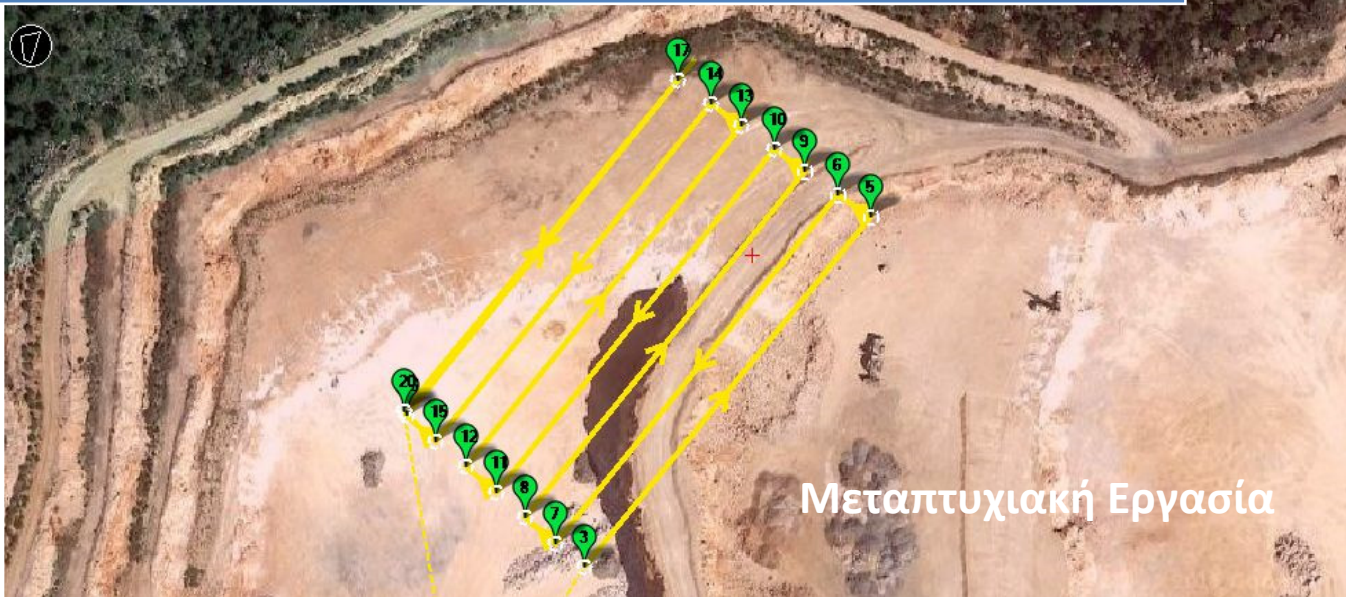




Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανατίναξης με χρήση UAV και Φωτογραμμετρίας



Μεταπτυχιακή Εργασία

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΤΣΙΑΒΟΣ

Αθήνα 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανατίναξης με χρήση UAV και Φωτογραμμετρίας

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Εμμανουήλ - Νικόλαος Τσιαβός

Επιβλέπων: **Γεώργιος Ν. Παναγιώτου**

Εγκρίθηκε από την Τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2016:

Γεώργιος Ν. Παναγιώτου
Καθ. ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Κωνσταντίνος Μόδης
Αναπλ. Καθ. ΕΜΠ (Μέλος)

Αικατερίνη Αδάμ
Επικ. Καθ. ΕΜΠ (Μέλος)

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Εμμανουήλ - Νικόλαος Τσιαβός

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

Copyright © Εμμανουήλ - Νικόλαος Τσιαβός, 2016

με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All Rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση και αναδιανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

- Τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γ. Ν. Παναγιώτου του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ, για την καθοδήγηση, τις συμβουλές, την υλικοτεχνική και οικονομική κάλυψη αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη και διεκπεραίωση του θέματος.
- Τον Καθηγητή κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη του Τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, για τη συμβολή του στην κατανόηση του αντικειμένου της Φωτογραμμετρίας μέσω ιδιαίτερων μαθημάτων.
- Τους κ. Δημήτριο Παναγιώτου και κ. Νικόλαο Παναγιώτου, Διπλωματούχο Αγρονόμο Τοπογράφο ΕΜΠ και Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ αντίστοιχα, για την βοήθειά τους στη διεκπεραίωση των τοπογραφικών μετρήσεων και την διάθεση του τοπογραφικού εξοπλισμού.
- Την ΑΕ Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ και ιδιαίτερα τον κ. Νικόλαο Μπότο Διπλωματούχο Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό ΕΜΠ, προϊστάμενο λατομείων του Εργοστασίου Καμαρίου, για την άδεια να πραγματοποιηθούν οι επί τόπου μετρήσεις στο λατομείο ασβεστολίθου Καμαρίου και τις διευκολύνσεις που μας προσέφεραν.

Ε-Ν Τσιαβός

Οκτώβριος 2016

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	1
Abstract	2
1. UAVs	
1.1 Ορισμός	5
1.2 Η πορεία στο χρόνο	5
1.3 Multicopters	8
1.4 Παρόν και Μέλλον	11
1.5 Η Ανατομία ενός Civilian Multicopter Drone	13
1.6 Ανάλυση Λειτουργίας	22
2. ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ	
2.1 Εισαγωγή	35
2.2 Βασικές Ιδιότητες Κεντρικής Προβολής	37
2.3 Η εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας	40
2.4 Προσανατολισμοί της Εικόνας	42
2.5 Συνθήκη Συγγραμμικότητας	44
2.6 Μοντέλο Συνόρθωσης	46
2.7 Βασικά Φωτογραμμετρικά Προβλήματα	47
2.8 Προσανατολισμοί στερεοσκοπικού Ζεύγους	51
2.9 Φωτογραμμετρικά Σφάλματα	54
2.10 Αεροτριγωνισμός	56
2.11 Σφάλματα και Αξιοπιστία Αεροτριγωνισμού	59
2.12 Συνδυασμένες Επιλύσεις Αεροτριγωνισμού	61
3. UAVs ΚΑΙ ΕΝΑΕΡΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ	
3.1 Εναέρια ψηφιακή Φωτογραμμετρία	67
3.2 Η χρήση των UAV στη Φωτογραμμετρία	73

3.3 Εφαρμογές στη Μεταλλευτική	78
3.4 Το Μέλλον	82

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ UAV ΚΑΙ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή	91
4.2 Εξοπλισμός	92
4.3 Σχεδίαση και Προετοιμασία Αποστολής	105
4.4 Μετρήσεις στο Λατομείο	121
4.5 Επεξεργασία των Μετρήσεων	127
4.6 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της Ανατίναξης	141
4.7 Συμπεράσματα	150

5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

5.1 Εκτίμηση Σφάλματος χωρίς τη χρήση Φωτοσταθερών	155
--	-----

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Περίληψη

Η εξέλιξη και μαζική παραγωγή των αισθητήρων στερεάς κατάστασης αλλά και η εμφάνιση των ελεύθερων πλατφορμών προτυποποίησης συνέβαλε στην μετατροπή των αερομοντέλων από απλά μέσα ψυχαγωγίας σε έξυπνες πτητικές μηχανές (UAVs). Τα πιθανά πεδία εφαρμογής και τα οφέλη από τη χρήση τέτοιων μηχανών σε διάφορους τομείς της επιστήμης, της παραγωγικής διαδικασίας και της παροχής υπηρεσιών ήταν τόσο πολλά, ώστε επενδύθηκαν και συνεχίζουν να επενδύονται τεράστια ποσά για έρευνα και ανάπτυξη με τη συμμετοχή κορυφαίων πολυεθνικών εταιριών και ερευνητικών κέντρων, δημιουργώντας παράλληλα μια αγορά δισεκατομμυρίων δολαρίων χωρίς ενδείξεις κάμψης.

