y]^T$, θα γίνει: $[sx \ sy \ s]^T$, όπου s είναι ο συντελεστής κλίμακας.

Μπορεί αρχικά να μην φαίνεται να έχει κάποιο ιδιαίτερο νόημα ο συγκεκριμένος τρόπος παρουσίασης, αλλά στην πράξη καθιστά την παρουσίαση ορισμένων γεωμετρικών οντοτήτων, πολύ απλούστερη.

Ας πάρουμε για παράδειγμα μια ευθεία, η οποία συμπεριλαμβάνει όλα τα σημεία $[x \ y]^T$, για την οποία ισχύει:

$$a \cdot x + b \cdot y + c = 0 \Leftrightarrow s \cdot a \cdot x + s \cdot b \cdot y + s \cdot c = 0$$

Δεδομένου ότι μία ευθεία παραμένει αναλλοίωτη ακόμα και με την ύπαρξη συντελεστή κλίμακας, μπορεί να γραφτεί με ομογενείς συντεταγμένες:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} s \cdot x \\ s \cdot y \\ s \end{bmatrix} = l^T \cdot p = 0,$$

όπου l είναι το διάνυσμα που αντιπροσωπεύει την ευθεία, ενώ ο p είναι οι ομογενείς συντεταγμένες.

Μπορούμε επίσης να παρουσιάσουμε το μοντέλο της λήψης, με ομογενείς συντεταγμένες:

$$s_j \cdot p_j = \begin{bmatrix} s_j \cdot x_j \\ s_j \cdot y_j \\ s_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

όπου το s_j είναι ίσο με το Z_j .

1.3.3. Το βελτιωμένο μοντέλο λήψης

Στην ενότητα 1.3.1. αναφέρθηκε πως το βασικό μοντέλο της λήψης, ισχύει μόνο αν όλα τα αντικείμενα μπορούν να περιγραφούν από ένα σύστημα συντεταγμένων, του οποίου η κλίμακα να εξαρτάται από την εστιακή απόσταση και να είναι μετατοπισμένο, ώστε η αρχή των αξόνων να βρίσκεται πάνω στον οπτικό άξονα. Εάν δεν υπάρχει κλίμακα και μετάθεση, τότε το σύστημα μπορεί να ενσωματωθεί στην (1.3) ως εξής:

$$\begin{bmatrix} s_j \cdot x_j \\ s_j \cdot y_j \\ s_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & \Delta_x \\ 0 & f & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

όπου το f είναι η εστιακή απόσταση του φακού και τα (Δ_x, Δ_y) είναι οι συντεταγμένες του οπτικού άξονα πάνω στο σύστημα του επιπέδου της εικόνας. Ο πίνακας αυτός αναφέρεται ως πίνακας βαθμονόμησης και τα στοιχεία του, ως παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού.

Τα περισσότερα αντικείμενα όμως στο αληθινό κόσμο, δεν είναι δυνατόν να είναι ευθυγραμμισμένα με το σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής. Ειδικά όταν έχουμε περισσότερες από μία θέσεις λήψης εικόνων. Έτσι λοιπόν, οι συντεταγμένες του κάθε αντικειμένου που φωτογραφίζεται, θα πρέπει να μετατρέπονται προσωρινά, στο σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής. Αυτός ο μετασχηματισμός, αποτελείται από μία περιστροφή με έναν πίνακα $R_{3 \times 3}$ και από μία μετάθεση με έναν πίνακα $t_{3 \times 1}$:

$$\begin{bmatrix} s_j \cdot x_j \\ s_j \cdot y_j \\ s_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & \Delta_x \\ 0 & f & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(R \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} + t \right), \quad (1.5)$$

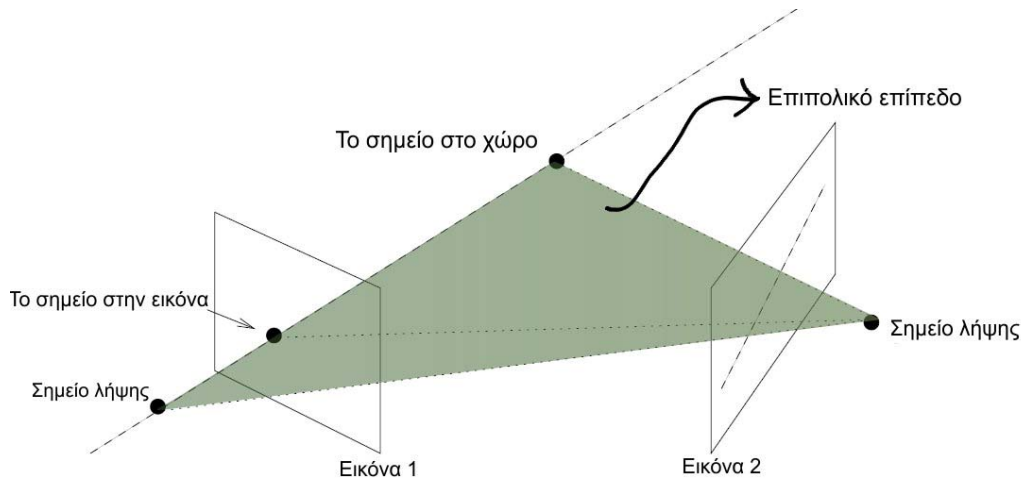
Για να βρεθεί το 3D σημείο $[X_j \ Y_j \ Z_j \ 1]^T$ σε ομογενείς συντεταγμένες, η (1.5) γράφεται ως:

$$\begin{bmatrix} s_j \cdot x_j \\ s_j \cdot y_j \\ s_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & \Delta_x \\ 0 & f & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [R \ t] \cdot \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

Αυτό είναι και το τελικό μοντέλο λήψης που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω. Να σημειωθεί πως ο πίνακας βαθμονόμησης μπορεί να παραλείπεται, υποθέτοντας ότι τα σημεία της εικόνας έχουν μεταβληθεί αντίστοιχα.

1.3.4. Ο επιπολικός πίνακας (Fundamental matrix)

Ο επιπολικός πίνακας, αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ δύο εικόνων με γνωστή τη σχετική τους θέση, αναφορικά με τη θέση ενός χαρακτηριστικού σημείου κοινού και στις δύο εικόνες.



Εικόνα 8: Η γεωμετρική σχέση μεταξύ των εικόνων

Η σχέση αυτή όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, μας δείχνει πως η προβολή ενός 3D σημείου με άγνωστες συντεταγμένες πάνω στο 2D επίπεδο της Εικόνας 1, περιορίζει τη θέση του πάνω σε μία ευθεία στον 3D χώρο. Όπου το σημείο αυτό, μπορεί και πάλι να προβληθεί πάνω και στον επίπεδο της Εικόνας 2.

Επίσης ένα 2D σημείο πάνω στην Εικόνα 2, θα περιορίζεται πάνω σε μια ευθεία για την προβολή του πάνω στην Εικόνα 1. Αυτή η ευθεία, ονομάζεται επιπολική ευθεία του σημείου, στην εικόνα 1. Στην πράξη, είναι μια ημιευθεία, καθώς ένα 3D σημείο δεν μπορεί να βρísκεται πίσω από την κάμερα.

Αυτή η σχέση, παρουσιάζεται από τον επιπολικό πίνακα. Εάν το σημείο του χώρου συμβολισθεί ως P και η προβολή του στην εικόνα j ως p_j , το μοντέλο της κάμερας μπορεί να γραφτεί ως:

$$s_j \cdot p_j = s_j \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} = A(R \cdot P + t) \quad (1.7)$$

όπου το A αντιπροσωπεύει τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας (εστιακή απόσταση, μετάθεση κτλ) και R και t είναι οι εξωτερικές παράμετροι, περιλαμβανομένης της στροφής και της μετατόπισης του συστήματος του αντικειμένου, στο σύστημα της φωτομηχανής.

Εάν, λοιπόν, έχουμε 2 εικόνες στις οποίες προβάλλεται το ίδιο σημείο του χώρου, το σύστημα συντεταγμένων του αντικειμένου μπορεί να ευθυγραμμιστεί με το σύστημα συντεταγμένων της πρώτης εικόνας. Έτσι οι εξισώσεις παρατήρησης, μπορούν να γραφτούν ως:

$$s_1 \cdot p_1 = A_1 \cdot P \quad \text{και} \quad s_2 \cdot p_2 = A_1 \cdot (R \cdot P + t),$$

όπου: $R = R_2 R_1^T$ και $t = t_2 - R_2 R_1^T t_1$.

Υποθέτοντας ότι ο A μπορεί να αναστραφεί, καταλήγουμε:

$$P = s_1 \cdot A_1^{-1} \cdot p_1 \Rightarrow p_2 = s \cdot A_2 \cdot R \cdot A_1^{-1} \cdot p_1 + A_2 \cdot t \frac{1}{s_2},$$

όπου δείχνει να είναι η επιπολική ευθεία στην εικόνα 2.

Ως s , παίρνουμε: $s = \frac{s_1}{s_2}$.

Αυτό στη συνέχεια γίνεται:

$$A_2^{-1} p_2 = s R A_1^{-1} p_1 + t \frac{1}{s_2} \Rightarrow t \times A_2^{-1} p_2 = t \times s R A_1^{-1} p_1 \Rightarrow 0 = (t \times A_2^{-1} p_2) \times (t \times s R A_1^{-1} p_1) \Rightarrow$$

$$0 = (t \times A_2^{-1} p_2) \times (t \times R A_1^{-1} p_1) \Rightarrow A_2^{-1} p_2 (t^T (t \times R A_1^{-1} p_1)) - t ((A_2^{-1} p_2)^T (t \times R A_1^{-1} p_1)) =$$

$$- t ((A_2^{-1} p_2)^T (t \times R A_1^{-1} p_1)) = - t (p_2^T A_2^{-T} T R A_1^{-1} p_1) \Rightarrow$$

$$t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad p_2^T A_2^{-T} T R A_1^{-1} p_1 = 0,$$

όπου T είναι ο πίνακας που παριστάνει το εξωτερικό γινόμενο με το t , όπως το $\forall x T x = t \times x$.

Εάν $t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, τότε ο T θα είναι ένας πίνακας 3×3 με μηδενικά στοιχεία.

Έτσι ο επιπολικός πίνακας είναι: $F = A_2^{-T} T R A_1^{-1}$ (πίνακας 3×3), ενώ παίρνουμε και τη σχέση:

$$p_2^T F p_1 = 0 \quad (1.8)$$

1.3.5. Ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας (Essential matrix)

Ο επιπολικός πίνακας, συνδέεται στενά με μια ακόμα σχέση, που ονομάζεται δεσμευμένος επιπολικός πίνακας και συμβολίζεται ως E . Είναι η σχέση μεταξύ των δύο εικόνων, εάν κανονικοποιηθούν. Η σχέση του επιπολικού πίνακα μπορεί να γραφτεί ως:

$$0 = p_2^T T R p_1 = p_2^T E p_1 \quad (1.9)$$

Η σχέση λοιπόν μεταξύ επιπολικού και δεσμευμένου επιπολικού πίνακα, είναι:

$$A_2^{-T} E A_1^{-1} = F \quad (1.10)$$

Εάν αναλύσουμε τον πίνακα σε ιδιάζουσες τιμές, ο βασικός πίνακας μπορεί

να γραφτεί ως $E = U \cdot \Sigma \cdot V^T$, όπου: $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

1.3.6. Εκτιμώντας τον επιπολικό πίνακα

Από τα παραπάνω, προκύπτει ο επιπολικός πίνακας μπορεί να υπολογιστεί, εάν οι παράμετροι της κάμερας είναι γνωστοί (A_i : εσωτερικές και R_i, t_i : εξωτερικές). Η γνώση τους δεν είναι πάντοτε δεδομένη, οπότε θα πρέπει να εξετασθούν τρόποι υπολογισμού του επιπολικού πίνακα.

Έστω ότι ο επιπολικός πίνακας, είναι:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}, \quad (1.11)$$

Ένας τρόπος για να υπολογιστεί ο επιπολικός πίνακας, είναι μέσω κοινών σημείων στις 2 εικόνες. Ας υποθέσουμε πως έχουμε το ζεύγος ενός σημείου στις δύο εικόνες: (p_1, p_2) . Αυτό εξ' ορισμού ικανοποιεί τους περιορισμούς της επιπολικής ευθείας. Έτσι:

$$0 = p_2^T F p_1 = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} x_2 x_1, x_2 y_1, x_2, y_2 x_1, y_2 y_1, y_2, x_1, y_1, 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{12} \\ f_{13} \\ f_{21} \\ f_{22} \\ f_{23} \\ f_{31} \\ f_{32} \\ f_{33} \end{bmatrix} = b^T \cdot f,$$

όπου το f είναι το διάνυσμα που περιέχει τα στοιχεία του F , ενώ ο b είναι ο επιπολικός περιορισμός που αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος εικόνων.

Ο επιπολικός πίνακας έχει βαθμό ελευθερίας ίσο με 7. Επομένως απαιτούνται 7 τουλάχιστον ζεύγη σημείων και πρέπει $b^T \cdot f = 0$.

Συνήθως για την εύρεση του θεμελιώδους πίνακα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος RANSAC, ο οποίος έχει ως είσοδο τα δεδομένα των κοινών σημείων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι ότι τα δεδομένα εισόδου αποτελούνται από «inliers», δηλαδή από δεδομένα που η κατανομή τους μπορεί να εξηγηθεί βάσει κάποιων παραμέτρων ενός μοντέλου και από «outliers», δηλαδή από δεδομένα που δεν ταιριάζουν σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο. Επιπλέον, θεωρείται ότι τα δεδομένα μπορεί να έχουν επηρεασθεί από θόρυβο. Τα outliers μπορεί να έχουν προέλθει από υψηλές τιμές θορύβου ή

από λανθασμένες μετρήσεις ή ακόμα και από λανθασμένες υποθέσεις σχετικά με την ερμηνεία των δεδομένων. Ο RANSAC, επίσης, υποθέτει ότι δοσμένου ενός μικρού αριθμού inliers, υπάρχει διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων ενός μοντέλου στο οποίο αυτά ταιριάζουν. Δηλαδή, ακόμα και αν ο θόρυβος έχει επηρεάσει μεγάλο ποσοστό των δεδομένων εισόδου, ο αλγόριθμος RANSAC είναι ικανός να βρει λύση. (Κωνσταντινίδης, 2009)

1.3.7. Ο αλγόριθμος των 8 σημείων

Έχουμε αναλύσει το πως οι εικόνες αντίστοιχων σημείων σχετίζονται μέσω της επιπολικής ευθείας, η οποία καθορίζεται από τη θέση των καμερών. Έτσι χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό κοινών σημείων, μπορούμε να αυξήσουμε την ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης κάθε φωτομηχανή.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για το σκοπό αυτό. Ο πιο γνωστός και σχεδόν παρόμοιος με τον αλγόριθμο RANSAC, είναι ο αλγόριθμος των 8 σημείων, ο οποίος απαιτεί 8 κοινά σημεία στις 2 εικόνες, με δεδομένο ότι αυτά δεν περιέχουν θόρυβο.

Ο αλγόριθμος αυτός, είναι εύκολος στην εφαρμογή καθώς είναι γραμμικός, αλλά δεν αποφέρει και τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε σύγκριση με άλλους. Αυτό δεν σημαίνει πως μας δίνει άχρηστα αποτελέσματα, αλλά συνήθως τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές, σε πιο εξελιγμένους αλγόριθμους.

Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος λειτουργεί με 8 ή περισσότερες επιπολικές ευθείες b_j (ουσιαστικά με τους περιορισμούς πάνω σε αυτές), οι οποίες βρίσκονται στον πίνακα $B = [b_1, \dots, b_n]^T, n \geq 8$.

Από την (1.12) έχουμε ότι: $B \cdot f = 0$ (1.13)

Σε περίπτωση που υπάρχει θόρυβος, δεν μπορεί να επιτευχθεί το παραπάνω. Έτσι, η f και ως εκ τούτου η F , βρίσκεται μέσω:

$$\min_f \|B \cdot f\|_2^2 = \min_f f^T B^T B \cdot f, \text{ όπου } \|f\|_2^2 = 1 \quad (1.14)$$

1.4. Γεωμετρία Πολλών Διαφορετικών Λήψεων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στην εύρεση της γεωμετρίας έχοντας μόνο 2 λήψεις του ίδιου αντικειμένου. Είναι αναγκαίο να μελετήσουμε τι γίνεται σε περίπτωση που έχουμε περισσότερες από 2 λήψεις του ίδιου αντικειμένου.