Παράλληλα οι εξελίξεις σε άλλους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας συνέβαλαν στην μετάβαση της υπόστασης τεχνικών και μεθοδολογιών όπως η φωτογραμμετρία, από την αναλογική στην ψηφιακή φάση, καθιστώντας την πιο προσιτή τόσο από λειτουργική όσο και από οικονομική σκοπιά.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, ήταν θέμα χρόνου ο συνδυασμός των δυο παραπάνω στοιχείων για την υλοποίηση ενός νέου μετρητικού εργαλείου, της Εναέριας Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας με χρήση UAV ή του “UAV Photogrammetry” όπως αναφέρεται από τις εταιρείες κατασκευής τοπογραφικού εξοπλισμού που έχουν πλέον εμπλακεί ενεργά σε αυτό, προσφέροντας ολοκληρωμένες λύσεις προϊόντων βασιζόμενων σε UAV και φωτογραμμετρικό λογισμικό. Το νέο αυτό προϊόν είναι φθηνό, ακριβές και παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις συμβατικές τοπογραφικές μεθόδους, με αποτέλεσμα να κάνει δυναμική είσοδο σε ιδιάζοντες χώρους όπως η μεταλλευτική και λατομική βιομηχανία, που ευνοείται ιδιαίτερα από τη χρήση του.

Αντικείμενο της Μεταπτυχιακής αυτής Εργασίας αποτελεί η παρουσίαση των στοιχείων που δομούν το νέο αυτό προϊόν, καθώς και των πλεονεκτημάτων που αυτό παρουσιάζει έναντι των συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων σε χώρους όπως η μεταλλευτική και λατομική βιομηχανία. Το ειδικό μέρος της Εργασίας αφορά στην διενέργεια και παρουσίαση πειραματικής σειράς αποτυπώσεων καθώς και της

προεργασίας που απαιτήθηκε για να πραγματοποιηθούν αυτές, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανατίναξης μετώπου παραγωγής σε λατομείο, με χρήση UAV και φωτογραμμετρικού λογισμικού.

Abstract

The evolution and mass production of solid-state sensors and prototyping platforms contributed to the transformation of model aircrafts to smart flying machines (UAVs). Possible applications and usage benefits of such machines in various fields of science, production and services were so many, that leading companies invested huge amounts of money and efforts on research and development, while a market of billions of dollars has been created without signs of slowdown.

Meanwhile, evolutions in other areas of science and technology have contributed to the transition of techniques such as photogrammetry, from analogue to digital technology, making it more accessible both operationally and economically.

Thus, it was a matter of time before these two evolutions got together to form a new measuring tool called "UAV Photogrammetry", which nowadays topography equipment manufacturing companies offer as an integrated product solution. This product is inexpensive, accurate and has a number of advantages over conventional surveying tools, that managed to make a dynamic entry into particular areas such as the mining industry, that benefits at most from its usage.

The purpose of this postgraduate dissertation is to present the elements that consist this new product, as well as its advantages compared to conventional surveying tools in areas such as the mining and quarrying industry. In addition, experimental mapping missions have been executed and analyzed in order to evaluate the outcome of a blasting round in a quarry, using UAV and photogrammetry software.

UAVs (Unmanned Aerial Vehicles)

1.1 Ορισμός

Ο όρος UAV (Unmanned Aerial Vehicle – μη επανδρωμένο εναέριο όχημα) ή drone ή UAS (Unmanned Aerial System – μη επανδρωμένο εναέριο σύστημα), αναφέρεται σε τύπο αεροσκάφους χωρίς πλήρωμα ή επιβάτες. Τα UAVs μπορεί να είναι τηλεκατευθυνόμενα ή/και αυτόνομα, δηλαδή ο έλεγχος της πτήσης να πραγματοποιείται είτε από χειριστή εδάφους είτε αντίστοιχα, από ενσωματωμένο στο σκάφος υπολογιστή.

Το πεδίο εφαρμογής των UAVs, αφορά σε αποστολές που κρίνονται χρονοβόρες και επικίνδυνες για τους ανθρώπους ή οικονομικά ασύμφορες αν γίνει χρήση αεροσκαφών πλήρους κλίμακας με πλήρωμα. Αν και παραδοσιακά η προέλευσή τους σχετίζεται με το στρατιωτικό χώρο, στη σημερινή εποχή η χρήση τους βρήκε εμπορικές, επιστημονικές, αγροτικές, καλλιτεχνικές και ψυχαγωγικές εφαρμογές, δημιουργώντας μια νέα κατηγορία, τα Civilian Drones (πολιτικά drones).

Στη δεύτερη δεκαετία του 2000 έχει πλέον καθιερωθεί ο όρος UAV ως ένα ευρύτερο σύνολο που αφορά σε εναέρια συστήματα κάθε μορφής (π.χ. αεροπλάνα, συμβατικά και πολλαπλών στροφείων ελικόπτερα) που διαθέτουν όμως μια πιο προηγμένη χροιά εφαρμογών και ο όρος drone αποκλειστικά για μοντέλα πολλαπλών στροφείων, με δυνατότητες αυτόνομης ή ημιαυτόνομης πλοήγησης και ενσωματωμένη διάταξη λήψης και εκπομπής εικόνας.

1.2 Η πορεία στο χρόνο

Ο όρος “drone” (κηφήνας) προήλθε από τον Ναύαρχο William H. Standley, όταν το 1935, έπειτα από επίδειξη εξάσκησης των πυροβολητών του Βασιλικού Ναυτικού με το τηλεκατευθυνόμενο αεροσκάφος DH 82B Queen Bee, έδωσε την εντολή για ανάπτυξη παρόμοιων συστημάτων και για το Αμερικανικό Ναυτικό. Ο όρος ταίριαξε και καθιερώθηκε καθώς ένα drone μπορούσε να λειτουργήσει μόνο με τη συνδρομή του χειριστή από το έδαφος ή από κάποιο «μητρικό» αεροσκάφος, σχεδόν όπως ο κηφήνας, που έχει ειδικό σκοπό και ζει με τη συνδρομή των εργατριών μελισσών.



Η Norma Jeane Dougherty αργότερα γνωστή και ως Marilyn Monroe εργαζόταν στην εταιρεία παραγωγής drones Radioplane.

Κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου, ο Αμερικανικός Στρατός και το Ναυτικό, χρησιμοποίησαν κατά κόρον “target drones” για εξάσκηση χειριστών αντιαεροπορικών και “assault drones” για εξάσκηση των πιλότων σε συνθήκες μάχης. Στα μετέπειτα χρόνια και ιδιαίτερα κατά την πρώτη περίοδο του Ψυχρού Πολέμου, παρόλο που η τεχνολογία των drones εξελίχθηκε αρκετά, ο βασικός σκοπός τους ως στόχοι ή «δολώματα» παρέμεινε πρακτικά ο ίδιος.