Η περίπτωση αυτή, θα επιλυθεί βρίσκοντας τη γεωμετρία P_j και την κίνηση R_i, t_i , που ταιριάζουν καλύτερα στα δεδομένα p_j , δεδομένου του μοντέλου της κάμερας. Πιο τυπικά, μπορεί να εκφραστεί ως $i \in [1..m]$ οι διαφορετικές λήψεις και $j \in [1..n]$ τα κοινά σημεία μεταξύ των διαφορετικών λήψεων

που περιγράφουν το στερεό σώμα, βάσει οποίων βρίσκουμε τα P_j , R_i και t_i τα οποία ελαχιστοποιούν την:

$$\min_{P_j, R_i, t_i} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|s_{ij} p_{ij} - A_i (R_i R_j + t_i)\|^2, \quad (1.15)$$

όταν δίνεται ο πίνακας βαθμονόμησης A_i .

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα, προκύπτει χρησιμοποιώντας έναν μη γραμμικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος σε αυτήν την περίπτωση, είναι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παραμέτρων του Levenberg – Marquardt (LM). Ο αλγόριθμος αυτός, είναι μια επαναληπτική τεχνική που εντοπίζει το ελάχιστο μιας συνάρτησης πολλαπλών μεταβλητών, που είναι εκφρασμένη ως άθροισμα τετραγώνων μη-γραμμικών πραγματικών συναρτήσεων. (Πρινόπουλος, 2009). Για καλύτερα αποτελέσματα, απαιτείται η χρήση αρχικών τιμών.

1.5. Πυκνή Συνταύτιση Σημείων (Dense Matching)

Η κατασκευή ενός υψηλής ποιότητας και αρκετά ρεαλιστικού 3D μοντέλου αντικειμένου, είναι πιθανή μόνο εάν δημιουργηθεί ένα πυκνό νέφος σημείων, που έχει προκύψει από συνταύτιση σημείων με βάση τις προσανατολισμένες εικόνες (Hirschmuller, 2005).

Οι συμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται, στηρίζονται στη συσχέτιση μικρών παραθύρων κατά μήκος της επιπολικής γραμμής. Αυτό ωστόσο, δίνει εσφαλμένα αποτελέσματα σε περίπτωση που υπάρχουν ασυνέχειες (Remondino, 2008).

Πέρα από την τεχνική περιορισμού πάνω στην επιπολική γραμμή, υπάρχουν και τεχνικές που δουλεύουν με την ιεραρχία των πυραμίδων της εικόνας, την αναγνώριση κοινών σημείων με διαδοχικές αντιστοιχήσεις με βάση την έκταση και με εικόνες βάθους. Όμως, και αυτές οι τεχνικές δεν είναι πάντοτε αποτελεσματικές, ειδικά σε περιπτώσεις με μικρές επικαλύψεις μεταξύ των εικόνων και με μεγάλη ακτινική διαστροφή.

Οι πιο προχωρημένες τεχνικές εστιάζουν στην αντιστοίχιση στέρεο (αντιστοίχιση κοινών σημείων στο επικαλυπτόμενο τμήμα 2 ή περισσότερων εικόνων) με μεγάλη ακρίβεια, που να μην επηρεάζεται από τις έντονες αλλαγές φωτισμού και με σφάλματα της τάξεως κάτω του ενός pixel. Οι πιο γνωστές από αυτές τις τεχνικές, είναι η Dynamic Programming και η Semi Global Matching.

1.6. Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου (Mesh) και Υφής (Texture)

Έχοντας το νέφος των σημείων, ακολουθεί η ένωσή τους με τη δημιουργία τριγώνων, στάδιο όπου εξάγεται η γεωμετρία όλου του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή, είναι γνωστή ως Meshing. Στο τέλος, δημιουργείται η υφή (Texturing) πάνω σε αυτό το μοντέλο. Αυτά είναι και τα τελευταία 2 στάδια της όλης διαδικασίας.

Συνεπώς, η κατασκευή ενός ρεαλιστικού 3D μοντέλου, στηριζόμενου στο υπολογισμένο νέφος σημείων, μπορεί να γίνει με μία από τις τρεις παρακάτω τεχνικές:

- Ογκομετρική απεικόνιση/Στοιχεία όγκου (voxels)
- Απεικόνιση επιφάνειας (polygonal mesh)
- Τεχνικές συμπλήρωσης σημείων (point patching)

Η ογκομετρική απεικόνιση, χρησιμοποιεί τα voxels ως μονάδα μέτρησης στοιχείων. Η χρήση των voxels, ξεκίνησε στις αρχές του 1970 σε ιατρικές εφαρμογές και τώρα πλέον χρησιμοποιείται συχνά και στην επιστήμη του computer vision. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής, είναι ότι απαιτεί τεράστια υπολογιστική δύναμη (RAM και CPU).

Η τεχνική του Polygonal Mesh, είναι η πιο ευέλικτη για την ακριβή τρισδιάστατη παρουσίαση. Ένας από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους για 2D polygonal mesh, είναι ο Delaunay Triangulation. Στους 3D αλγόριθμους, χρησιμοποιείται ο τριγωνισμός τετράεδρων (πολυγώνων), γνωστός και ως Tetrahedralization. Αυτοί οι αλγόριθμοι, χρειάζονται ένα σημείο εκκίνησης (όπως είναι η ύπαρξη του οπτικού μοντέλου), τον υπολογισμό κάποιων πρόσθετων στοιχείων και να διαθέτουν επαρκή αριθμό σημείων. Οι πιο γνωστοί από αυτούς, είναι η Poisson Method και η Ball Pivoting Method.

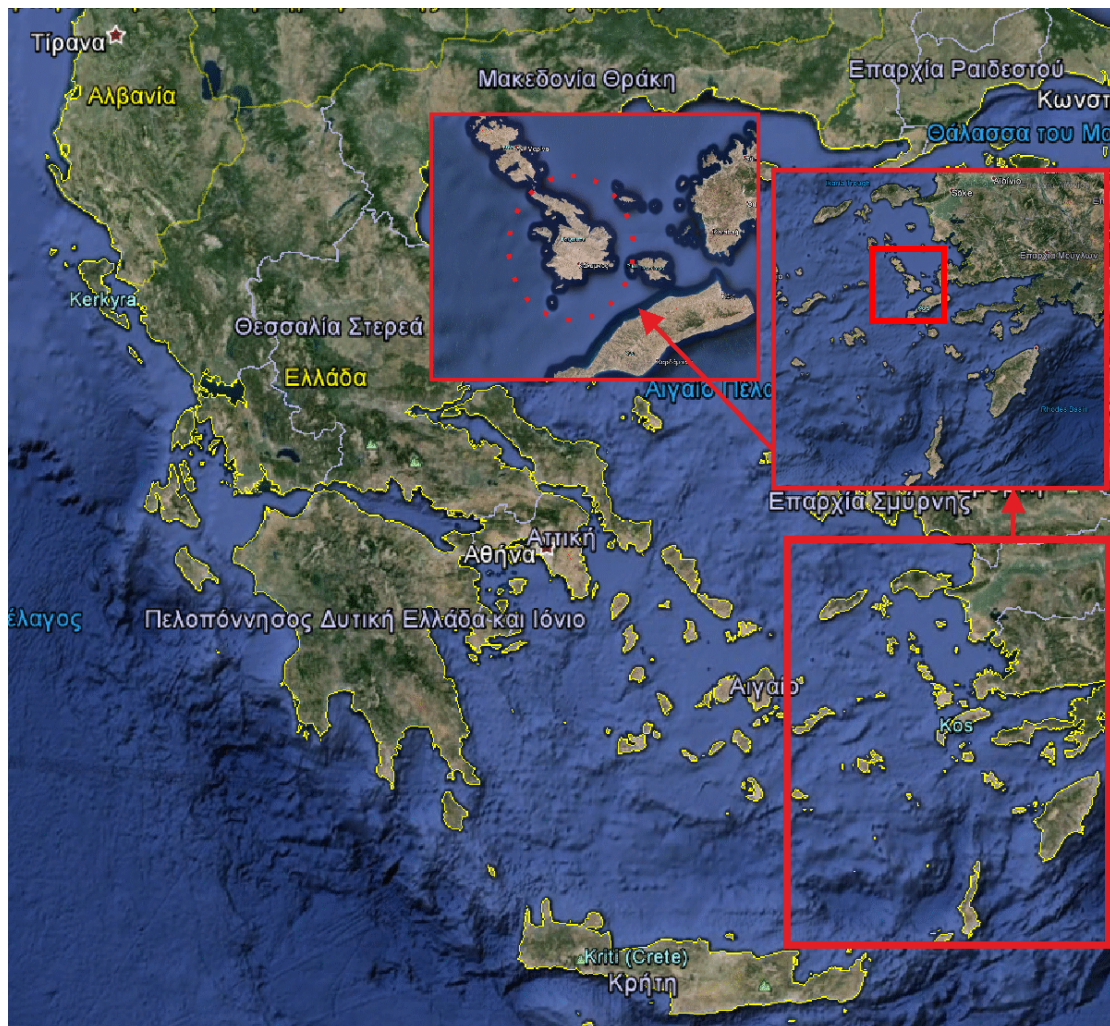
Μετά την εξαγωγή του, το γεωμετρικό 3D μοντέλο πρέπει να συνδυαστεί με μία φωτορεαλιστική απεικόνιση, μέσω της διαδικασίας του Texturing. Γνωρίζοντας τις παραμέτρους του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού, υπολογίζονται οι αντίστοιχες συντεταγμένες της εικόνας, για κάθε κορυφή τριγώνου στην 3D επιφάνεια (όπου τα τρίγωνα δημιουργήθηκαν όπως αναφέρθηκε με τη διαδικασία του Meshing). Έτσι, οι RGB τιμές του κάθε προβαλλόμενου τριγώνου, αντιστοιχίζονται στην επιφάνεια και παράγεται το τελικό φωτορεαλιστικό 3D μοντέλο.

2. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι η τρισδιάστατη αποτύπωση αντικειμένων με χρήση εικόνων από Μη επανδρωμένα Εναέρια Μέσα (UAV). Έχοντας αναλύσει όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα αντικείμενα που αποτυπώθηκαν και ο προγραμματισμός και η εκτέλεση όλων των απαραίτητων εργασιών πεδίου για τη λήψη των απαραίτητων δεδομένων.

2.1. Αντικείμενα Αποτύπωσης

Επιλέχθηκε να γίνει εφαρμογή της περιγραφείσας τεχνικής 3D αποτύπωσης, σε δύο διαφορετικά αντικείμενα, ένα μνημείο πολιτιστικής κληρονομιάς και μια αστική περιοχή, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τα πεδία εφαρμογής. Και τα δύο αντικείμενα, βρίσκονται στη Νήσο Κάλυμνο, του Νομού Δωδεκανήσου.



Εικόνα 9: Η Νήσος Κάλυμνος (ΠΗΓΗ: Google Earth)

2.1.1. Το Κάστρο της Χρυσοχεριάς

Το αρχαιολογικό μνημείο προς αποτύπωση, είναι το Κάστρο της Χρυσοχεριάς, στην περιοχή της Καλυμνιάς. Η έκταση αποτύπωσης, είναι

περίπου 70μ. x 110μ., ενώ έχει μεγάλη υψομετρική διαφορά μεταξύ της βάσης του βουνού και του υψηλότερου σημείου στο κάστρο (~ 25 μ.).



Εικόνα 10: Η θέση του κάστρου στο νησί (ΠΗΓΗ: Google Earth)

Ιστορικά στοιχεία του κάστρου

Το Κάστρο Χρυσοχεριάς ή Πέρα κάστρο, είναι Φράγκικο κάστρο της Καλύμνου ανάμεσα στην Πόθια και την Χώρα. Οφείλει το όνομα του στον ναό της Παναγίας της Χρυσοχεριάς που βρίσκεται στο εσωτερικό του και υπήρχε πριν την κατασκευή του. Το κάστρο έχει δύο πύργους και δύο πύλες και προτείχισμα. Το κάστρο είναι γνωστό για τους τρεις ανεμόμυλους, που διασώζονται και σήμερα έξω από το ανατολικό του τείχος.

Στην θέση του κάστρου έχουν βρεθεί ίχνη συνεχούς κατοίκησης από την νεολιθική εποχή. Πριν την κατασκευή του κάστρου στην θέση υπήρχε αρχαίος ναός, που τμήματα του είναι εντοιχισμένα στα τείχη του. Πάνω από την ανατολική του πύλη υπάρχουν τα οικόσημα του Γκουερίνι και άλλων διοικητών της νήσου.

Το κάστρο χτίστηκε τον 15ο αιώνα από τον ιππότη διοικητή Φαντίνο Γκουερίνι με εντολή του Μεγάλου μαγίστρου των Ιωαννιτών ιπποτών της Ρόδου Ζαν ντε Λαστίκ που ήθελε να οχυρώσει για προστασία όλα τα νησιά που ανήκαν στο τάγμα. Ο Γκουερίνι, επειδή για την άμυνα του νησιού υπήρχε ήδη το Μεγάλο κάστρο, θέλησε να φτιάξει ένα κάστρο ιδιοκτησίας του με υποχρεωτική εργασία των κατοίκων. Οι κάτοικοι αντέδρασαν και αρνήθηκαν, τότε ο Γκουερίνι τους παρέπεμψε σε δίκη όπου δικαιώθηκε ο ίδιος, έτσι ξεκίνησε το χτίσιμο του κάστρου της Χρυσοχεριάς.

Το κάστρο εγκαταλείφθηκε πολύ γρήγορα, στα μέσα του 15ου αιώνα μην μπορώντας να αντιμετωπίσει τις επιδρομές των Οθωμανών κυρίως πειρατών. (Κουτελλάς, 2000)



Εικόνα 11: Το Κάστρο της Χρυσοχεριάς (ΠΗΓΗ: Προσωπικό υλικό)

2.1.2. Αστική περιοχή

Το δεύτερο αντικείμενο προς αποτύπωση, είναι η αποτύπωση μιας αστικής περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια κατοικία μαζί με όλο το οικόπεδό της, το οποίο είχε αρκετά πυκνά δέντρα, αλλά και μεγάλες υψομετρικές διαφορές. Η κατοικία βρίσκεται στην περιοχή του Πανόρμου και το οικόπεδο έχει έκταση περίπου 50μ x 30μ.



Εικόνα 12: Η θέση της κατοικίας στο νησί (ΠΗΓΗ: Google Earth)



Εικόνα 13: Η κατοικία προς αποτύπωση (ΠΗΓΗ: Προσωπικό υλικό)

2.2. Μέθοδος Αποτύπωσης

Οι δύο αποτυπώσεις, έγιναν με τη χρήση αεροφωτογραφιών. Η απόκτηση των αεροφωτογραφιών, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα Drone/UAV (μη επανδρωμένο αυτόνομο πτητικό μέσο). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το Inspire 1 της εταιρίας DJI.



Εικόνα 14: Το DJI Inspire 1

(ΠΗΓΗ: <http://myfirstdrone.bluedogmedia1.netdna-cdn.com/>)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

Μοντέλο	Inspire 1
Βάρος με μπαταρία	2935 γρ.
Έλικες	4
Μέγιστη ταχύτητα	22 μέτρα/δευτερόλεπτο
Κάμερα	X3 FC350
Pixels	12,4 εκατομμύρια
Μέγιστη ανάλυση	4000 x 3000
FOV	94°
CMOS	Sony EXMOR 1/2.3"
Φακός	3.61 mm
Αυτονομία πτήσης	15 λεπτά

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά DJI Inspire 1

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά προκύπτει ότι οι πραγματικές διαστάσεις του αισθητήρα είναι 6,17mm x 4,55mm. Άρα, στη μέγιστη ανάλυση 4000x3000 pixels, το κάθε pixel έχει διαστάσεις 1,54μm. Δεν δίνονται σχετικές λεπτομέρειες από τον κατασκευαστή (καθώς δεν αποτελεί ένα καθαρά τοπογραφικό UAV), αλλά πιθανολογείται ότι η μέγιστη ανάλυση δεν αφορά σε αριθμός 'πραγματικών' pixels, αλλά προκύπτει από διαχωρισμό μέσω λογισμικού του κάθε πραγματικού pixel σε 4. Αυτό συνεπάγεται πως το 'πραγματικό' pixel έχει διαστάσεις: 4 x 1,54μm = 6,16μm, μέγεθος ρεαλιστικό. Σε αυτή την περίπτωση η κάμερα έχει πραγματικά/ενεργά 3MP.