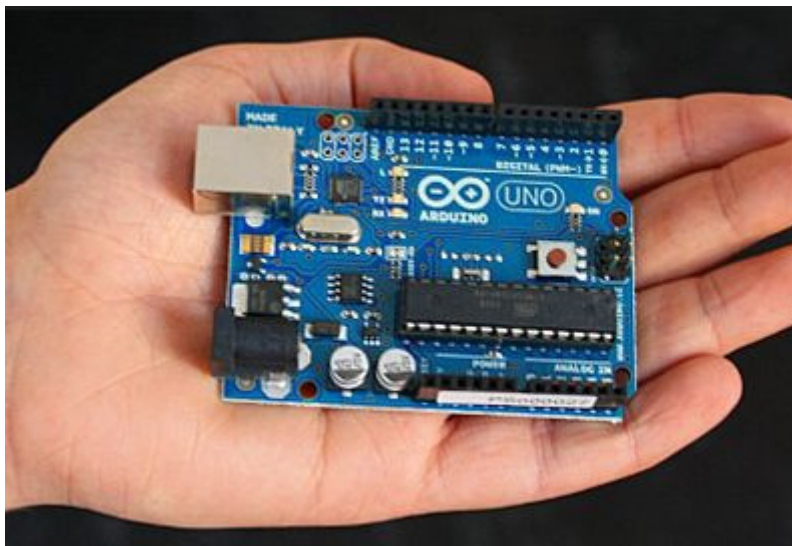
Η δεκαετία του 60 ήταν η χρονική περίοδος που ξεκίνησε ουσιαστικά η χρήση των drones για σκοπούς αναγνωριστικούς (πόλεμος του Βιετνάμ) και κατασκοπευτικούς (Βιετνάμ, Κομμουνιστική Κίνα, Βόρεια Κορέα), προσδίδοντάς τους το σκοπό για τον οποίο είναι γνωστά μέχρι σήμερα. Ωστόσο, η πλήρης μεταστροφή μεγάλου μέρους της στρατιωτικής ηγεσίας που έβλεπε τα drones ως «ακριβά παιχνίδια» και κατά συνέπεια η έναρξη σοβαρής χρηματοδότησης για την έρευνα και την ανάπτυξή τους, ξεκίνησε τη δεκαετία του 80 και ιδιαίτερα μετά τη νίκη της Ισραηλινής αεροπορίας επί της Συριακής το 1982. Οι Ισραηλινοί παράλληλα με επανδρωμένα αεροσκάφη, χρησιμοποίησαν drones ως «δολώματα», για εκπομπή παρεμβολών και αναμετάδοση εικόνας σε πραγματικό χρόνο, καταφέροντας να καταστρέψουν τη Συριακή αεροπορία σε ελάχιστο χρόνο και με μηδαμινές απώλειες.

Παρόλο που η επικρατέστερη άποψη στη σημερινή εποχή είναι πως τα Civilian Drones αποτέλεσαν κάποιο είδος στρατιωτικού project που μετακύλησε και μεταλλάχθηκε από τις σύγχρονες εταιρίες τεχνολογίας σε εμπορικό προϊόν, αυτό είναι αληθές μόνο ως προς τις βασικές αρχές λειτουργίας.

Η σημερινή εξέλιξη των «καταναλωτικών» drones οφείλεται σε τρεις διακριτούς παράγοντες:

Στην εξέλιξη και μαζική παραγωγή των αισθητήρων: Ίσως ο σημαντικότερος λόγος που επέτρεψε στα drones να γίνουν καταναλωτικό αγαθό. Η τεράστια απήχηση των κινητών τηλεφώνων και η ενσωμάτωση σε αυτά αισθητήρων στερεάς κατάστασης όπως γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα και δέκτες GPS, οδήγησε στη μαζική παραγωγή και κατ' επέκταση στη μείωση του κόστους τους, ενώ επέτρεψε να διατεθούν μεγάλα κονδύλια για την έρευνα και την εξέλιξή τους.

Στην εμφάνιση των ελεύθερων πλατφορμών προτυποποίησης: Η εμφάνιση κυκλωμάτων προτυποποίησης κατασκευών (π.χ. Arduino) βασισμένων σε μικροελεγκτές που μπορούσαν πλέον να προγραμματιστούν σε γλώσσες υψηλού επιπέδου, επέτρεψαν σε επιστήμονες, σπουδαστές και ερασιτέχνες με βασικές γνώσεις ηλεκτρονικής, την κατασκευή πολύπλοκων κυκλωμάτων αυτόματου ελέγχου. Τα ανοικτά πρότυπα που ακολουθήθηκαν επέτρεψαν την αλληλεπίδραση των σχεδιαστών – προγραμματιστών, με αποτέλεσμα την ταχύτατη εξέλιξη των projects χωρίς νομικά κολλήματα.



Αναπτυξιακή πλακέτα Arduino πρώτης γενεάς

Στην εμφάνιση και αποδοχή του FPV (προβολή πρώτου προσώπου): Αποτελεί διάταξη εικονικής πραγματικότητας, με τη βοήθεια της οποίας μεταδίδεται σε πραγματικό χρόνο η εικόνα από το τηλεκατευθυνόμενο

όχημα στο χειριστή πτήσης. Ο έλεγχος της πτήσης γίνεται αποκλειστικά μέσω της μεταδιδόμενης εικόνας, δίνοντας στο χειριστή την αίσθηση ελέγχου μέσα από το όχημα. Η χρήση του FPV ξεκίνησε με συμβατικά μοντέλα ελικοπτέρων και αεροπλάνων αλλά η τεράστια διάδοση και αποδοχή του, οδήγησε στην απαίτηση για ενσωμάτωση του σε πλατφόρμες με λιγότερες απαιτήσεις δεξιοτήτων χειρισμού, όπως τα drones πολλαπλών στροφείων (multicopters).



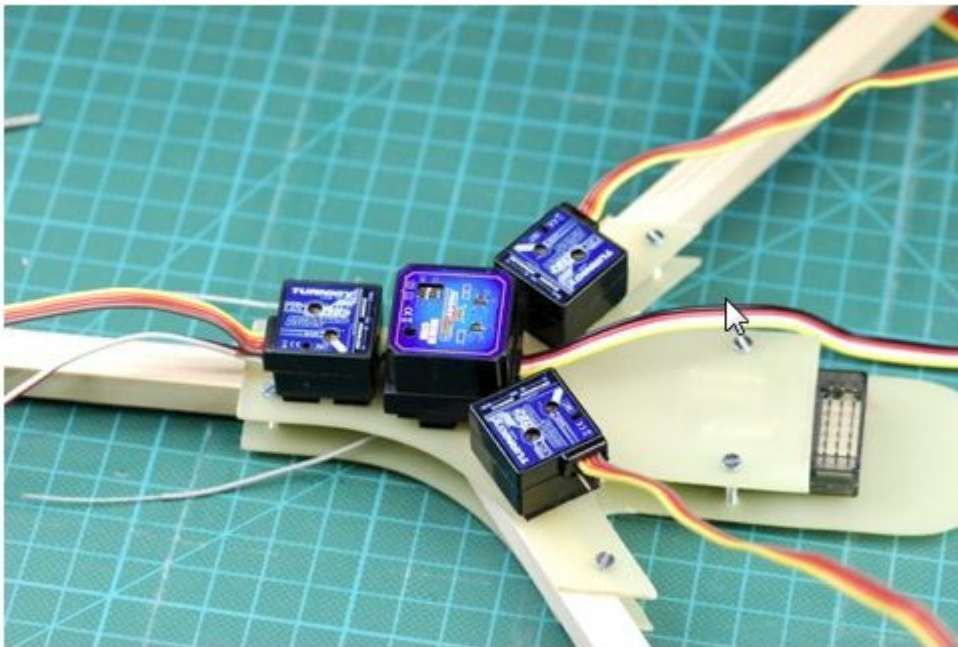
Πιλότοι αγωνιστικών drones κατά τη διάρκεια αγώνων με γυαλιά FPV

1.3 Multicopters

Τα ελικόπτερα πολλαπλών στροφείων δεν αποτελούν κάτι νέο σχεδιαστικά καθώς υλοποιήσεις τους είναι γνωστές από τη δεκαετία του 1920. Ωστόσο τα πολύπλοκα μηχανικά μέρη αλλά και η χαμηλή αποδοτικότητα τους σε σχέση με τα συμβατικά ελικόπτερα δεν οδήγησε ποτέ σε μαζική παραγωγή.