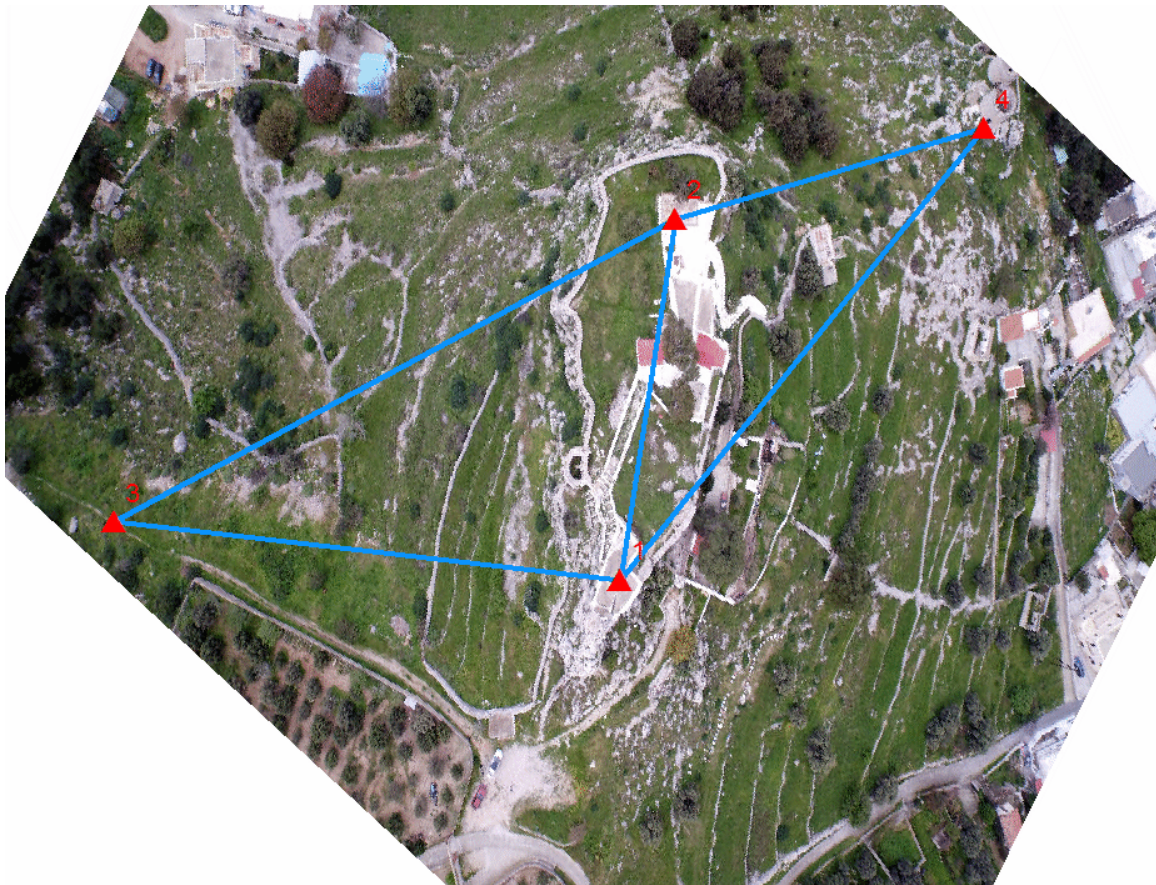
2.3. Μέτρηση Οδεύσεων

Πριν γίνει οποιαδήποτε λήψη αεροφωτογραφιών, ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση και μέτρηση φωτοσταθερών σημείων. Αφενός για την εκτίμηση της ακρίβειας του τελικού μοντέλου, αφετέρου για τη δυνατότητα ένταξης του στο κρατικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87.

Στο κάστρο της Χρυσοχεριάς, η όδευση που ιδρύθηκε για την μετέπειτα μέτρηση των φωτοσταθερών, είχε εξάρτηση από το ΕΓΣΑ '87. Αντιθέτως, στο δεύτερο πεδίο εφαρμογής, την κατοικία, μετρήθηκαν μόνο αποστάσεις, ώστε να δοθεί σωστή κλίμακα το μοντέλο.

2.3.1. Όδευση του κάστρου της Χρυσοχεριάς

Αρχικά σκοπός ήταν να ιδρυθεί μια κλειστή όδευση, ώστε να έχουμε καλύτερο έλεγχο των ακριβειών. Ωστόσο επιλέχθηκαν σημεία με πολύ καλές αμοιβαίες ορατότητες μεταξύ τους και μπορούσε πλέον να γίνει και τριγωνισμός. Παρακάτω φαίνονται οι 4 στάσεις που ιδρύθηκαν και οι μεταξύ τους ορατότητες.



Εικόνα 15: Όδευση κάστρου Χρυσοχεριάς

Για να γίνει η ένταξη της όδευσης στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, επιλέχθηκαν οι στάσεις 1 και 2 να μετρηθούν με GPS. Το GPS που χρησιμοποιήθηκε, είναι το Trimble 4600LS (L1). Ο σχετικός εντοπισμός, πραγματοποιήθηκε σε σχέση με υπάρχον τριγωνομετρικό σημείο ενταγμένο στο ΕΓΣΑ '87. Επίσης λόγω μη ύπαρξης κοντινών refer, χρησιμοποιήθηκαν

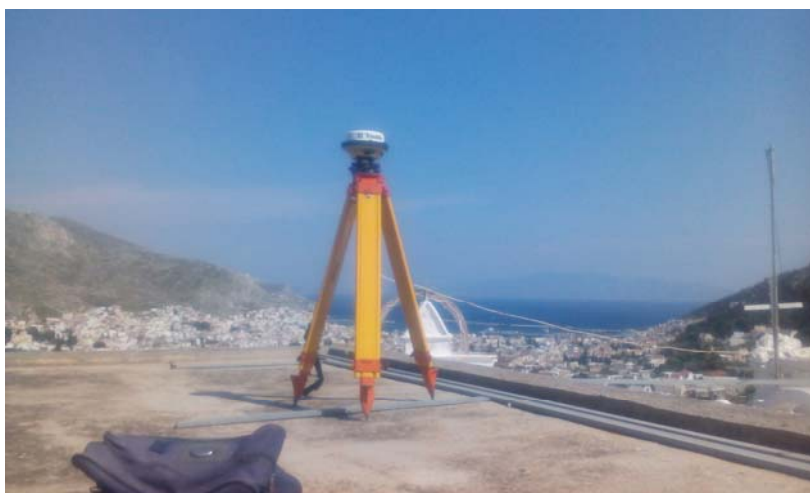
τα υψόμετρα που δόθηκαν από το σχετικό εντοπισμό. Τα υψόμετρα των υπόλοιπων 2 κορυφών, υπολογίστηκαν στη συνέχεια με τριγωνομετρική υψομετρία.

Οι 2 βάσεις που μετρήθηκαν (T18-1 και T18-2), ήταν της τάξης του 1,5χλμ. Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

ΣΗΜΕΙΟ	X	Y	Z	Οριζόντια ακρίβεια (μ.)	Κατακόρυφη ακρίβεια (μ.)
T18	765563,145	4093228,861	8,557		
1	764292,497	4093673,093	98,825	0,007	0,013
2	764298,293	4093726,233	91,396	0,009	0,013

Πίνακας 2: Συντεταγμένες των στάσεων 1 και 2

Προφανώς η ακρίβεια του χρησιμοποιηθέντος τριγωνομετρικού σημείου, ήταν καλύτερη από τις ακρίβειες που έδωσε η μέτρηση των 2 αυτών βάσεων.



Εικόνα 16: Μετρήσεις στο πεδίο με GPS

Στη συνέχεια ακολούθησε η μέτρηση της όδευσης (2 περιόδους σε κάθε μέτρηση), με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό. Χρησιμοποιήθηκε ο Topcon GTS-701, με την ακρίβεια των $\pm 3^{\text{cc}}$ στις γωνίες και με $\pm(2\text{mm}\pm 2\text{ppm})$ όσον αφορά τις αποστάσεις.

Έχοντας τις τελικές γωνίες και αποστάσεις, πραγματοποιήθηκε τριγωνισμός με τη Μέθοδο Ελάχιστων Τετραγώνων (MET). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό NETIST, από τη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΑΠΘ. Για να μην υπάρχουν παραμορφώσεις λόγω του συντελεστή μηκών κ (όπου για την περιοχή είναι: $\kappa=1,00046$), η όδευση επιλύθηκε σε ένα ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς, το οποίο ήταν προσανατολισμένο στο ΕΓΣΑ '87.

Πιο συγκεκριμένα, η κορυφή 1 αρχικά θεωρήθηκε ως σταθερή. Γνωρίζοντας τη γωνία διεύθυνσης α_{12} και την οριζόντια απόσταση 1-2, υπολογίστηκαν οι νέες συντεταγμένες της κορυφής 2, σε αυθαίρετο σύστημα (χωρίς να υπεισέρχεται δηλαδή ο συντελεστής κ στα μήκη). Το σύστημα αυτό ωστόσο, είναι απόλυτα προσανατολισμένο στο ΕΓΣΑ '87, ως

προς τις κορυφές 1-2. Αυτό συμβαίνει γιατί μια εγκάρσια μερκατορική προβολή (όπως είναι και το προβολικό σύστημα του ΕΓΣΑ '87) διατηρεί αναλλοίωτα τα αζιμούθια.

Έχοντας τις αρχικές συντεταγμένες της κορυφής 1 που δόθηκαν από το σχετικό εντοπισμό και τις νέες συντεταγμένες της κορυφής 2, πραγματοποιήθηκε ο τριγωνισμός θεωρώντας σταθερές αυτές τις δύο κορυφές.



Εικόνα 17: Μετρήσεις στο πεδίο με GTS

Πριν πραγματοποιηθεί η συνόρθωση ωστόσο, ελέγχθηκαν οι γωνιακές και γραμμικές διορθώσεις, οι οποίες ήταν μικρότερες από τις προδιαγραφές (δηλαδή εντός των ορίων) βάσει του Π.Δ. 696/74.

Τα αποτελέσματα της συνόρθωσης του δικτύου, ήταν:

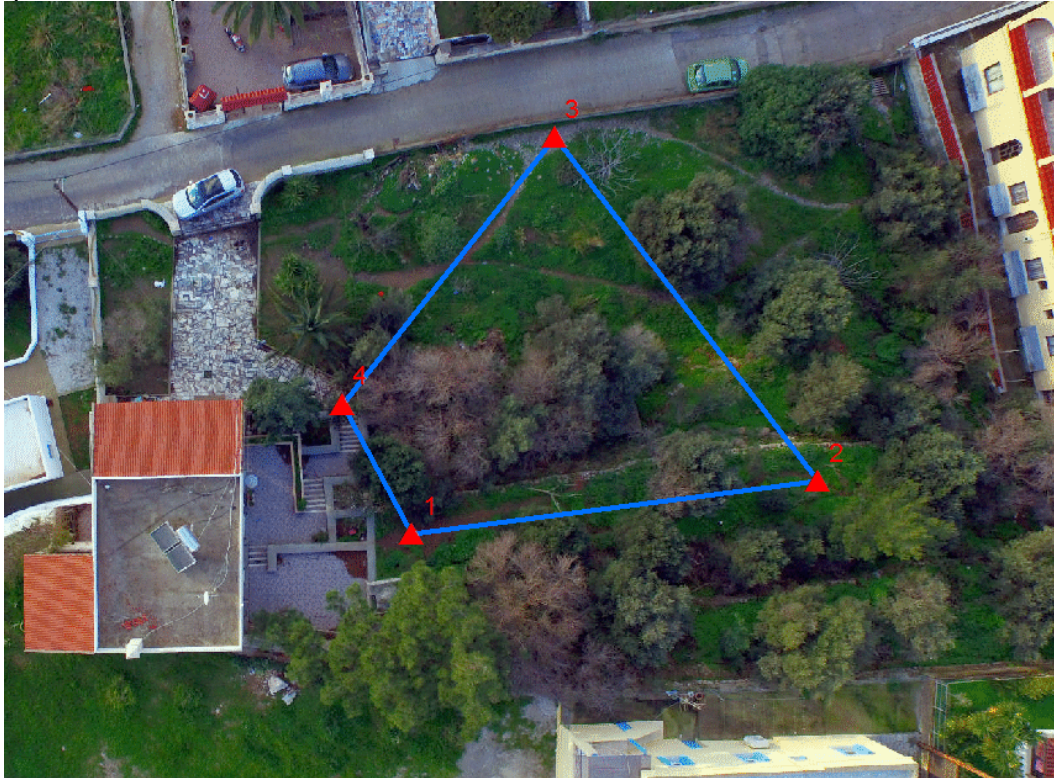
Στάση	X	Y	Z
1	764292,497	4093673,093	95,825
2	764298,290	4093726,216	91,396
3	764181,338	4093664,061	79,259
4	764377,909	4093758,025	62,414

Πίνακας 3: Συντεταγμένες κορυφών της όδευσης του κάστρου της Χρυσοχειριάς

2.3.2. Μετρήσεις στην περιοχή της κατοικίας

Στην προκειμένη περίπτωση, δεν υπήρχε κάποιο ιδιαίτερο νόημα στο να ενταχθεί το μοντέλο στο ΕΓΣΑ '87. Οπότε μετρήθηκαν μόνο αποστάσεις, ώστε να υπάρχει η σωστή κλίμακα και να μπορεί να ενταχθεί σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς.

Οι 4 κορυφές οι οποίες επιλέχθηκαν και μετρήθηκαν οι μεταξύ τους αποστάσεις, θα χρησιμοποιούνται για την μετέπειτα μέτρηση των φωτοσταθερών.



Εικόνα 18: Οι κορυφές που ιδρύθηκαν στην κατοικία

Οι αποστάσεις που μετρήθηκαν, δίνονται συνολικά μαζί και με τα μετρημένα φωτοσταθερά, στην ενότητα 2.5 (Πίνακας 7).

2.4. Προγραμματισμός Πτήσεων

Πριν την τελική λήψη των επιθυμητών αεροφωτογραφιών, προηγείται πάντοτε ένας προγραμματισμός πτήσης. Αρχικά δεν υπήρχαν περιορισμοί ως προς τη λειτουργικότητα (τουλάχιστον ως προς απαιτήσεις που υπήρχαν) και ως προς την αυτονομία πτήσης (υπήρχαν αρκετές ανταλλακτικές μπαταρίες). Πέρα από αυτούς τους περιορισμούς, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι απαιτήσεις/περιορισμοί του λογισμικού SfM που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.

Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται να χρησιμοποιηθούν 2 λογισμικά SfM. Το Agisoft Photoscan (εμπορικό λογισμικό) και το VisualSfM (ελεύθερο στο διαδίκτυο). Όσον αφορά το VisualSfM, δεν βρέθηκαν συγκεκριμένες απαιτήσεις ή υποδείξεις για τον προγραμματισμό των λήψεων. Οπότε ακολουθήθηκαν οι υποδείξεις που δίνονται από το manual του Agisoft Photoscan, για τον προγραμματισμό εναέριων λήψεων. Τα βασικά στοιχεία είναι:

- 80% κατά μήκος επικάλυψη
- 60% κατά πλάτος επικάλυψη
- Επιλογή σταθερού και του χαμηλότερου δυνατού ISO στην κάμερα
- Τουλάχιστον 10 φωτοσταθερά

Βάσει των στοιχείων της κάμερας λοιπόν, αναλύθηκαν όλα τα πιθανά ύψη πτήσης, ώστε να καταλήξουμε στο αποδοτικότερο.