Στις αρχές της δεύτερης δεκαετίας του 2000 όπου παγιώθηκε η χρήση των μπαταριών λιθίου σε αερομοντέλα αλλά και η ταυτόχρονη πτώση στις τιμές των αισθητήρων, οδήγησαν πολλούς αερομοντελιστές στην κατασκευή μοντέλων πολλαπλών στροφείων για πειραματισμό. Πλέον η κίνηση επιτυγχάνονταν με τη μεταβολή των στροφών στους

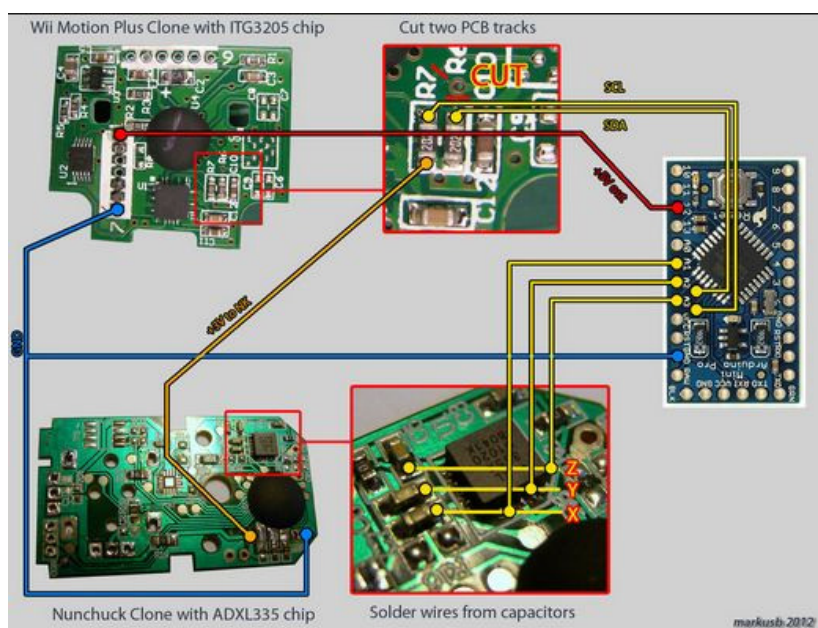
ηλεκτροκινητήρες που ελέγχονταν ηλεκτρονικά και όχι με πολύπλοκα μηχανικά συστήματα για τη μεταβολή του βήματος στις έλικες όπως απαιτούνταν στις υλοποιήσεις πλήρους κλίμακας. Στα πρώτα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν γυροσκόπια ενός άξονα από συμβατικά μοντέλα ελικοπτέρων και παρόλο που η ευστάθειά τους απείχε πολύ από τα σημερινά δεδομένα, ήταν εξωπραγματική συγκρινόμενη με άλλους τύπους αερομοντέλων. Αυτό συντέλεσε στην άμεση υιοθέτησή τους από νέους χειριστές ή χειριστές με μικρότερη πτητική εμπειρία, ενώ ο συνδυασμός με το FPV και τη δημοσίευση σχετικών βίντεο στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, έφερε άλματα στην εξέλιξή τους.



Μια από τις πρώτες ερασιτεχνικές κατασκευές με συμβατικά γυροσκόπια ενός άξονα.

Στο επόμενο διάστημα σχηματίστηκαν διαδικτυακές ομάδες από εθελοντές, όπου βασιζόμενοι σε ανοικτές πλατφόρμες προτυποποίησης, κατάφεραν να αναπτύξουν υλικολογισμικό (firmware) για μονάδες ελέγχου multicopters. Σε αρκετές περιπτώσεις και δεδομένης της ανάμιξης σπουδαστών και μηχανικών ρομποτικής, η ανάπτυξη του firmware περιελάμβανε πολύπλοκους αλγόριθμους σταθεροποίησης και στοιχεία αυτόνομης πτήσης. Ωστόσο λόγω των ανοικτών προτύπων, τα

ηλεκτρονικά σχέδια και το λογισμικό ελέγχου βρίσκονταν ελεύθερα στη διάθεση όλων, πράγμα που οδήγησε Κινεζικές εταιρείες παραγωγής ηλεκτρονικών κυκλωμάτων να αντιγράψουν και να πλημμυρίσουν την αγορά με έτοιμα προϊόντα, για όσους δεν ήταν εξοικειωμένοι με τις ηλεκτρονικές κατασκευές. Ωστόσο ακόμη και έτσι, η αγορά των drones - multicopters βρισκόταν ακόμη στο στάδιο της ιδιοκατασκευής (DIY) και απαιτούσε σημαντικές δεξιότητες για την πλήρη κατασκευή ενός μοντέλου.



Το multiwii project βασίστηκε στο Arduino και σε αισθητήρες από την παιχνιδομηχανή Wii της Nintendo.

Το ίδιο διάστημα άρχισαν να εμφανίζονται και οι πρώτες εμπορικές εταιρείες του χώρου με έτοιμα multicopters, δοκιμασμένα και προρυθμισμένα, μερικά εκ των οποίων εμφανίζονταν με αυξημένη απόδοση και καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις αντίστοιχες υλοποιήσεις ανοικτού λογισμικού. Ήταν η εποχή που τα drones άρχισαν να γίνονται προσιτά στο μη εξειδικευμένο κοινό καθώς, λόγω των ενσωματωμένων συστημάτων ελέγχου, οι απαιτήσεις δεξιοτήτων στο χειρισμό ήταν ελάχιστες.

1.4 Παρόν και Μέλλον

Μέχρι σήμερα η εξέλιξη των drones – multicopters συνεχίζεται με αμείωτους ρυθμούς. Η αύξηση της παραγωγής οδήγησε σε περεταίρω μείωση των τιμών δημιουργώντας μια αγορά δισεκατομμυρίων δολαρίων χωρίς σημάδια κάμψης.



Το Phantom 1 της κινεζικής εταιρείας DJI Innovations βρίσκεται πλέον στην έκδοση 4 και αποτελεί το drone - multicopter με τις περισσότερες πωλήσεις παγκοσμίως

Ταυτόχρονα η εξέλιξη των αισθητήρων αλλά και η αύξηση του λόγου ισχύος προς μέγεθος των embedded συστημάτων, επέτρεψε στα drones να αποκτήσουν χαρακτηριστικά όπως τεχνητή όραση (computer vision) και τεχνητή νοημοσύνη. Πολλά πανεπιστημιακά ερευνητικά προγράμματα βρίσκονται σε εξέλιξη με τη συνδρομή μεγάλων πολυεθνικών εταιρειών, αποδεικνύοντας το έντονο ενδιαφέρον που υπάρχει γύρω από τη εξέλιξη και την είσοδό τους σε νέα πεδία εφαρμογής όπως:

- Logistics – Μεταφορές
- Πρώτες βοήθειες – φυσικές καταστροφές
- Έρευνα και Φυσικές επιστήμες
- Γεωργία Ακριβείας
- Τοπογραφία και Τηλεπισκόπηση

Μόνο το 2015 έγιναν στις ΗΠΑ πάνω από 1 εκατομμύριο πωλήσεις drones, κάτι που ανάγκασε τους αρμόδιους φορείς, κυρίως υπό τον φόβο πιθανών χρήσεων σε τρομοκρατικές επιθέσεις, να εφαρμόσουν νόμους για την πτήση και την κατοχή τους, με αποκορύφωμα την υποχρεωτική καταγραφή όλων των χειριστών που διέθεταν drone βάρους πάνω από συγκεκριμένο όριο. Στην Ελλάδα από την 1/1/2017 θα εφαρμοστεί το



Drone επαγγελματικών προδιαγραφών σε έλεγχο πριν την πτήση

γενικό πλαίσιο πτήσεων Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών - ΣμηΕΑ (ΦΕΚ Β3152 – 30/09/2016) σύμφωνα με τον οποίο, τα drones χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ενώ ο χειριστής του ΣμηΕΑ Ειδικής, Πιστοποιημένης και Ανοικτής Κατηγορίας με εμβέλεια τηλεχειρισμού άνω των 50 μ. εγγράφονται σε ειδικό Μητρώο που τηρείται από την ΥΠΑ. Επίσης απαιτείται ασφαλιστική κάλυψη για τα ΣμηΕΑ Ανοικτής Κατηγορίας σε περίπτωση επαγγελματικής χρήσης, όσο και για τα ΣμηΕΑ της Ειδικής και Πιστοποιημένης κατηγορίας.