Η - Ύψος πτήσης (m)	c - Φακός (m)	H/c	κ - Κλίμακα	Διαστάσεις στο έδαφος X (m)	Διαστάσεις στο έδαφος Y (m)	Μέγεθος ρικελ στο έδαφος (m)
5	0,00361	1385,0416	1000	8,546	6,302	0,002
10	0,00361	2770,0831	2500	17,091	12,604	0,004
15	0,00361	4155,1247	4000	25,637	18,906	0,006
20	0,00361	5540,1662	5500	34,183	25,208	0,009
25	0,00361	6925,2078	6500	42,729	31,510	0,011
30	0,00361	8310,2493	8000	51,274	37,812	0,013
35	0,00361	9695,2909	9500	59,820	44,114	0,015
40	0,00361	11080,332	11000	68,366	50,416	0,017
45	0,00361	12465,374	12000	76,911	56,717	0,019
50	0,00361	13850,416	13500	85,457	63,019	0,021
55	0,00361	15235,457	15000	94,003	69,321	0,024
60	0,00361	16620,499	16500	102,548	75,623	0,026
65	0,00361	18005,54	18000	111,094	81,925	0,028
70	0,00361	19390,582	19000	119,640	88,227	0,030
75	0,00361	20775,623	20500	128,186	94,529	0,032
80	0,00361	22160,665	22000	136,731	100,831	0,034
85	0,00361	23545,706	23500	145,277	107,133	0,036
90	0,00361	24930,748	24500	153,823	113,435	0,038
95	0,00361	26315,789	26000	162,368	119,737	0,041
100	0,00361	27700,831	27500	170,914	126,039	0,043

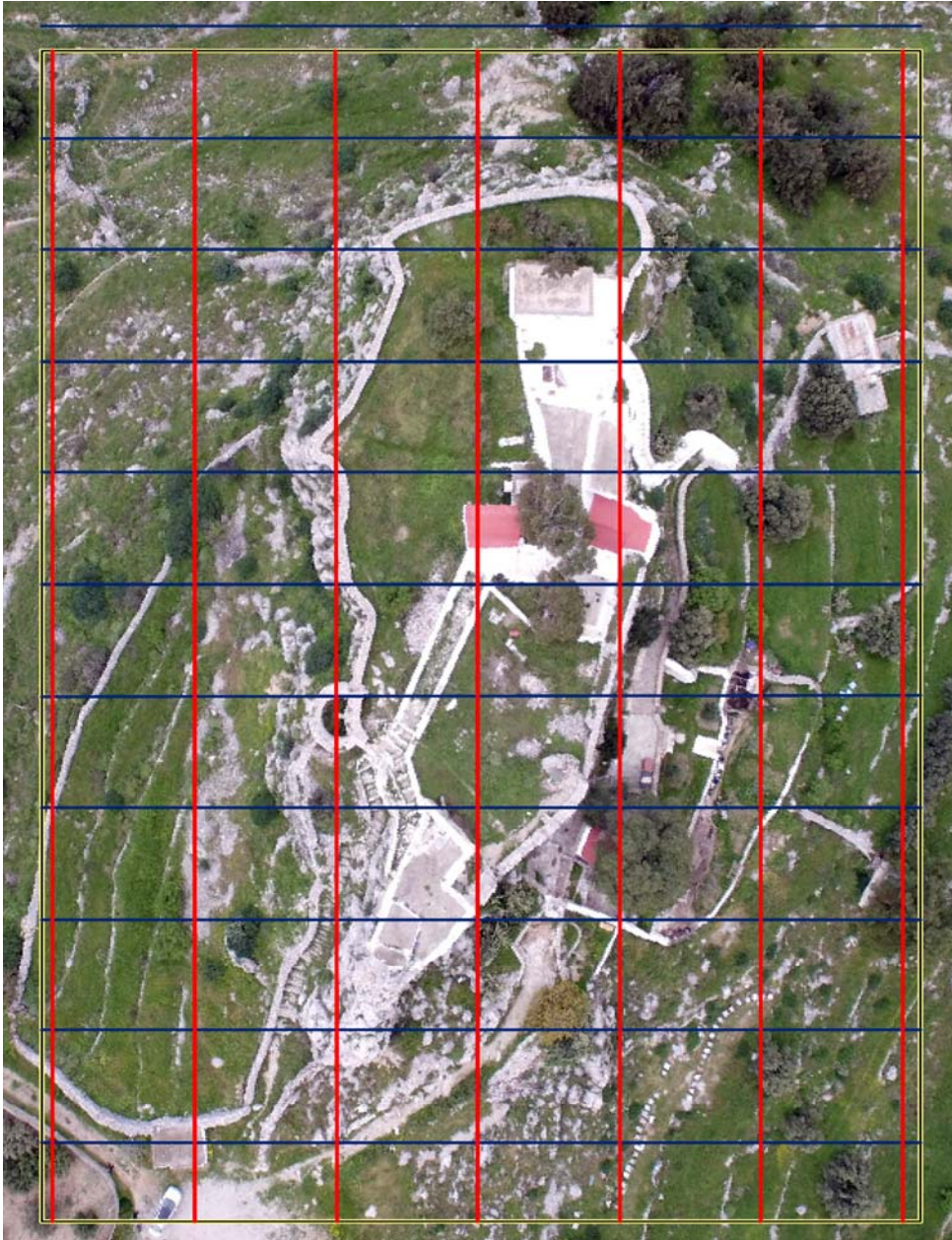
Πίνακας 4: Σύγκριση διαφορετικών υψών πτήσης

Σύμφωνα με τις παραπάνω επικαλύψεις που απαιτούνταν αλλά και με τις ακρίβειες που έδινε η όδευση (όσον αφορά το κάστρο της Χρυσοχειράς), υπολογίστηκε ο αριθμός των απαιτούμενων αεροφωτογραφιών σε κάθε περίπτωση και επιλέχθηκε ο αποδοτικότερος συνδυασμός σε σχέση και με την τελική ακρίβεια.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ως ύψος πτήσης τα 25 μέτρα, με 1,1 x 1,1 εκ. ως μέγεθος εδαφοψηφίδας (πραγματικό μέγεθος ρικελ στο έδαφος). Γνωρίζοντας λοιπόν το ύψος πτήσης και τις επικαλύψεις, υπολογίστηκε ο αριθμός λωρίδων και συνολικών φωτογραφιών. Οι λωρίδες θα είχαν διεύθυνση Βορρά-Νότο, ενώ θα υπήρχαν και κάθετες λωρίδες πτήσης με διεύθυνση Ανατολή-Δύση.

Διεύθυνση	B-N	A-Δ
Κλίμακα	6500	6500
Μήκος λωρίδας στο έδαφος (m)	29,575	29,575
Πλάτος λωρίδας στο έδαφος (m)	40,105	40,105
% κατά μήκος επικάλυψη	80	80
% κατά πλάτος επικάλυψη	60	60
B (βάση)	5,915	5,915
A (λωρίδες)	11,83	11,83
Μηκος αντικειμένου (m)	120	70
Πλάτος αντικειμένου (m)	70	120
Ανά λωρίδα	22	14
Λωρίδες	7	11
ΣΥΝΟΛΟ	154	154
	308	

Πίνακας 5: Υπολογισμός απαιτούμενων αεροφωτογραφιών



Εικόνα 19: Προγραμματισμός πτήσης για το κάστρο της Χρυσοχεριάς

Επίσης προγραμματίστηκαν να ληφθούν και πλάγιες φωτογραφίες, οι οποίες θα είχαν μια πολύ μικρή κλίση ω , με πλάγια επικάλυψη 80%. Δυστυχώς το DJI Inspire One δεν έχει προς το παρόν κάποιο λογισμικό στο οποίο να μπορείς να σχεδιάσεις την προγραμματισμένη πτήση (όπως συμβαίνει με κάποια άλλα μοντέλα της DJI), οπότε η πτήση θα γινόταν εξ ολοκλήρου χειροκίνητα. Οι επικαλύψεις, λοιπόν, θα ήταν κατά προσέγγιση. Αυτός είναι και ένας σημαντικός λόγος, για τον οποίο δεν επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν κλασικές φωτογραμμετρικές μέθοδοι, αλλά προτιμήθηκε το SfM.

Από το ίδιο ύψος πτήσης και με παρόμοιο τρόπο, έγινε και ο προγραμματισμός πτήσης για την αεροφωτογράφιση της περιοχής της κατοικίας.

2.5. Μέτρηση Φωτοσταθερών

Ενώ οι οδεύσεις ιδρύθηκαν μερικές μέρες πριν τις τελικές πτήσεις, τα φωτοσταθερά έπρεπε να τοποθετηθούν και να μετρηθούν την ημέρα της κάθε πτήσης, προφανώς για να μην μετακινηθούν από τρίτους.

Γνωρίζοντας το ύψος και το υψόμετρο πτήσης και στις δύο περιπτώσεις, και επομένως το μέγεθος ριχελ στο έδαφος (περίπου 1 εκατοστό), επιλέχθηκε και το αντίστοιχο μέγεθος των φωτοσταθερών που θα χρησιμοποιούνταν. Επιλέχθηκαν στρογγυλές επιφάνειες διαμέτρου 12 εκατοστών (συγκεκριμένα ήταν CD), πάνω στις οποίες κολλήθηκαν αυτοκόλλητα με την ανάλογη σήμανση. Για τη συγκεκριμένη κλίμακα, η διάμετρος των 12 εκατοστών είναι αρκετά μεγάλη, αλλά ήταν πιο εύκολη η κατασκευή των φωτοσταθερών.



Εικόνα 20: Φωτοσταθερό σημείο

Τα φωτοσταθερά για το κάστρο της Χρυσοχεριάς ήταν συνολικά 17, δύο εκ των οποίων ήταν οι κορυφές της όδευσης. Οι συντεταγμένες τους είναι:

ΣΗΜΕΙΑ	X	Y	Z
S1	764292,497	4093673,093	95,825
S2	764298,290	4093726,216	91,396
37	764283,031	4093668,123	86,215
39	764272,868	4093644,367	81,917
40	764280,870	4093663,144	84,384
41	764278,861	4093651,359	81,316
42	764273,568	4093651,979	80,830
44	764288,983	4093687,341	91,419
45	764277,450	4093710,810	90,780
46	764285,540	4093676,025	89,369
47	764286,676	4093693,139	90,824
48	764282,052	4093701,009	90,124
49	764292,663	4093684,723	95,649
50	764299,585	4093718,589	88,542
51	764305,818	4093705,327	89,285
53	764289,008	4093729,913	89,596
54	764292,328	4093698,019	89,791

Πίνακας 6: Συντεταγμένες φωτοσταθερών σημείων του κάστρου της Χρυσοχεριάς

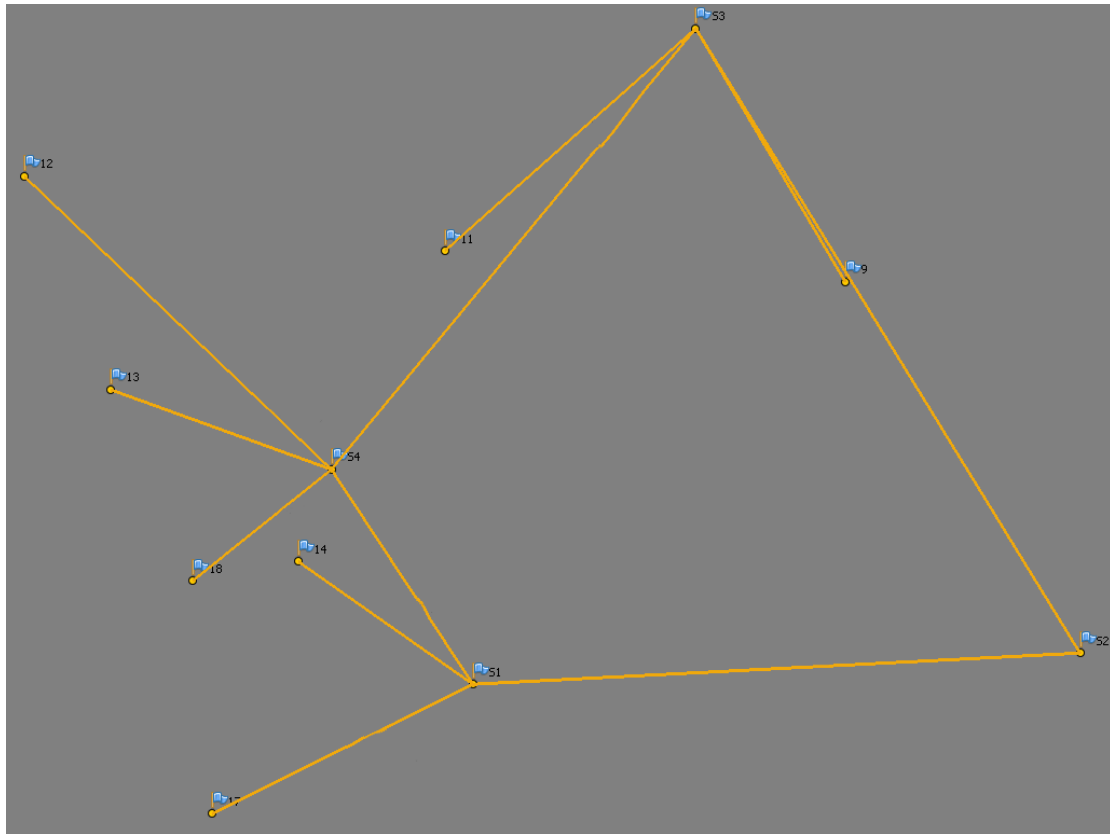


Εικόνα 21: Κατανομή των φωτοσταθερών του κάστρου της Χρυσοχεριάς

Όσον αφορά την κατοικία, μετρήθηκαν μόνο οι (κεκλιμένες) αποστάσεις όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα.

Σημεία	Απόσταση (μ.)
S1-S2	18,443
S1-S4	8,481
S1-14	6,316
S1-17	7,493
S2-S3	24,053
S3-S4	19,706
S3-9	10,021
S3-11	11,950
S4-12	12,578
S4-13	6,778
S4-18	6,158

Πίνακας 7: Αποστάσεις μετρημένων φωτοσταθερών στην κατοικία



Εικόνα 22: Οι μετρημένες αποστάσεις στην κατοικία

2.6. Τελικές Πτήσεις

Οι δύο αεροφωτογραφήσεις, έγιναν σε δύο διαφορετικές μέρες. Επιλέχθηκαν φυσικά μεσημεριανές ώρες (μεταξύ 12 και 3) ώστε ο ήλιος να είναι στο ζενίθ, ενώ επιλέχθηκαν και αυτές οι δύο μέρες να έχουν μερική συννεφιά, ώστε το φως το ηλίου να ανακλά ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια για να μην υπάρχουν σκιές και να μην υπάρχουν "καμένες" φωτογραφίες.

Ωστόσο στην αεροφωτογράφιση του κάστρου της Χρυσοχεριάς, υπήρχε έντονος ανατολικός άνεμος εκείνη την ημέρα. Ενώ λοιπόν η πτήση ξεκίνησε αρχικά με τις λωρίδες διεύθυνσης Βορράς-Νότος, ο ανατολικός άνεμος παρέσερνε αρκετά το drone από την επιθυμητή γραμμή πτήσης και έτσι διακόπηκε η πτήση σε αυτήν τη διεύθυνση. Έτσι οι τελικές αεροφωτογραφίες ήταν πλήρεις στην διεύθυνση Ανατολή-Δύση και περιείχαν ένα μέρος των προγραμματισμένων λωρίδων στη διεύθυνση Βορράς-Νότος. Οι πλάγιες λήψεις, έγιναν χωρίς κανένα περαιτέρω πρόβλημα.

Συνολικά ελήφθησαν 396 αεροφωτογραφίες για το κάστρο της Χρυσοχεριάς και 197 για την κατοικία.

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται αρχικά αναφορά στα υπάρχοντα λογισμικά SfM και τις εφαρμογές για τις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, υπάρχει ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δύο πρακτικών εφαρμογών, από τα δύο λογισμικά που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν

3.1. Ελεύθερα Λογισμικά SfM

Υπάρχει ένα πλήθος ελεύθερων λογισμικών στο διαδίκτυο, που επιλύουν το πρόβλημα του SfM. Παρακάτω συγκεντρώθηκαν τα πιο διαδεδομένα:

- VisualSfM και MeshLab
Το VisualSfM είναι από τα πιο γνωστά ελεύθερα λογισμικά για SfM, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε όλες τις πλατφόρμες (Windows, Linux, Mac). Το βασικό μειονέκτημα, είναι πως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα, καθώς φτάνει μέχρι το στάδιο της δημιουργίας νέφους σημείων. Για τη συνέχεια της επεξεργασίας, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο λογισμικό (συνήθως το MeshLab) για να δημιουργήσει τις επιφάνειες και την φωτορεαλιστική υφή. Πολλές από τις εφαρμογές στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί, αφορούν σε αρχαιολογικούς σκοπούς.
- MeshLab
Το MeshLab έχει ως είσοδο ένα νέφος σημείων και δημιουργεί την επιφάνεια (Meshing) και την υφή. Έχει πολλές δυνατότητες επεξεργασίας της επιφάνειας και ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως σε μικροβιολογία, αρχαιολογία, χειρουργική και οδοντιατρική.
- SURE
Είναι ένα λογισμικό εξαγωγής πυκνωμένου νέφους σημείων, από δοσμένες εικόνες μαζί με τους προσανατολισμούς τους. Συνεπώς λειτουργεί και αυτό, σε συνεργασία με κάποιο άλλο λογισμικό. Χρησιμοποιείται κυρίως για αεροφωτογραφήσεις και αρχαιολογικούς σκοπούς, που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια.
- Bundler
Το λογισμικό Bundler δέχεται εικόνες ως είσοδο και εξάγει ένα αραιό νέφος σημείων. Το νέφος αυτό, μπορεί να πυκνωθεί χρησιμοποιώντας κάποιο άλλο λογισμικό (συνήθως το PMVS).
- PMVS
Το PMVS είναι ένα λογισμικό παρόμοιο με το SURE. Δηλαδή παίρνει τις εικόνες μαζί με τους προσανατολισμούς τους και παράγει ένα νέφος σημείων. Μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά με το VisualSfM και το Bundler.

- Autodesk 123D Catch
Είναι ένα πολύ απλό στη λειτουργία λογισμικό, που έχει όλες τις διαδικασίες του αυτοματοποιημένες. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα επέμβασης στα ενδιάμεσα στάδια δημιουργίας του 3D μοντέλου. Απαιτεί σύνδεση internet, καθώς χρησιμοποιεί έναν εξωτερικό server για την εξαγωγή του μοντέλου, γεγονός που σημαίνει ότι δεν επηρεάζεται από τις δυνατότητες του υπολογιστή στον οποίο λειτουργεί.

3.2. Εμπορικά Λογισμικά SfM

Γενικά τα ελεύθερα λογισμικά δεν είναι πλήρη, αλλά το τελικό αποτέλεσμα εξάγεται από τη χρήση 2 τουλάχιστον προγραμμάτων. Εκτός αυτών, όμως, υπάρχουν και τα εμπορικά λογισμικά, τα οποία αποτελούν ολοκληρωμένες σουίτες δημιουργίας 3D μοντέλων.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα εμπορικά λογισμικά είναι το Agisoft Photoscan. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο λογισμικό, που μπορεί να εκτελέσει αυτόνομα όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται για την εξαγωγή του 3D μοντέλου.

Τα μεγάλα πλεονεκτήματα του προγράμματος, είναι η απλότητα της λειτουργίας του, οι καλές τελικές ακρίβειες, οι προηγμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πολύ πυκνού νέφους σημείων, αλλά και η ευκολία στην στόχευση των φωτοσταθερών σημείων.

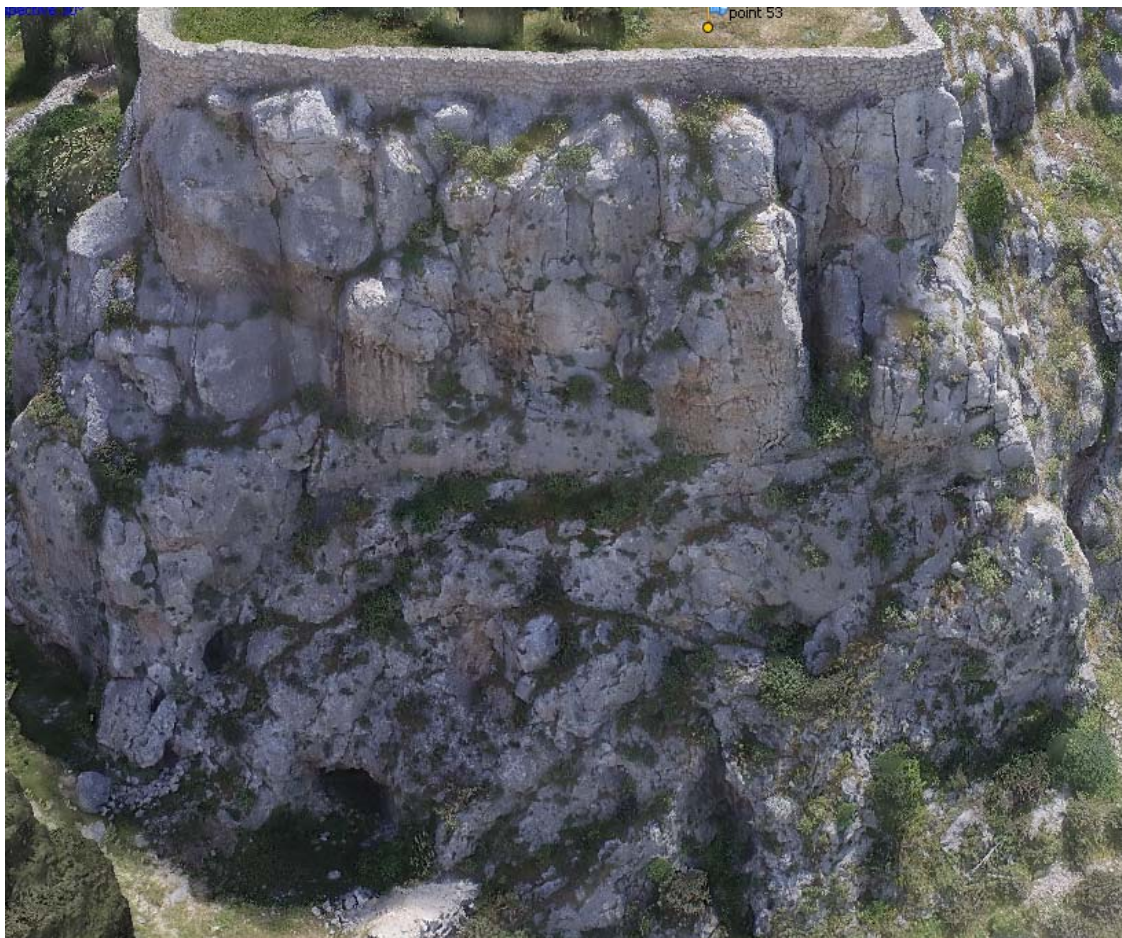
Το μεγαλύτερο αρνητικό, είναι η απαίτηση ενός πραγματικά δυνατού υπολογιστικού συστήματος (κυρίως μνήμης RAM) και ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθούν όλες οι διαδικασίες. Μια μεγάλη αδυναμία που υπάρχει στο λογισμικό επίσης, είναι η αδυναμία εισαγωγής νέφους σημείων στο πρόγραμμα. Ενώ μπορείς να εξάγεις δηλαδή κανονικά το παραγόμενο νέφος σημείων, δεν μπορείς στη συνέχεια να το επεξεργαστείς και να το ξαναεισάγεις στο πρόγραμμα. Πάντως, επισημαίνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής μοντέλου επιφανειών (mesh).

Με χρήση του Photoscan έχει πραγματοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως:

- Μοντέλα κτισμάτων
- Αρχαιολογικά μνημεία
- Αποτυπώσεις πόλεων
- Ανθρώπινα μοντέλα
- Μοντέλα σε 4 διαστάσεις (μοντέλα διαχρονικών μεταβολών)

Ένα, επίσης, ιδιαίτερα διαδεδομένο λογισμικό, είναι το Pix4D. Έχει σχεδόν 3πλάσια εμπορική τιμή σε σχέση με το Agisoft και υπερτερεί στην παραγωγή φωτομωσαϊκών και DEM(Ψηφιακών Μοντέλων Επιφανείας).

Κάποια άλλα εμπορικά λογισμικά που όμως δεν είναι τόσο ευρέως διαδεδομένα (σε σχέση με τον αριθμό των projects που βρέθηκαν πως δημιουργήθηκαν με το κάθε λογισμικό), είναι το iWitnessPRO και το Drone Deploy.



Εικόνα 24: Κοντινή απόψη της Βόρειας πλευράς του κάστρου

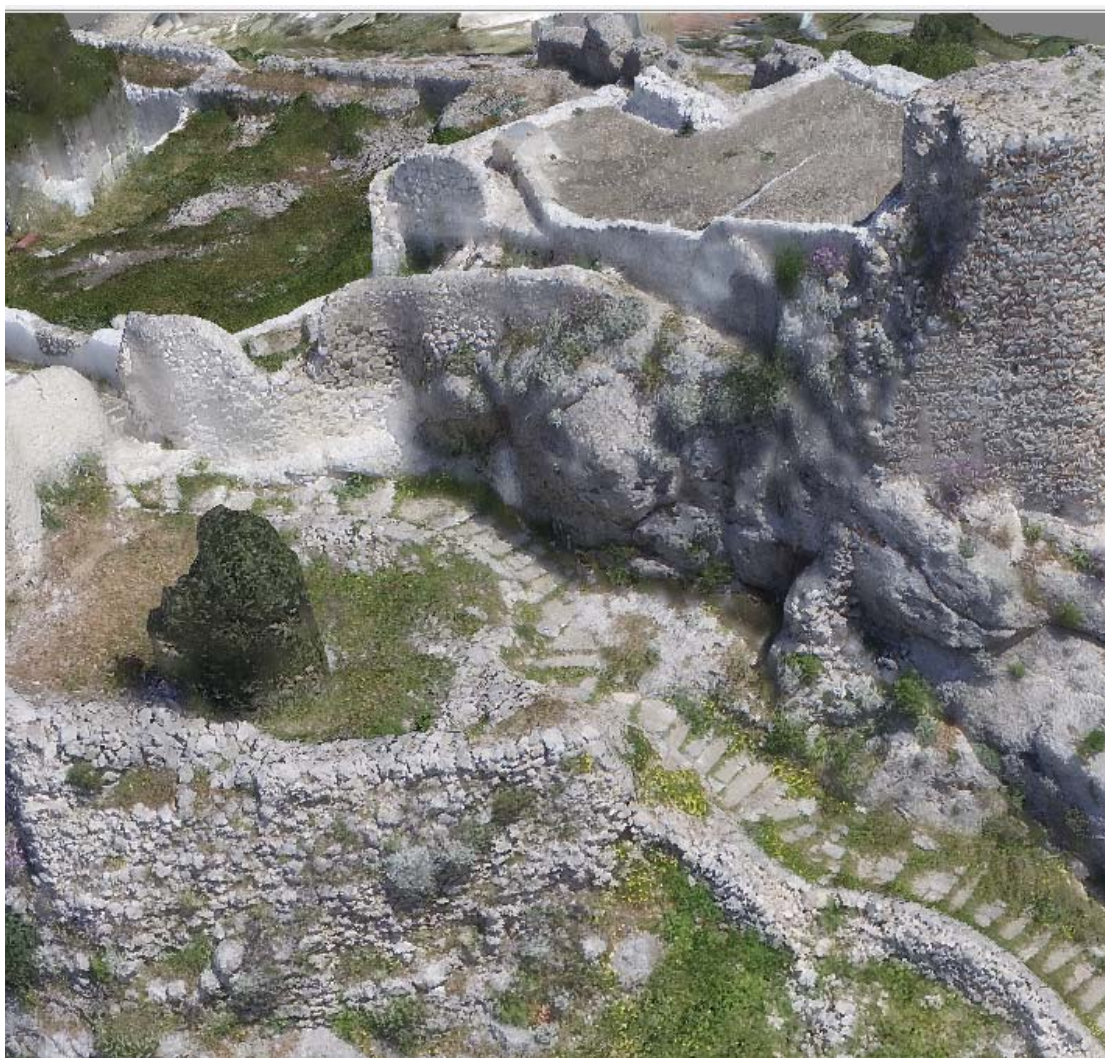
Το μοντέλο οπτικά, ήταν πάρα πολύ καλό. Με εικόνες 1cm/pixel, οι τελικές ακρίβειες ήταν εξίσου καλές. Πιο συγκεκριμένα, της τάξης $\pm 1,5\text{cm}$ οριζοντιογραφικά, $\pm 2\text{cm}$ υψομετρικά και $\pm 3\text{cm}$ στον τρισδιάστατο χώρο. Χρησιμοποιήθηκαν 16 φωτοσταθερά ως σημεία σύνδεσης. Ένα φωτοσταθερό δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου, καθώς πρέπει να υπήρχε κάποιο χονδροειδές λάθος στην μέτρησή του, το οποίο κατέστη δυνατόν να εντοπισθεί.

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	-0.000238	0.006610	0.007030	0.009653	36	0.370
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	-0.019137	-0.008985	-0.006366	0.022079	76	0.384
<input checked="" type="checkbox"/> point 37	-0.018990	0.012910	0.003885	0.023289	57	0.434
<input checked="" type="checkbox"/> point 39	0.021953	-0.031402	0.004291	0.038554	45	0.538
<input checked="" type="checkbox"/> point 40	-0.017342	-0.007410	0.003146	0.019119	75	0.437
<input checked="" type="checkbox"/> point 41	-0.019189	-0.018187	-0.007966	0.027612	72	0.642
<input checked="" type="checkbox"/> point 42	-0.007408	-0.004674	0.001583	0.008901	63	0.676
<input checked="" type="checkbox"/> point 44	0.011217	0.022964	-0.016320	0.030323	67	0.698
<input checked="" type="checkbox"/> point 45	0.029509	0.011262	-0.018692	0.036701	100	0.492
<input type="checkbox"/> point 46	-0.037696	0.145286	0.004500	0.150164	75	0.483
<input checked="" type="checkbox"/> point 47	0.002929	0.010235	-0.013102	0.016882	81	0.465
<input checked="" type="checkbox"/> point 48	0.014602	0.013904	-0.014385	0.024768	98	0.450
<input checked="" type="checkbox"/> point 49	-0.007425	0.005556	-0.019641	0.021720	28	0.345
<input checked="" type="checkbox"/> point 50	0.000971	-0.007627	0.005779	0.009618	96	0.547
<input checked="" type="checkbox"/> point 51	-0.000239	0.014616	-0.008894	0.017111	70	0.421
<input checked="" type="checkbox"/> point 53	0.001072	-0.036593	0.004132	0.036841	81	0.515
<input checked="" type="checkbox"/> point 54	0.007602	0.017212	0.075422	0.077734	96	0.433
Total Error	0.014287	0.016909	0.021502	0.030861		0.505