Η υλοποίηση multicopter drones πλήρους κλίμακας στις μέρες μας βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο με τροχοπέδη τους παρακάτω λόγους:

- Απαιτούνται ηλεκτροκινητήρες (οι κινητήρες εσωτερικής καύσης έχουν πολύ χαμηλή απόκριση εναλλαγής στροφών, ενώ σχετικές υλοποιήσεις με έλικες μεταβλητού βήματος αυξάνουν δραματικά την πολυπλοκότητα και τα πιθανά σημεία αστοχίας)

- Απαιτούνται πηγές ηλεκτρικής ενέργειας πολύ υψηλής πυκνότητας με μεγάλο κόστος (π.χ. fuel cells)
- Η πτητική εξισορρόπηση γίνεται μόνο ηλεκτρονικά, συνεπώς η παντελής ανάμειξη του ανθρώπινου παράγοντα σε συνδυασμό με την κακή εν γένει αεροδυναμική του σκάφους (αδυναμία ανεμοπορίας ή autorotation) δημιουργεί αυξημένο αίσθημα ανασφάλειας.

1.5 Η Ανατομία ενός Civilian Multicopter Drone

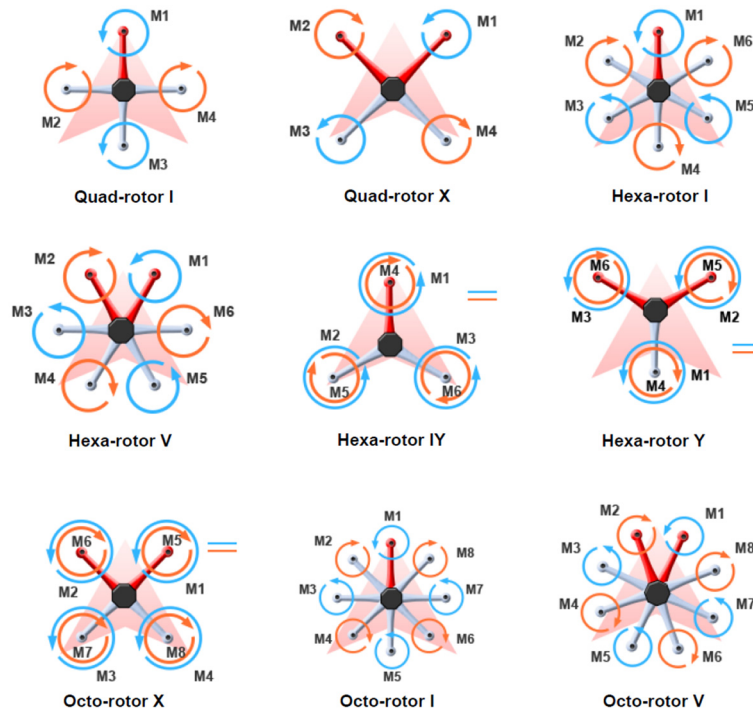
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει στο ευρύ κοινό ο όρος drone να αναφέρεται σε μικρά ελικόπτερα πολλαπλών στροφείων, με δυνατότητες αυτόνομης ή ημιαυτόνομης πλοήγησης και ενσωματωμένη διάταξη εκπομπής video για τη μετάδοση της εικόνας. Τα βασικά μέρη μιας τέτοιου τύπου πλατφόρμας είναι κοινά, είτε πρόκειται για έτοιμα εταιρικά προϊόντα, είτε για ιδιοκατασκευές βασισμένες σε projects ανοικτού λογισμικού.

Τα διακριτά μέρη ενός multicopter drone είναι τα εξής:

Frame (Πλάισιο): Πρόκειται για το σκελετό της πλατφόρμας, πάνω στην οποία θα προσαρμοστούν όλα τα επιμέρους ηλεκτρονικά και μηχανικά μέρη. Τα υλικά κατασκευής περιλαμβάνουν συνήθως πλαστικό, ελαφρά κράματα αλουμινίου και ανθρακονήματα, ώστε το βάρος να είναι το λιγότερο δυνατό. Το μέγεθος και το είδος ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση (π.χ. ένα frame προορισμένο για γεωργικές εργασίες ραντίσματος διαφέρει αρκετά από κάποιο που προορίζεται για βιντεοσκόπηση).

Σε συμμετρικά frames, ως μέγεθος ορίζεται η απόσταση από το κέντρο της θέσης κάθε κινητήρα μέχρι την αντίστοιχη αντιδιαμετρική θέση, ενώ το είδος καθορίζεται από το πλήθος και τη διάταξη των θέσεων των ηλεκτροκινητήρων. Συνήθως, - αν και αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λογισμικό -, τα frames που περιλαμβάνουν περισσότερους από 4 κινητήρες εμφανίζουν πλεονασμό (redundancy) σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος προώθησης και προτιμώνται σε επαγγελματικές εφαρμογές ή περιπτώσεις που απαιτείται αυξημένη ασφάλεια. Στη

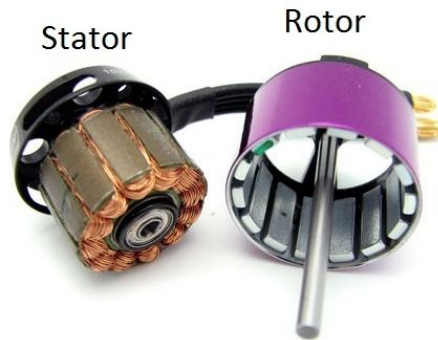
σχετική Αμερικανική Νομοθεσία ο διπλός πλεονασμός (8 κινητήρες) είναι προαπαιτούμενος για drones επαγγελματικών εφαρμογών.



Τύποι πλαισίων για multicopters

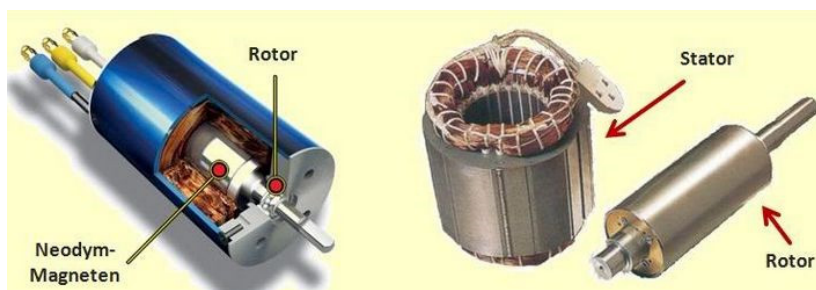
Ηλεκτροκινητήρες (Motors): Αποτελούν το μέρος του συστήματος προώθησης που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική. Το μέγεθος και το είδος τους διαφέρει και πάλι ανάλογα με την εφαρμογή. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους ως κριτήρια επιλογής είναι τα ακόλουθα:

- *Brushless Outrunners / Inrunners*: Οι κινητήρες brushless (τριφασικοί) λειτουργούν με κατάλληλα χρονισμένους παλμούς στα πηνία του στάτορα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συλλέκτης. Παρουσιάζουν μειωμένες τριβές και θερμοκρασίες, μεγάλη αποδοτικότητα και τεράστια αντοχή στο χρόνο. Ανάλογα με το αν ο στάτορας βρίσκεται εξωτερικά ή εσωτερικά του πλαισίου, διαφέρουν σημαντικά στο λόγο ροπής προς στροφές και διακρίνονται σε *outrunners* ή *inrunners* αντίστοιχα. Στην κατασκευή multicopter drones χρησιμοποιούνται αποκλειστικά outrunner τριφασικοί κινητήρες, καθώς είναι οι ιδανικότεροι για απευθείας οδήγηση φορτίου (direct drive).



Μέρη ηλεκτροκινητήρα τύπου *Outrunner*

- *max Watts*: Αναφέρεται στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 10 sec), χωρίς να αστοχήσει η περιέλιξη.
- *KV (rpm/volt)*: Αφορά σε μέγεθος που περιγράφει τις αναμενόμενες πλήρεις στροφές του κινητήρα ανά βολτ εφαρμοζόμενης τάσης. Τα KV καθορίζονται από τον αριθμό τυλιγμάτων στους πόλους του στάτορα και καθορίζουν το λόγο ροπής προς ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Κατά βάση τα μοτέρ χαμηλών KV εμφανίζουν μεγαλύτερη ροπή και είναι ικανότερα στην οδήγηση μεγάλων φορτίων (μεγαλύτερες έλικες). Γενικότερα ο κατάλληλος συνδυασμός αυτού του παράγοντα με το εκάστοτε φορτίο, καθορίζει τη χαρακτηριστική περιοχή στην κλίμακα αποδοτικότητας του κινητήρα, όπου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε έργο με τις μικρότερες δυνατές απώλειες.



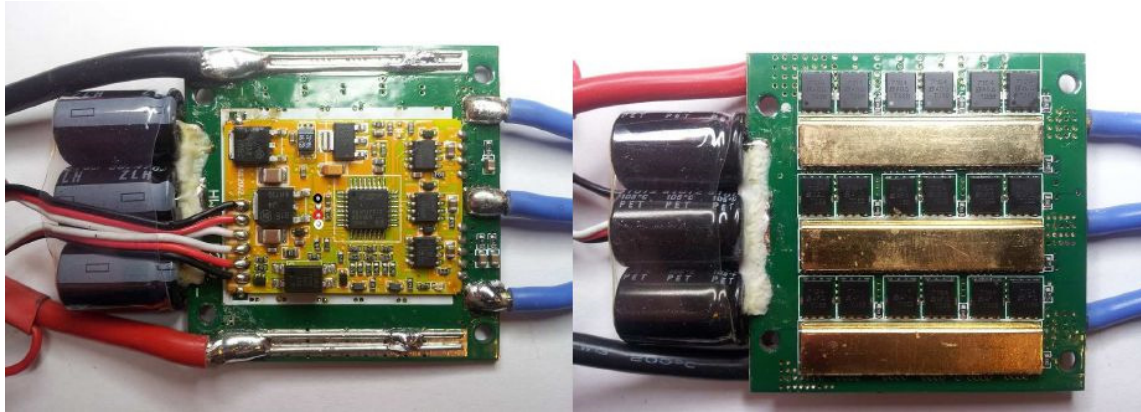
Μέρη ηλεκτροκινητήρα τύπου *inrunner*

- *Pole Count*: Αφορά στον αριθμό των μόνιμων μαγνητικών πόλων που είναι προσαρμοσμένοι στο ρότορα σε τριφασικού τύπου κινητήρες. Αποτελεί έναν πρόσθετο τρόπο ρύθμισης της ισχύος του κινητήρα και της γενικότερης αποδοτικότητάς του.

ESCs (Electronic Speed Controllers): Αποτελούν ηλεκτρονικές διατάξεις ρύθμισης της ταχύτητας των κινητήρων. Στην πραγματικότητα τα κυκλώματα αυτά είναι και ο μόνος τρόπος λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων τύπου brushless, αφού ανάλογα με το πλάτος του σήματος στην είσοδό τους, μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα της πηγής σε ανάλογης τάσης τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, οδηγώντας τους πόλους του στάτορα με κατάλληλη ακολουθία σημάτων. Η λειτουργία των ESCs είναι αρκετά σύνθετη, ελέγχεται από επεξεργαστές με κατάλληλο λογισμικό ενώ οι πιο σημαντικοί παράγοντες λειτουργίας τους είναι οι ακόλουθοι:

- *Cell count (cells)*: Η υποστηριζόμενη τάση τροφοδοσίας εκφρασμένη σε κελιά μπαταρίας λιθίου (π.χ. 2 – 4S ή 7.4 – 14.8v)
- *Max Amps (A)*: Μέγιστα Αμπέρ λειτουργίας.
- *PWM Input Frequency (Hz)*: Καθορίζει τη συχνότητα του σήματος εισόδου με καθιερωμένη τιμή τα 50Hz και πλάτος από 1 μέχρι 2ms. Στις εφαρμογές με drones που οι ανάγκες εναλλαγής της ταχύτητας των κινητήρων για την επίτευξη ισορροπίας είναι μεγάλες, τα ESCs υποστηρίζουν PWM συχνότητες μεγαλύτερες από 600 Hz και πλάτη 0.125 – 0.25ms (Oneshot PWM).
- *Timing (deg)*: Καθορίζει τη συχνότητα των παλμών ανάλογα με την απόκλιση σε μοίρες του μαγνητικού πόλου από το πηνίο του στάτορα. Μεγιστοποιεί την απόδοση του κινητήρα ανάλογα με τους μαγνητικούς του πόλους.
- *Motor PWM (Khz) και Max Speed (eRPM)*: Αποτελούν τη μέγιστη δυνατή συχνότητα του σήματος οδήγησης των πόλων του στάτορα και τη μέγιστη ταχύτητα σε στροφές του υπό σύνδεση κινητήρα. Σχετίζονται άμεσα με τη συχνότητα λειτουργίας του κεντρικού επεξεργαστή και γενικότερα καθορίζουν την ταχύτητα απόκρισης του ESC.

- *Regenerative Braking*: Κατά τις φάσεις που είναι αναγκαία η μείωση των στροφών του κινητήρα, η ενέργεια που παράγεται από την περιστροφή του ρότορα λόγω της αδράνειας, επιστρέφει στην μπαταρία.



Οι δυο όψεις ενός ESC: Η πλακέτα ελέγχου με τον επεξεργαστή και η πλακέτα με τα FET ισχύος.

Έλικες: Αποτελούν το μέρος του συστήματος προώθησης που μετατρέπει την κινητική ενέργεια από τους ηλεκτροκινητήρες σε ώση. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους, αποτελούν η διάμετρος, το βήμα και το πλήθος των πτερύγων, τα οποία πρέπει να επιλεγούν ανάλογα με τα επιθυμητά πτητικά χαρακτηριστικά και την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας.



Ζεύγος ελίκων αντίθετης φοράς από ανθρακόνημα κατάλληλων για Multicopters

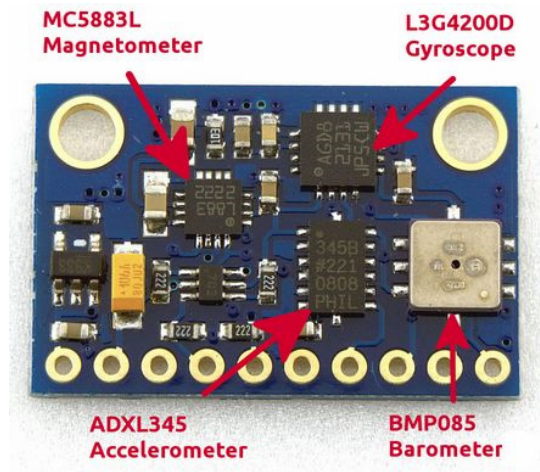
Για παράδειγμα, οι έλικες με μικρότερο βήμα επιτυγχάνουν μεγαλύτερες ροπές και ευνοούν τη σταθερότητα, ενώ οι έλικες με μεγαλύτερη διάμετρο, επιτυγχάνουν με μικρότερη κατανάλωση μεγαλύτερη ώση, θυσιάζοντας τη ροπή και κατ' επέκταση τη σταθερότητα και την αντοχή στις μεταβολές του αέρα.

Η αύξηση του πλήθους των πτερύγων ευνοεί την αύξηση της ώσης, με τίμημα την αυξημένη κατανάλωση, ωστόσο έλικες τριών ή παραπάνω πτερύγων μπορούν να τοποθετηθούν σε περιπτώσεις που δεν δύναται να αυξηθεί η διάμετρος αλλά απαιτείται αυξημένη ώση. Στην περίπτωση των multicopters οι έλικες που χρησιμοποιούνται διαθέτουν ειδική αεροτομή κατάλληλης αεροδυναμικής, ενώ τα υλικά κατασκευής ποικίλουν από Glass Filled Nylon μέχρι ανθρακονήματα.