Πίνακας 8: Ακρίβειες φωτοσταθερών στο κάστρο της Χρυσοχεριάς

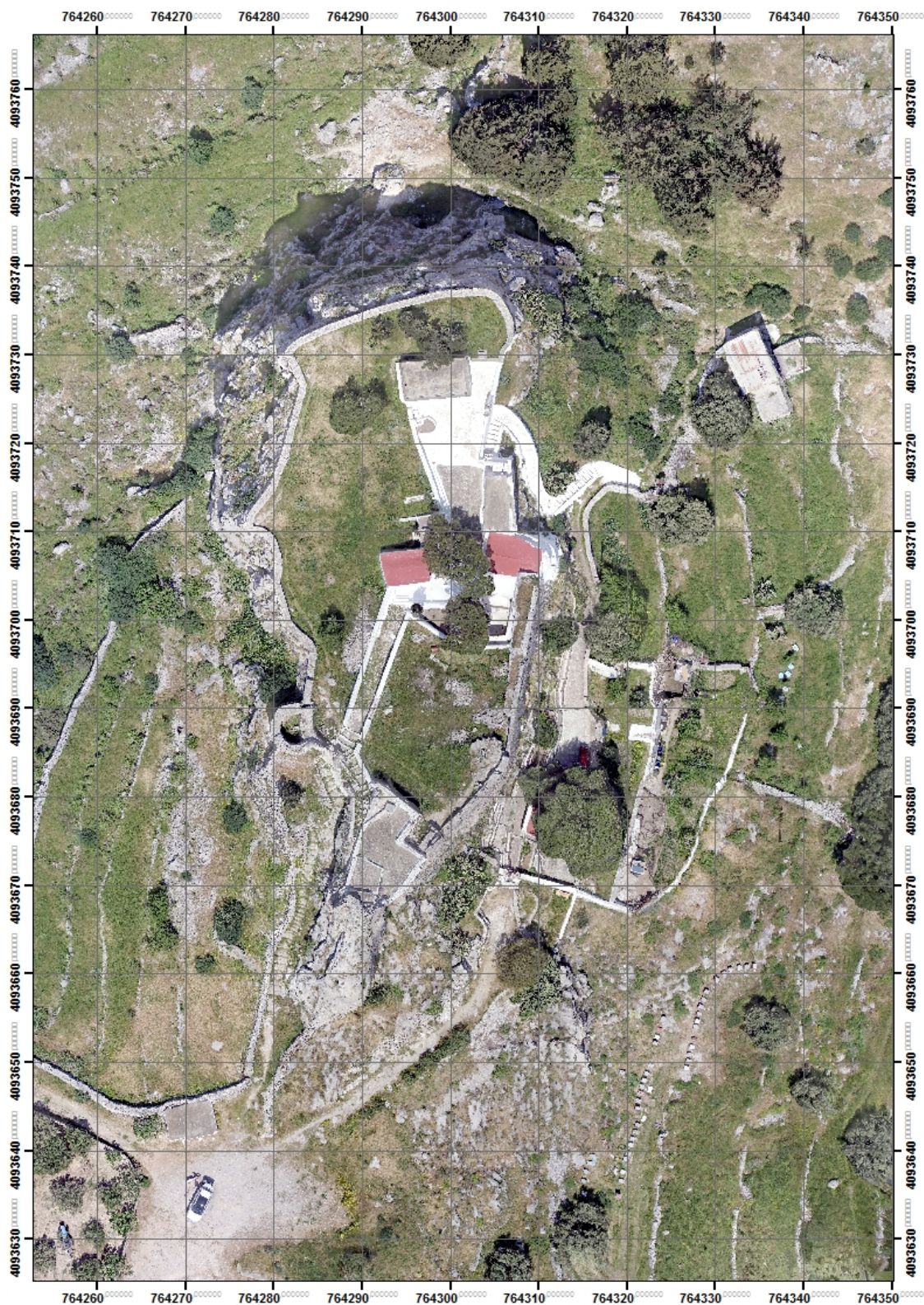


Εικόνα 25: Ανατολική όψη του κάστρου



Εικόνα 26: Κοντινή άποψη του κάστρου

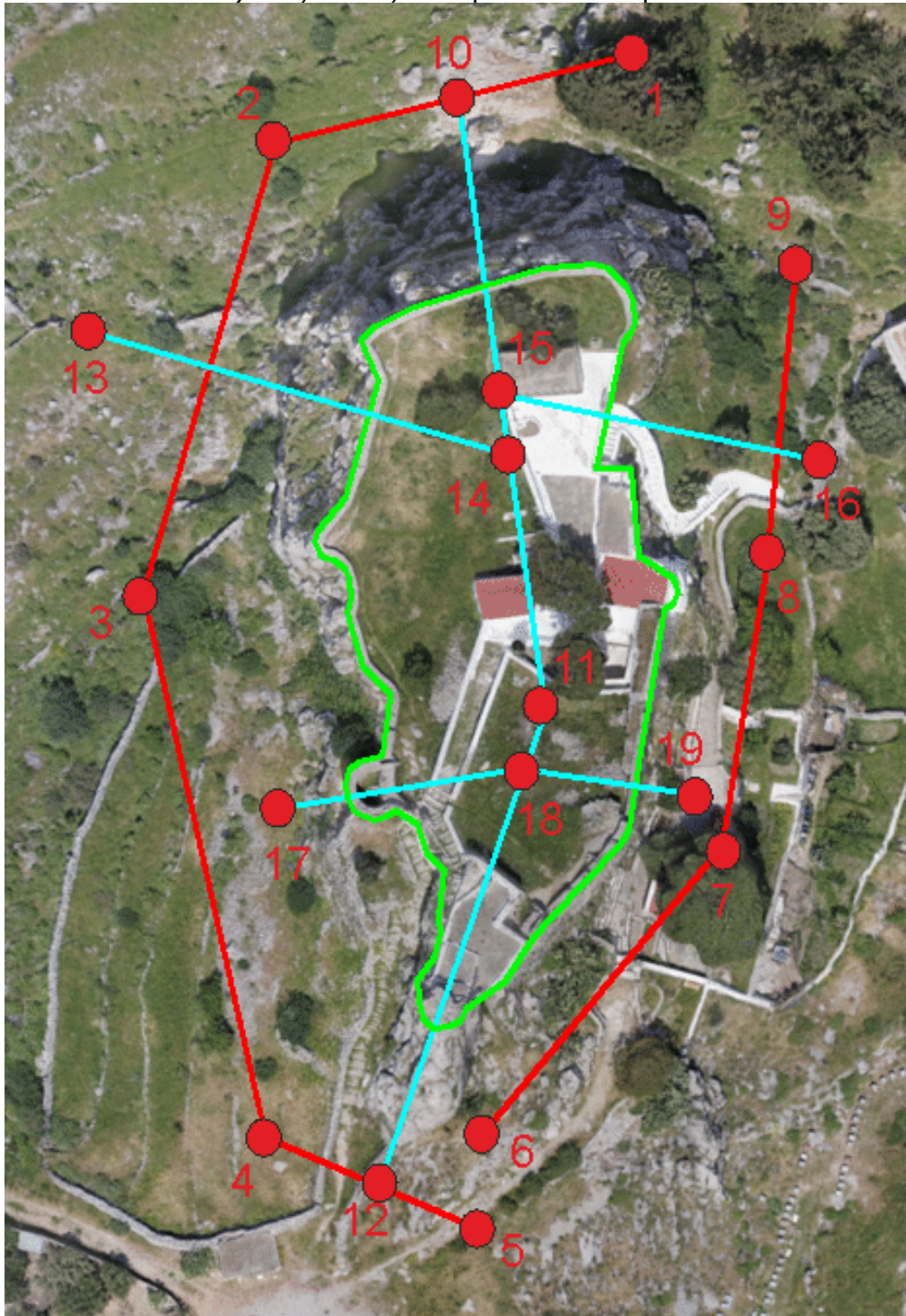
Στη συνέχεια παράχθηκε η ορθοεικόνα της κάτοψης του κάστρου στο ΕΓΣΑ 87. Η ορθοεικόνα ήταν επίσης πολύ καλή, χωρίς "σπασίματα" και παραμορφώσεις στα ευθύγραμμα τμήματα.



Εικόνα 27: Ορθοεικόνα του κάστρου της Χρυσοχειριάς σε ΕΓΣΑ '87

Από το 3D μοντέλο, επιλέχθηκε να εξαχθούν:

- οι εξωτερικές όψεις περιμετρικά του κάστρου. Επιλέχθηκε η προβολή των όψεων σε 7 επιμέρους επίπεδα
- μια διαμήκης τομής (σε 2 επίπεδα) και 2 εγκάρσιες (σε 4 επίπεδα) στις θέσεις που φαίνονται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 28: Επιλεγμένες τομές και όψεις για το κάστρο της Χρυσοχεριάς

Αναλυτικά οι τομές και οι όψεις, υπάρχουν στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Εφαρμογή του VisualSfM

- Αρχικά εισάγονται οι εικόνες στο λογισμικό
- Έπειτα πραγματοποιείται η λειτουργία Compute 3D Reconstruction. Η λειτουργία αυτή, είναι πρακτικά το Alignment και παράγεται ένα αραιό νέφος σημείων (Sparse cloud).
- Τέλος χρησιμοποιήθηκε συνδυαστικά ο αλγόριθμος PMVS μέσω του VisualSfM, για την παραγωγή ενός πυκνού νέφους σημείων (Dense cloud).



Εικόνα 29: Πυκνό νέφος σημείων με τη χρήση του λογισμικού VisualSfM

Για λόγους σύγκρισης με τα προϊόντα του PhotoScan, το παραγόμενο νέφος από το VisualSfM, δεν συνδυάστηκε με κάποιο άλλο πρόγραμμα (όπως π.χ. το MeshLab) για να παραχθεί η επιφάνεια (meshing) και να δοθεί η υφή (texturing).

Επειδή στο VisualSfM δεν είναι τόσο εύχρηστη η δυνατότητα γεωαναφοράς του νέφους, χρησιμοποιήθηκε εξωτερικό πρόγραμμα για το σκοπό αυτό. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το SfM-Georef (Mike James, Lancaster University), όπου είχε ως είσοδο το νέφος σημείων και τις συντεταγμένες των φωτοσταθερών, στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Οι ακρίβειες που προέκυψαν φαίνονται στον Πίνακα 9.

ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΟ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΣΤΑΘΕΡΩΝ	
	15	11
	ΣΦΑΜΛΑ (m)	
1	0,265	-
2	0,054	0,032
37	0,037	0,087
39	0,082	0,049
40	0,128	0,074
41	0,125	0,066
42	0,153	0,077
44	0,063	0,089
45	0,322	-
47	0,059	0,091
48	0,195	-
50	0,314	-
51	0,093	0,109
53	0,120	0,062
54	0,107	0,134
ΤΕΛΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ (m)	±0,167	±0,083

Πίνακας 9: Αποτελέσματα γεωαναφοράς του νέφους από το VisualSfM

Επιλέχθηκε να κρατηθεί το νέφος που γεωαναφέρθηκε με τα 11 φωτοσταθερά, καθώς αναλογικά έδινε καλύτερες ακρίβειες.

Συγκρίνοντας τα 2 προγράμματα

Λόγω του ότι το VisualSfM φτάνει μέχρι το στάδιο παραγωγής του νέφους σημείων (Dense cloud), συγκρίναμε τα δύο παραγόμενα νέφη μεταξύ τους, δηλαδή του νέφους που παρήχθη VisualSfM και του νέφους από το Photoscan.

Μία πρώτη σύγκριση αφορούσε στον αριθμό των σημείων του κάθε παραχθέντος νέφους:

Λογισμικό	Αριθμός σημείων
VisualSfM	4.266.161
Photoscan	11.240.820

Πίνακας 10: Σύγκριση αριθμού σημείων των 2 νεφών

Το Photoscan κατάφερε να εξαγάγει υπερδιπλάσιο αριθμό σημείων σε σύγκριση με το VisualSfM. Να σημειωθεί πως στο PhotoScan επιλέχθηκε η μεταβλητή High (μεταξύ των επιλογών Lowest, Low, Medium, High, Ultra High) για την εξαγωγή του νέφους, ενώ στο VisualSfM δεν υπήρχε κάποια δυνατότητα για επιλογή ποιότητας εξαγωγής του νέφους. Αυτό σημαίνει πως το Photoscan παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου του μεγέθους του παραγόμενου νέφους (και εμμέσως της τελικής ακρίβειας), ενώ δεν υπάρχει αντίστοιχη δυνατότητα στο VisualSfM όχι. Ωστόσο, μεγάλο ενδιαφέρον, έχει να συγκρίνουμε το χρόνο και την υπολογιστική δύναμη που χρειάστηκαν τα δύο λογισμικά, για να ολοκληρώσουν τις ίδιες διαδικασίες, στον ίδιο υπολογιστή. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής δίνονται στο Πίνακα 11.

	VisualSfM	Photoscan
Χρόνος	~ 6 ώρες	~ 20 ώρες
Συνεχόμενη χρήση της CPU κατά μέσο όρο	80%	100%

Πίνακας 11: Σύγκριση χρόνου και υπολογιστικής δύναμης

Αν λάβουμε υπόψη ότι το Photoscan είχε εξαγει περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερο αριθμό σημείων, αναλογικά φαίνεται πως το Photoscan απαιτεί περίπου 25% περισσότερο χρόνο και μεγαλύτερη υπολογιστική δύναμη από το VisualSfM, παρέχει όμως καλύτερο έλεγχο στα εξαγόμενα αποτελέσματα.

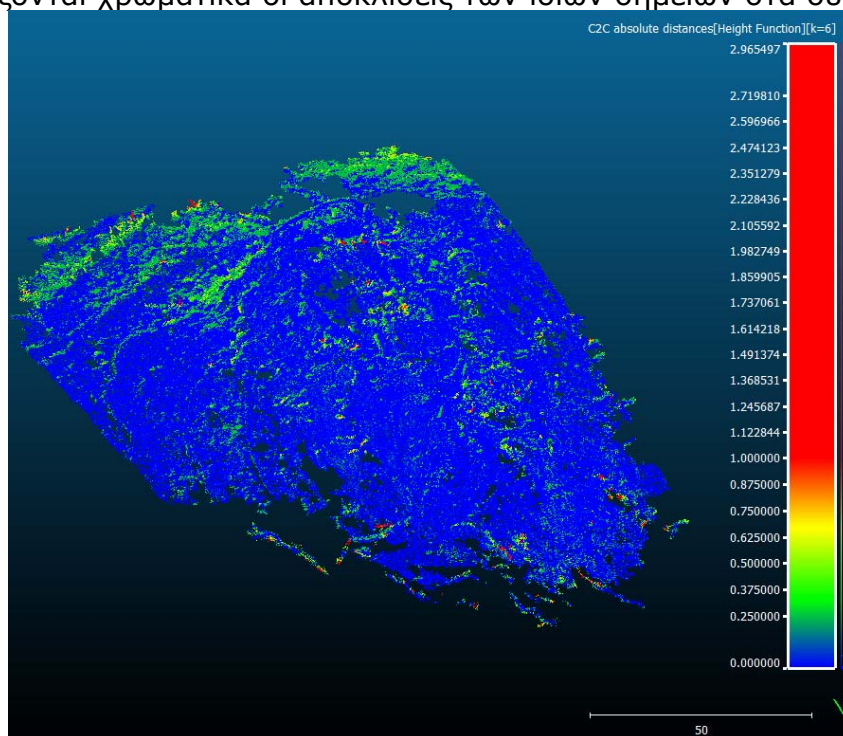
Ωστόσο το μεγαλύτερο νέφος σημείων, δεν σημαίνει απαραίτητα και αναλογικά καλύτερη τελική ακρίβεια. Συγκρίνοντας τις ακρίβειες του κάθε γεωαναφερμένου νέφους ξεχωριστά, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 12.

	VisualSfM	Photoscan
Σημεία	4.266.161	11.240.820
Φωτοσταθερά	11	16
Ακρίβεια	± 0,083 m	± 0,031 m

Πίνακας 12: Σύγκριση ακρίβειας των 2 νεφών

Ως τελευταία σύγκριση, επιλέχθηκε η απευθείας σύγκριση μεταξύ των δύο γεωαναφερμένων νεφών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ανοιχτού κώδικα λογισμικό CloudCompare.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ICP (Iterative Closest Point), για καλύτερη ταύτιση και, επομένως, σύγκριση των νεφών. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Height function, με τον οποίο απεικονίζονται χρωματικά οι αποκλίσεις των ίδιων σημείων στα δύο νέφη.



Εικόνα 30: Διαφορές στο υψόμετρο των σημείων στα 2 νέφη

Τα δύο νέφη που χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο Height function, είναι αδύνατο έχουν ακριβώς τον ίδιο αριθμό σημείων και στις ίδιες θέσεις. Για να λειτουργήσει ορθά λοιπόν ο αλγόριθμος, πραγματοποιείται παράλληλα και πύκνωση με παρεμβολή (ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν τα υψόμετρα δύο ακριβώς ίδιων σημείων).

Εκτός από τα σημεία που ήταν μακριά από την περιοχή μελέτης/ ενδιαφέροντος, τα υπόλοιπα σημεία στα οποία παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις ανάμεσα στα δύο νέφη (με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 27), ήταν σημεία όπου υπήρχαν σπασίματα/ασυνέχειες και μεγάλες απότομες υψομετρικές διαφορές. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις, περιμετρικά ενός κτίσματος που υπάρχει (ύψους ~ 3 μέτρων, όπως και η μέγιστη απόκλιση). Προφανώς, οριζοντιογραφικές διαφορές ακόμα και λίγων εκατοστών στο περίγραμμα του κτίσματος, μπορούν να προκαλέσουν τέτοιες μεγάλες υψομετρικές διαφορές, που φτάνουν ακόμα και τα 3 μέτρα. Οπότε δεν μπορεί να θεωρηθεί πως υπάρχει κάποιο χονδροειδές λάθος, στην παραγωγή του νέφους.

Συνοπτικά μία γρήγορα σύγκριση των λογισμικών:

- Το Photoscan μπορεί να πραγματοποιήσει όλες τις διαδικασίες για την παραγωγή 3D μοντέλου με υφή, ενώ το VisualSfM λειτουργεί συμπληρωματικά με άλλα λογισμικά (π.χ. το MeshLab)
- Το VisualSfM είναι ελεύθερο, ενώ το Photoscan κοστίζει περίπου 3.000 ευρώ
- Το Photoscan είναι πιο φιλικό στο χρήστη, με καλύτερο γραφικό περιβάλλον και μεγαλύτερη ευχρηστία/ευκολία
- Το Photoscan είναι κατά 25% πιο αργό στο χρόνο εκτέλεσης των ίδιων διαδικασιών από ότι στο VisualSfM, ενώ απαιτεί και πιο δυνατό υπολογιστικό σύστημα
- Στο Photoscan μπορείς να επιλέξεις και να εκτιμήσεις την τελική ακρίβεια που επιθυμείς, ενώ στο VisualSfM όχι. Αυτό σημαίνει πως το VisualSfM, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη πολύ μεγάλων ακριβειών (σε σχέση με τα δεδομένα που υπάρχουν)

3.3.2. Αστική περιοχή

Εφαρμογή του Agisoft Photoscan












Στην αποτύπωση της περιοχής της κατοικίας, χρησιμοποιήθηκε μόνο το εμπορικό λογισμικό Photoscan. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν μόνο αποστάσεις ώστε να δοθεί σωστή κλίμακα στο μοντέλο (σε τοπικό σύστημα αναφοράς που ορίζεται αυθαίρετα). Ακολουθήθηκαν ακριβώς οι ίδιες διαδικασίες που αναλύθηκαν στην υποενότητα 3.3.1. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 197 φωτογραφίες.