Flight Controller (Ελεγκτής Πτήσης): Ο ελεγκτής πτήσης περιλαμβάνει όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις που σχετίζονται με τους αισθητήρες και το υλικολογισμικό πτήσης. Συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα από τους αισθητήρες και κάνοντας τους ανάλογους μαθηματικούς υπολογισμούς με τη βοήθεια ενός ήδη εγκατεστημένου λογισμικού, ο κεντρικός επεξεργαστής στέλνει τις σχετικές εντολές διόρθωσης στα ESCs για να μετατραπούν μέσω των κινητήρων σε διορθώσεις εξισορρόπησης ή πορείας. Παράλληλα αναλαμβάνει να επεξεργασθεί τα αιτήματα του χειριστή που καταφθάνουν μέσω του δέκτη ελέγχου αλλά και να αποστείλει δεδομένα τηλεμετρίας για την τρέχουσα κατάσταση των επιμέρους συστημάτων (π.χ. η κατάσταση της μπαταρίας). Συνήθως τα διακριτά υποσυστήματα ενός ελεγκτή πτήσης είναι:

- *IMU (Αδρανειακή Μονάδα)*: Περιλαμβάνει τους αισθητήρες για τον προσδιορισμό της θέσης του σκάφους στο χώρο. Συνήθως η απόδοση δεδομένων για κάθε άξονα στο χώρο, αντιστοιχεί σε ένα βαθμό ελευθερίας (DoF). Οι περισσότερες μονάδες IMU για drones είναι δέκα μονάδων ελευθερίας, περιλαμβάνοντας τριαξονικό γυροσκόπιο (3 DoF), επιταχυνσιόμετρο (3 DoF), μαγνητόμετρο (3 DoF) και βαρόμετρο (1 DoF). Το γυροσκόπιο αποδίδει δεδομένα για το ρυθμό μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας, το επιταχυνσιόμετρο για το μέγεθος της επιτάχυνσης σε κάθε άξονα, το μαγνητόμετρο για την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο χώρο

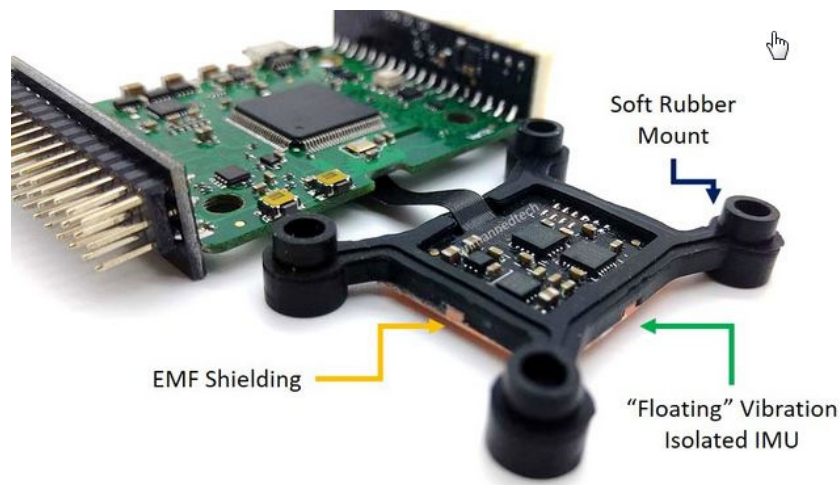
και τέλος το βαρόμετρο για την ατμοσφαιρική πίεση και κατ' επέκταση για τον υπολογισμό του ύψους.



Μονάδα IMU 10 DoF αισθητήρων στερεάς κατάστασης

- **Δέκτης GPS:** Αποτελεί το υποσύστημα που έδωσε στα drones τη δυνατότητα της αυτόνομης πλοήγησης. Αποδίδει δεδομένα για τη σημειακή θέση του drone στο χώρο σε μορφή συντεταγμένων στο σύστημα WGS'84. Τα σύγχρονα υποσυστήματα είναι μικρού μεγέθους και βάρους, υποστηρίζουν μεγάλους ρυθμούς ανανέωσης και μπορούν να λαμβάνουν σήμα από συστήματα δορυφόρων, όπως το Galileo, το Glonass και το BDS. Η ακρίβεια τους βελτιώνεται συνεχώς με την εμφάνιση τους τελευταίους μήνες μονάδων RTK ακρίβειας cm, για επαγγελματικά drones ειδικών εφαρμογών.
- **MCU (Μονάδα Μικροελεγκτή):** Αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του ελεγκτή πτήσης, συνήθως υπό τη μορφή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος SoC (System on a Chip) που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα επιμέρους υποσυστήματα, όπως μνήμη και μονάδες I/O. Ο προγραμματισμός της μονάδας γίνεται με χρήση κατάλληλου λογισμικού περιβάλλοντος (IDE), συνήθως σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου όπως η C++. Το υλικολογισμικό (firmware) εγγράφεται στη μνήμη και εκτελείται από την MCU σε έναν ατέρμονα βρόχο μεγάλης συχνότητας, περιλαμβάνοντας όλη εκείνη τη μαθηματική λογική

που μετατρέπει τα δεδομένα των αισθητήρων και GPS σε χρήσιμο αποτέλεσμα.



Ελεγκτής Πτήσης με τη μονάδα IMU προσαρμοσμένη σε αντικραδασμική βάση

- *Telemetry Transceiver (Μονάδα Τηλεμετρίας)*: Πρόκειται για πομποδέκτη για τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων από και προς το drone. Συνήθως αποτελεί μια ασύρματη σειριακή μονάδα που επιτρέπει στην MCU να στέλνει αλλά και να λαμβάνει δεδομένα, αντίστοιχα με την οθόνη και το πληκτρολόγιο ενός υπολογιστή. Επιτρέπει στο χειριστή να λαμβάνει δεδομένα για την κατάσταση λειτουργίας του drone, όπως π.χ. στίγμα στο χάρτη, κατανάλωση κ.τ.λ. ή να αποστέλλει στοιχεία όπως σχέδια πτήσης ή κατευθυντήρες εντολές.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί και η εμφάνιση των Companion Computer Boards, που αφορούν σε αναπτυξιακές πλατφόρμες ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων με τη μορφή προσθέτων (add on) στους ελεγκτές πτήσης των drones. Οι πλατφόρμες αυτές αναλαμβάνουν να διευθετήσουν το μεγάλο όγκο επεξεργασίας δεδομένων που απαιτείται για προηγμένα χαρακτηριστικά πλοήγησης όπως η τεχνητή όραση και η τεχνητή νοημοσύνη αλλά και η απόδοση αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο σε επιστημονικές εφαρμογές.



Ο Ελεγκτής Πτήσης NAVIO2 με Companion Computer το Raspberry Pi

Μονάδα Gimbal: Η μονάδα αυτή αποτελεί απαραίτητο περιφερειακό για τα drones που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές βιντεοσκόπησης, τηλεπισκόπησης και φωτογραμμετρίας καθώς διατηρεί σταθερή την επιθυμητή θέση της μηχανής λήψης, ανεξάρτητα από τις κλίσεις του πλαισίου του drone. Αποτελείται από το μηχανικό και το ηλεκτρονικό μέρος. Το ηλεκτρονικό μέρος δομείται από ξεχωριστές μονάδες IMU και MCU ωστόσο μπορεί να επικοινωνεί μέσω ειδικών πρωτοκόλλων (π.χ. Mavlink) ή PWM σημάτων με τη μονάδα του ελεγκτή πτήσης, δεχόμενο εντολές για αλλαγή κλίσης στους τρεις άξονες του χώρου. Το μηχανικό μέρος αποτελείται από το πλαίσιο (gimbal frame) το οποίο επιτρέπει την κίνηση σε 2 ή 3 άξονες του χώρου, με τη βοήθεια σερβομηχανισμών ή direct drive τριφασικών κινητήρων πολύ χαμηλών KV. Τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει καθολικά η χρήση brushless κινητήρων έναντι των σερβομηχανισμών, καθώς το έλλειμά τους σε ροπή αντισταθμίζεται από τον πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης, κάτι που μεταφράζεται σε σταθερά πλάνα και φωτογραφίες με χαμηλές αποκλίσεις.