Εικόνα 31: 3D μοντέλο του τμήματος της αστικής περιοχής

Λόγω της πυκνής βλάστησης στο οικόπεδο όπου ανήκει η προς αποτύπωση κατοικία, υπήρχαν όπως ήταν αναμενόμενο, πολλά κενά/τρύπες κάτω από το κάθε δέντρο, έχοντας ως αποτέλεσμα τα δέντρα να φαίνονται ως μικροί λόφοι στο τελικό 3D μοντέλο.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 9 αποστάσεις (οι άλλες δύο αποστάσεις που μετρήθηκαν, έδιναν μεγάλο σφάλμα και δεν συυπολογίστηκαν). Το τελικό σφάλμα οριζοντιογραφικά, είναι $\pm 0,027 \mu$.

Scale Bars	Distance (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/>  point 1_point 2	18.443000	0.028959
<input type="checkbox"/>  point 1_point 4	8.481000	-0.116118
<input type="checkbox"/>  point 1_point 14	6.316000	-0.117770
<input checked="" type="checkbox"/>  point 1_point 17	7.493000	0.044085
<input checked="" type="checkbox"/>  point 2_point 3	24.053000	0.016195
<input checked="" type="checkbox"/>  point 3_point 4	19.706000	0.015363
<input checked="" type="checkbox"/>  point 3_point 9	10.021000	0.001430
<input checked="" type="checkbox"/>  point 3_point 11	11.950000	0.040458
<input checked="" type="checkbox"/>  point 4_point 12	12.578000	-0.003672
<input checked="" type="checkbox"/>  point 4_point 13	6.778000	-0.042270
<input checked="" type="checkbox"/>  point 4_point 18	6.158000	0.012309
Total Error		0.027631

Εικόνα 32: Σφάλματα μετρημένων αποστάσεων

Τέλος, παράχθηκε η ορθοεικόνα της κάτοψης του συγκεκριμένου τμήματος της αστικής περιοχής. Η ένταξη της ορθοεικόνας στο κρατικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ 87 έγινε με αξιοποίηση των συντεταγμένων των σημείων λήψης των αεροφωτογραφιών, όπως καταγράφηκαν κατά την πτήση από το GPS του UAV. Η ακρίβεια προσδιορισμού των σημείων λήψης με το συγκεκριμένο σύστημα είναι της τάξης των ± 10 μ., οπότε δεν είναι αποδεκτή για αποτυπώσεις ή μετρητικές εφαρμογές στο ΕΓΣΑ '87. Αποτελεί όμως καλή προσέγγιση του προσανατολισμού και της θέσης του παραγόμενου μοντέλου.



Εικόνα 33: Ορθοεικόνα της κάτοψης αστικής περιοχής

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται μια σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων, παρατηρήσεων και προβλημάτων από όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, υπάρχουν προτάσεις που θα επιτρέψουν την καλυτέρευση της όλης διαδικασίας.

Όσον αφορά τα δύο αντικείμενα αποτύπωσης, που αποτέλεσαν την πρακτική εφαρμογή της εργασίας, τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα. Στο κάστρο της Χρυσοχειριάς η πτήση ήταν αρκετά καλή, με αποτέλεσμα να μην δημιουργηθούν κενά στο 3D μοντέλο (τρύπες). Η μορφολογία του χώρου, επίσης, βοηθούσε στο να μην υπάρχουν τρύπες και αντικείμενα που να αποκρύπτονται. Αντιθέτως, στην περιοχή της κατοικίας υπήρχαν αρκετά κενά, αφενός λόγω των μπαλκονιών που υπήρχαν και αφετέρου λόγω της πυκνής και σχετικά υψηλής βλάστησης. Η θέση και η γωνία τους σε σχέση με τα σημεία λήψης, ήταν οι δύο αιτίες για τη δημιουργία αυτού του προβλήματος.

Γενικά η επίλυση του προβλήματος του SfM, δεν έχει αυστηρές απαιτήσεις στις υπάρχουσες επικαλύψεις των εικόνων, γεγονός που ευνοεί τη χρήση UAV's. Δηλαδή ακόμα και με τυχαίες πτήσεις, αλλά με πυκνή φωτογραφική κάλυψη, μπορεί να προκύψει ένα εξίσου καλό αποτέλεσμα. Οι τελικές ακρίβειες ήταν πολύ καλές με το λογισμικό Photoscan και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τοπογραφικές αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας.

Το Photoscan, αν και χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να εξαγάγει τα αποτελέσματα, αποδείχθηκε πως παρέχει πολύ καλύτερο έλεγχο στα παραγόμενα προϊόντα και γενικά η λειτουργία του ήταν πιο ευέλικτη/φιλική. Αντιθέτως, η χρησιμοποίηση ελεύθερου λογισμικού είναι απαραίτητο να συνδυαστεί με τη χρήση και άλλων, συμπληρωματικών, λογισμικών για να εξαχθούν τα ίδια τελικά προϊόντα.

Οι βασικές δυσκολίες που εμφανίστηκαν στη διπλωματική εργασία, ήταν κυρίως στο πεδίο. Η πρώτη μεγάλη δυσκολία, ήταν η μέτρηση της όδευσης σε συνεργασία με μη γνώστες του αντικειμένου (μη τοπογράφους). Γεγονός που δημιούργησε καθυστερήσεις αρκετών ωρών. Η δεύτερη δυσκολία, ήταν ο συνδυασμός των ωρών, που πρέπει να γίνουν οι επίγειες μετρήσεις των φωτοσταθερών, με τις ώρες που προσφέρονται για τη λήψη των φωτογραφιών, αλλά και την κατάλληλη ηλιοφάνεια ή συννεφιά, και την τοπική ένταση του ανέμου, ώστε να μπορεί να πετάξει το UAV. Ειδικά την εποχή του χειμώνα, μπορούν να εμφανιστούν αρκετές τέτοιες δυσκολίες, μέχρι να πετύχει κανείς τον κατάλληλο συνδυασμό.

Γενικά από όλη τη διαδικασία, αποδείχτηκε πως δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο η τήρηση αυστηρών επικαλύψεων ή στροφών των εικόνων. Όμως, εάν δεν είναι δυνατός ο ηλεκτρονικός προγραμματισμός πτήσης (μέσω του λογισμικού του UAV), μια χειροκίνητη προσπάθεια για πτήση, σύμφωνα με τον αρχικό προγραμματισμό, μπορεί να αποτύχει, λόγω ικανότητας χειρισμού και λόγω αέρα. Σε αυτή την περίπτωση, προτείνεται η λήψη όσων το δυνατόν πυκνότερων φωτογραφιών, ακόμα και σε εντελώς τυχαία σειρά.

Προτείνεται επίσης η χρήση περίπου 8-15 σημείων σύνδεσης (tie points) και μερικών ακόμα σημείων, ως σημεία ελέγχου (control points). Μετά τη δημιουργία του τελικού μοντέλου, ενταγμένου στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς, προτείνεται ο έλεγχος της ακρίβειάς του, μέσω της εύρεσης των συντεταγμένων (από το 3D μοντέλο) κάποιων χαρακτηριστικών σημείων (π.χ. γωνίες κατασκευών) και, στη συνέχεια, μέτρησής τους στο πεδίο.

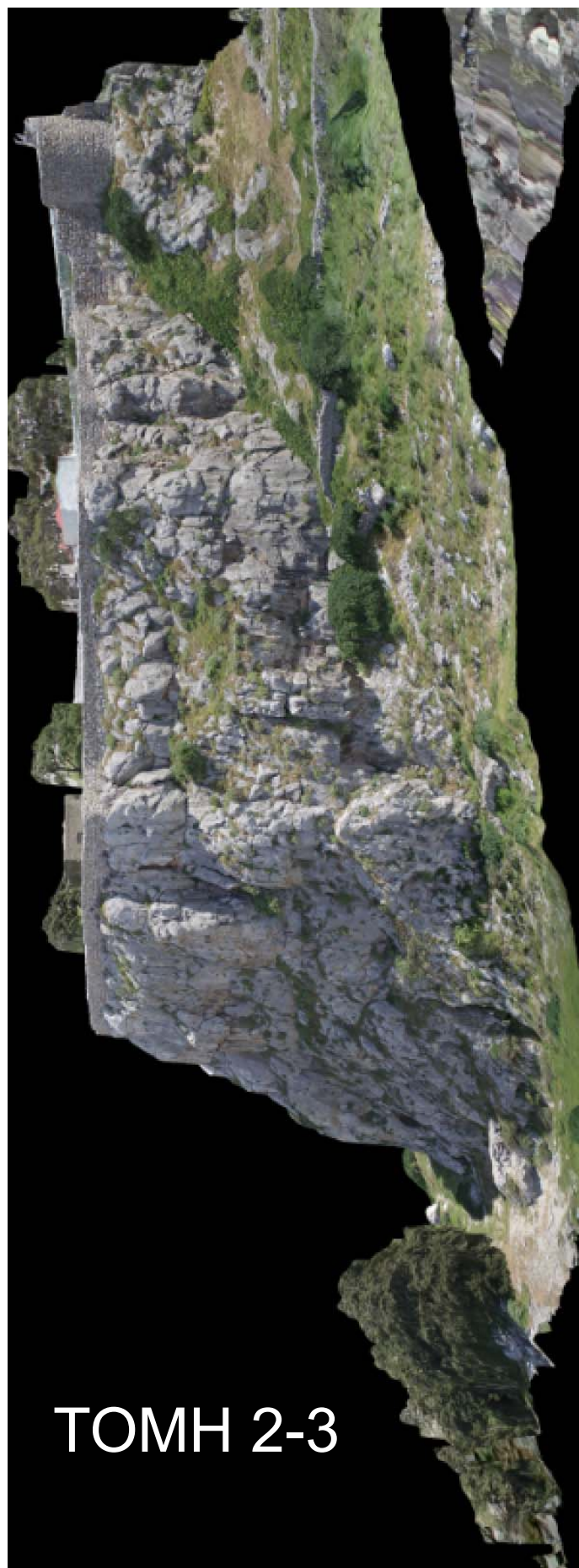
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Κωνσταντινίδης Δημήτριος. Αντιστοίχιση σημείων με τη μέθοδο RANSAC (2009)**
(<http://vivliothmmy.ee.auth.gr/325/1/diploma.pdf>)
- 2. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Παπαχρήστου Ηρώ. Εκτίμηση τρισδιάστατου σχήματος από κίνηση με χρήση γεωμετρικής άλγεβρας (2009)**
(<http://vivliothmmy.ee.auth.gr/122/>)
- 3. Cambridge. Richard Hartley, Andrew Zisserman. Multiple view geometry in computer vision (2003)**
(http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/qji/CV/3dvision_intro.pdf)
- 4. Computer Vision Talks. Comparison of the OpenCV's feature detection algorithms**
(<http://computer-vision-talks.com/articles/2011-01-04-comparison-of-the-opencv-feature-detection-algorithms/>)
- 5. CORPUS. Κουτελλάς Ι. Μιχαήλ. Αρχαιολογία-ιστορία των πολιτισμών (2000). Τεύχος 18- σελ. 87-89**
- 6. ITC. Bashar Saleem, Abbas Alsadik. Guided close range photogrammetry for 3D modelling of cultural heritage sites**
(http://www.itc.nl/guided_close_range_photogrammetry_3D_modeling)
- 7. KRAUS KARL. Φωτογραμμετρία (2001). σελ. 340-349**
- 8. New York University. Rob Fergus. Multi-view stereo & Structure from Motion (2006)**
(http://cs.nyu.edu/~fergus/teaching/vision_2012/6_Multiview_SfM.pdf)
- 9. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πρινόπουλος Σαραντής. Εύρεση σχεδιαστικών αποκλίσεων αντικειμένων με υψηλή (2009)**
(<http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1572/1/%CE%95%CE%A5%CE%A1%CE%95%CE%A3%CE%97%20%CE%A3%CE%A7%CE%95%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%91%CE%A0%CE%9F%CE%9A%CE%9B%CE%99%CE%A3%CE%95%CE%A9%CE%9D%20%CE%91%CE%9D%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%99%CE%9C%CE%95%CE%9D%CE%A9%CE%9D%20%CE%9C%CE%95%20%CE%A5%CE%A6%CE%97.pdf>)
- 10. Rensselaer ECSE. 3D Vision intro (2007)**
(http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/qji/CV/3dvision_intro.pdf)
- 11. Technical University of Denmark. Henrik Aanaes. Methods for Structure from Motion (2003)**
(www.imm.dtu.dk/~aanes/phdthesis.pdf)
- 12. ΤΕΙ Θεσσαλονίκης. Ράπτης Πασχάλης. Γραφικά υπολογιστών: 2D Μετασχηματισμοί**
(<http://aetos.it.teithe.gr/~praptis/CG/Graphics3-2DTransformations.pdf>)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

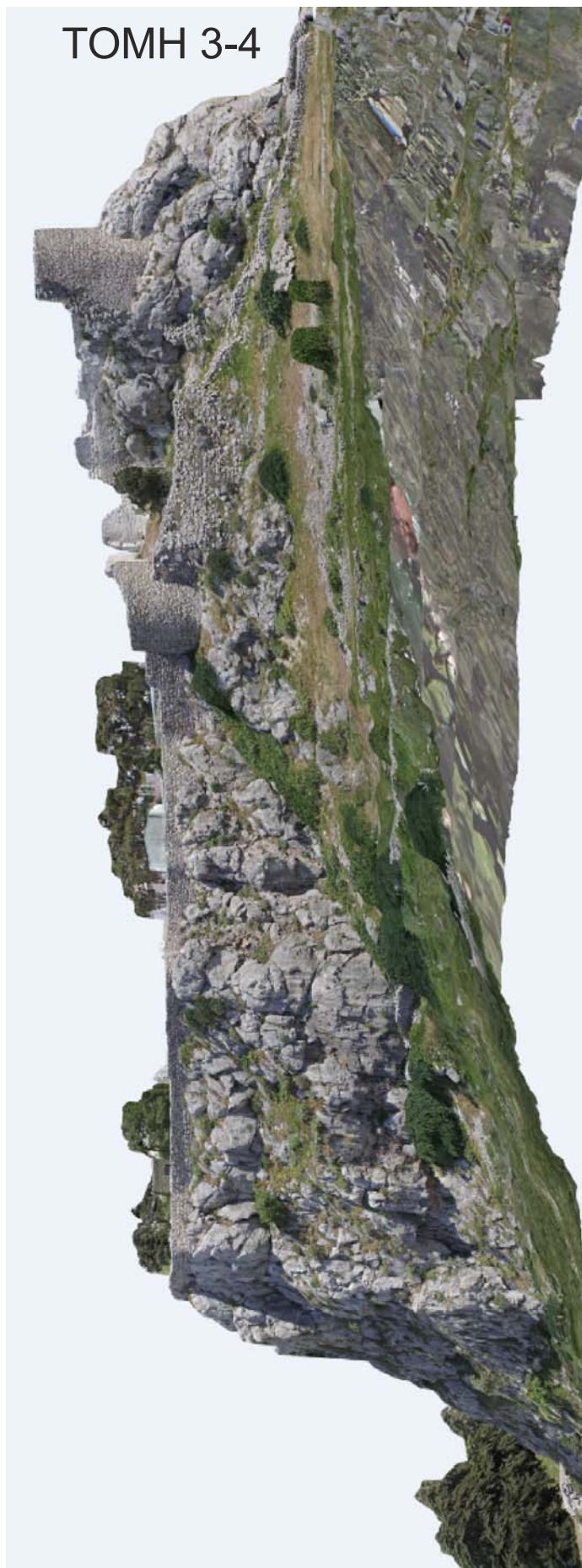


ΤΟΜΗ 1-2



ΤΟΜΗ 2-3

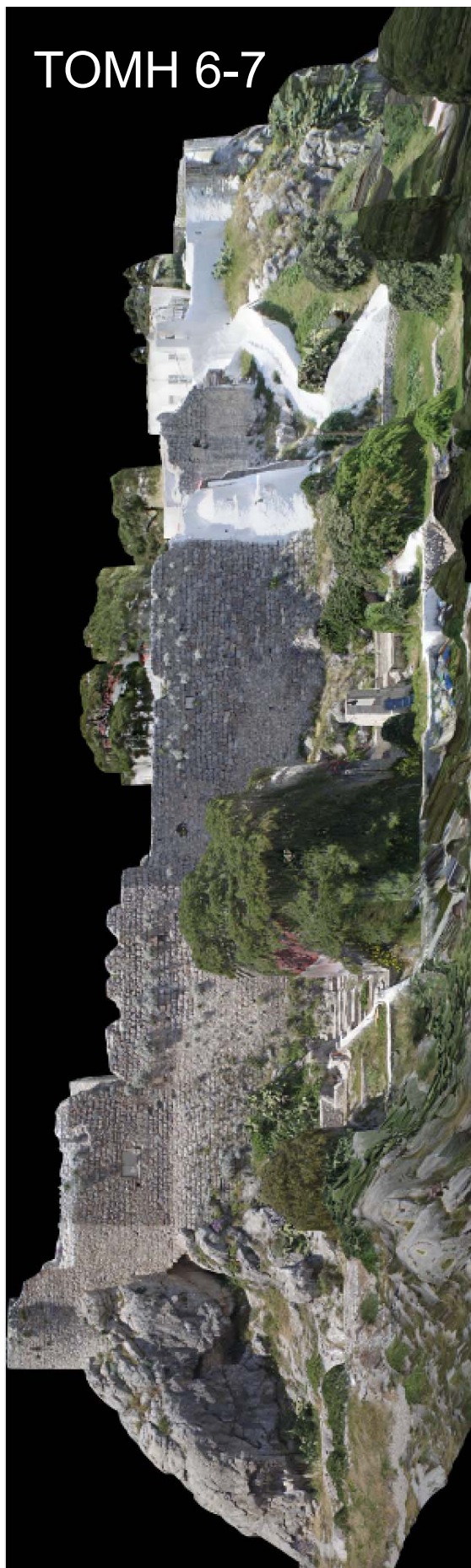
ΤΟΜΗ 3-4





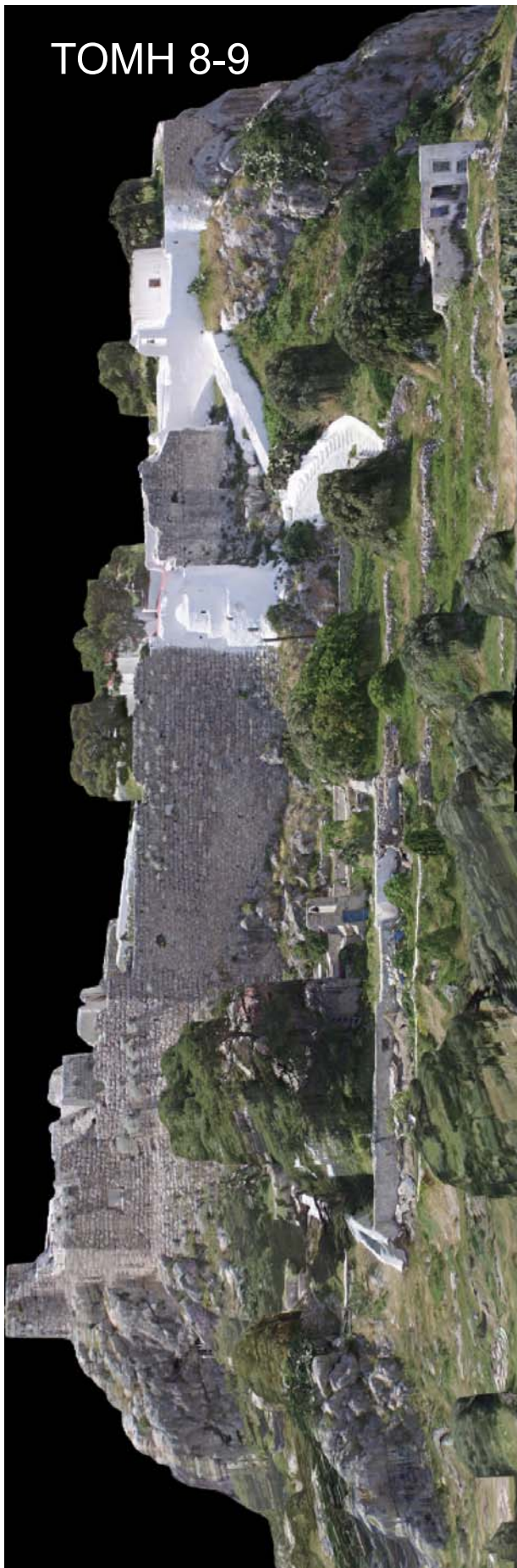
ΤΟΜΗ 4-5

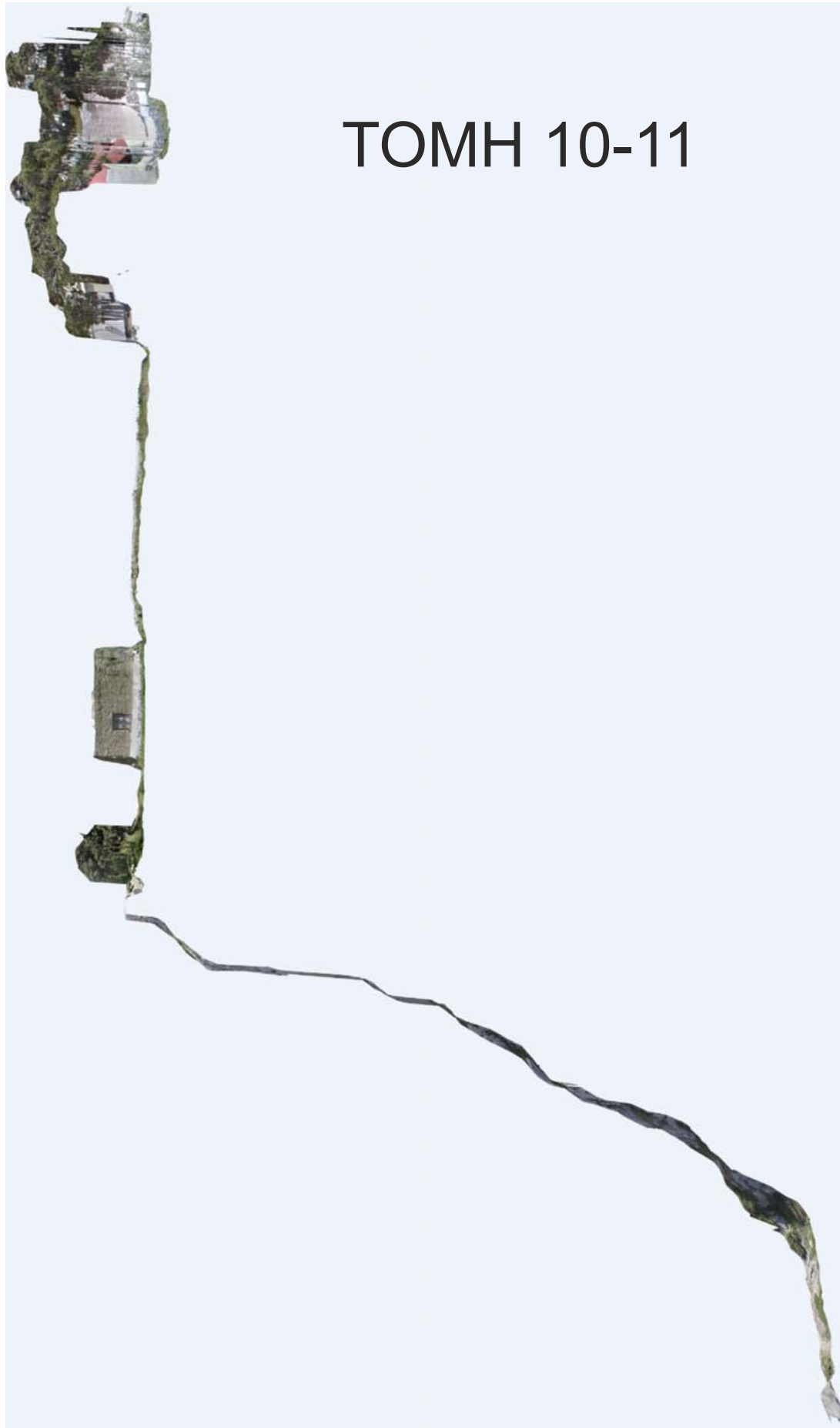
ΤΟΜΗ 6-7



ΤΟΜΗ 7-8

ΤΟΜΗ 8-9



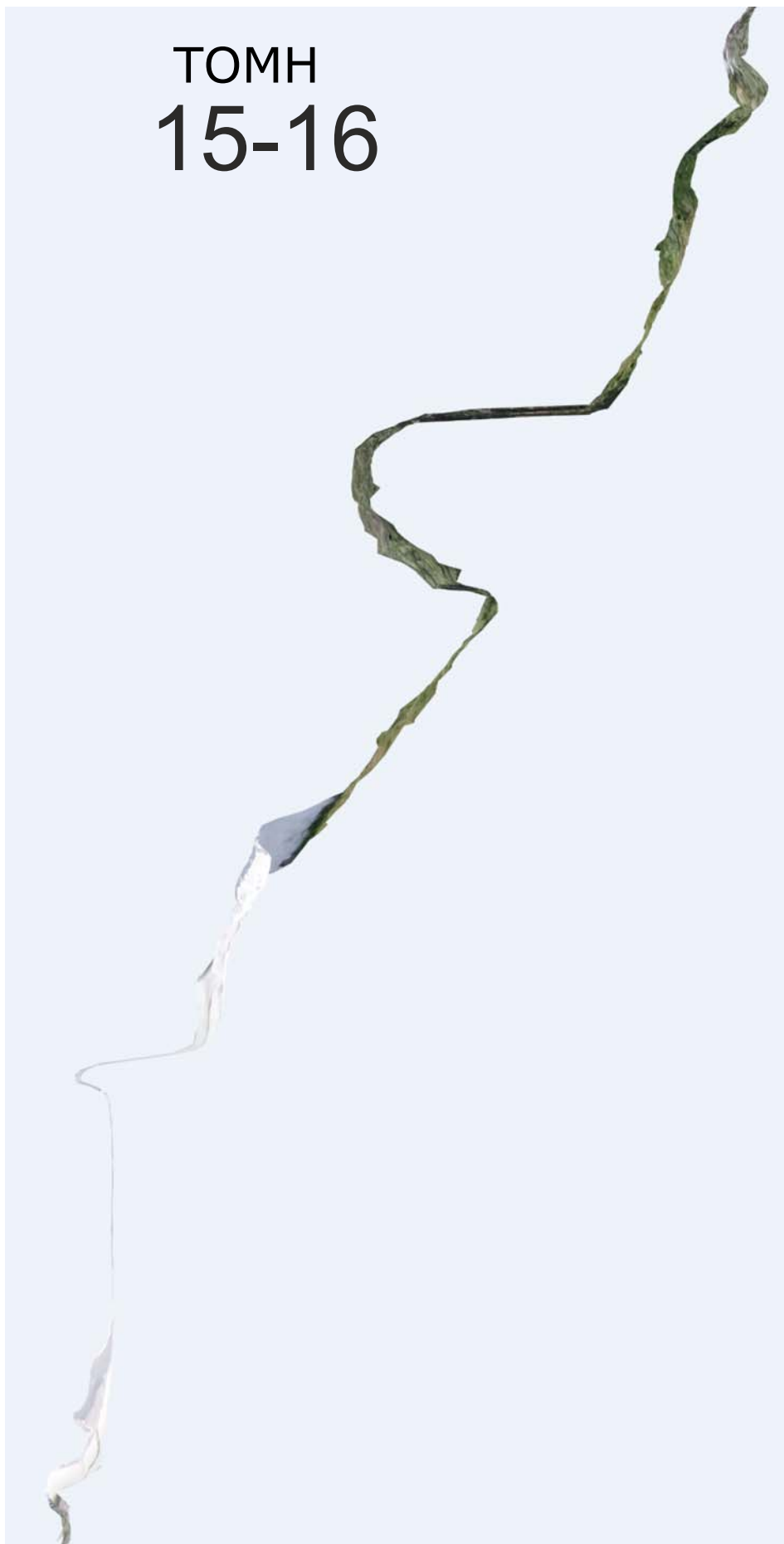


ΤΟΜΗ 11-12

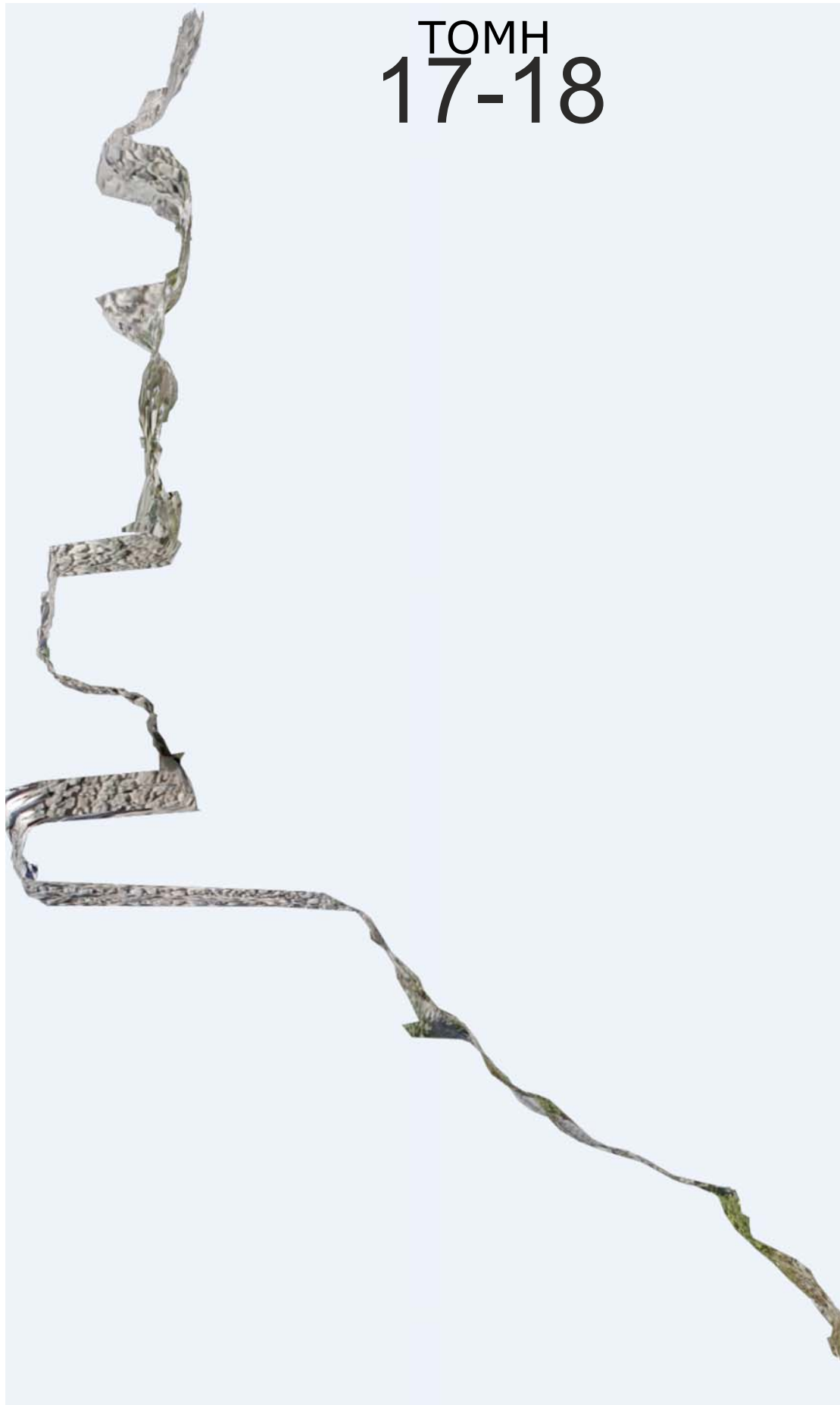




ΤΟΜΗ
15-16



ΤΟΜΗ 17-18



ΤΟΜΗ
18-19