Μονάδα Video Downstream: Μια de facto προσθήκη στα «καταναλωτικά» drones αλλά και σε όλα τα drones που σχετίζονται με την εικόνα. Ένας πομπός video μεταδίδει ασύρματα την εικόνα από τη μηχανή ή τις μηχανές λήψης στην οθόνη του χειριστή, επιτρέποντας την

αποτίμηση της πληροφορίας ανάλογα με την εφαρμογή. Η μετάδοση μπορεί να είναι αναλογική ή ψηφιακή, με την ψηφιακή να αρχίζει να κερδίζει έδαφος πολύ πρόσφατα, λόγω προβλημάτων εμβέλειας και καθυστέρησης στη μετάδοση (latency).



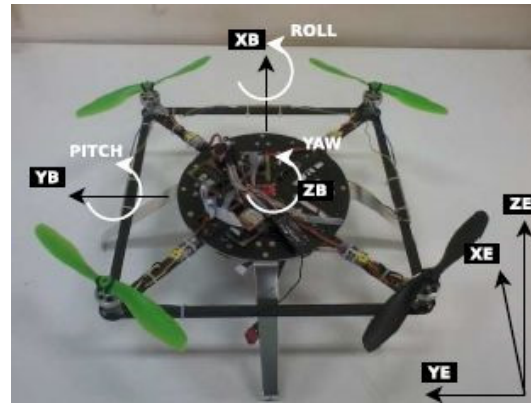
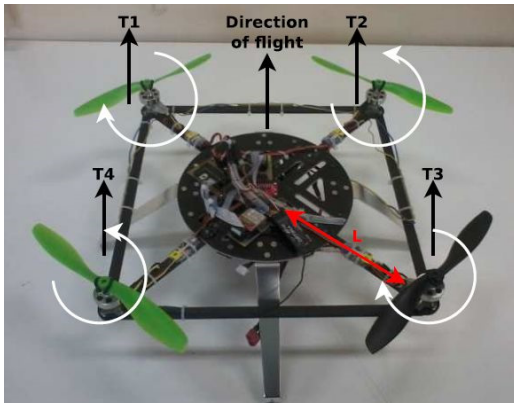
Μονάδα Gimbal τριών αξόνων για φωτογραφικές μηχανές DSLR

1.6 Ανάλυση Λειτουργίας

Στα συμβατικά ελικόπτερα η ώση επιτυγχάνεται με αύξηση των στροφών και του βήματος στις έλικες, η κίνηση με αλλαγή της κλίσης του ρότορα, ενώ η στροφή με αλλαγές στην ισορροπία μεταξύ των στροφορμών του κεντρικού και πίσω ρότορα.

Στα multicopters η ώση, η κίνηση αλλά και η στροφή επιτυγχάνονται μόνο με αλλαγές στις στροφές των ηλεκτροκινητήρων οι οποίοι ελέγχονται ηλεκτρονικά, χωρίς πολύπλοκες μηχανικές διατάξεις.

Ας θεωρηθεί η περίπτωση ενός multicopter με 4 ρότορες (τετρακόπτερο) που αποτελεί και την απλούστερη διάταξη:



Ορίζονται ως:

- $\omega_1, \dots, \omega_4 \rightarrow$ οι ταχύτητες περιστροφής των ελίκων
- $T_1, \dots, T_4 \rightarrow$ οι αντίστοιχες δυνάμεις ώσης
- $mg \rightarrow$ το βάρος του σκάφους
- $M_1, \dots, M_4 \rightarrow$ οι ροπές από κάθε δύναμη ώσης ως προς το κέντρο βάρους και ίσες με $M_i = T_i \cdot L$
- (x_E, y_E, z_E) το αδρανειακό (γήινο) σύστημα αναφοράς και (x_B, y_B, z_B) το σύστημα αναφοράς του σκάφους
- (ϕ, θ, ψ) οι γωνίες Euler που ορίζονται ως:
 - Roll, ϕ : γωνία περιστροφής γύρω από τους άξονες $x_B \parallel x_E$
 - Pitch, θ : γωνία περιστροφής γύρω από τους άξονες $y_B \parallel y_E$
 - Yaw, ψ : γωνία περιστροφής γύρω από τους άξονες $z_B \parallel z_E$
- οι παράγωγοι των (ϕ, θ, ψ) ως προς το χρόνο που συμβολίζονται $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ και αντιπροσωπεύουν τη γωνιακή ταχύτητα ή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις:

Ισορροπία (Hovering):

- Ισορροπία δυνάμεων $\rightarrow \sum_{i=1}^4 T_i = -mg$
- Παραλληλία διανυσμάτων $\rightarrow T_1, \dots, T_4 \parallel g$
- Ισορροπία Ροπών $\rightarrow \sum_{i=1}^4 M_i = 0$
- Ισορροπία ταχυτήτων περιστροφής $\rightarrow (\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) = 0$

και κατά συνέπεια $\dot{\phi} = 0, \dot{\theta} = 0, \dot{\psi} = 0$ και $\phi = 0, \theta = 0, \psi = 0$

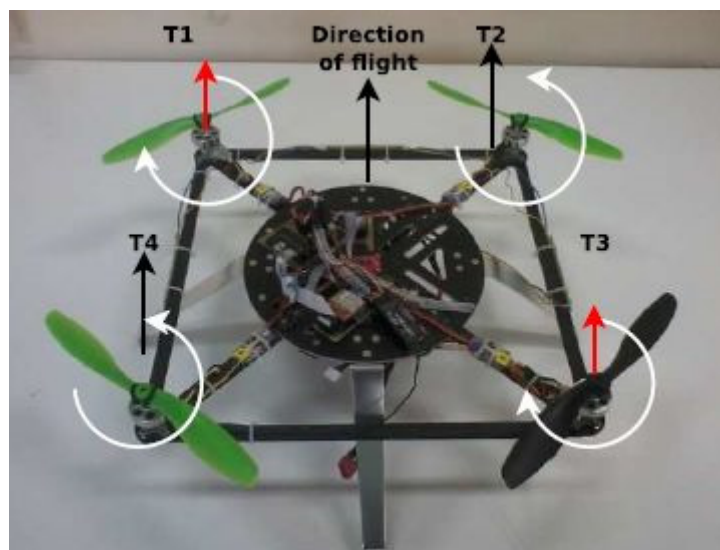
Κίνηση Πάνω και Κάτω (Up and Down):

- **Ανισορροπία** δυνάμεων $\rightarrow \sum_{i=1}^4 T_i \neq -mg$
- Παραλληλία διανυσμάτων $\rightarrow T_1, \dots, T_4 \parallel g$
- Ισορροπία Ροπών $\rightarrow \sum_{i=1}^4 M_i = 0$
- Ισορροπία ταχυτήτων περιστροφής $\rightarrow (\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) = 0$
 $\dot{\phi} = 0, \dot{\theta} = 0, \dot{\psi} = 0$ και $\phi = 0, \theta = 0, \psi = 0$

και ιδιαίτερα όταν:

- $\sum_{i=1}^4 T_i > -mg$ πραγματοποιείται κίνηση προς τα πάνω (αύξηση της ταχύτητας περιστροφής σε **όλους** τους κινητήρες)
- $\sum_{i=1}^4 T_i < -mg$ πραγματοποιείται κίνηση προς τα κάτω (μείωση της ταχύτητας περιστροφής σε **όλους** τους κινητήρες)

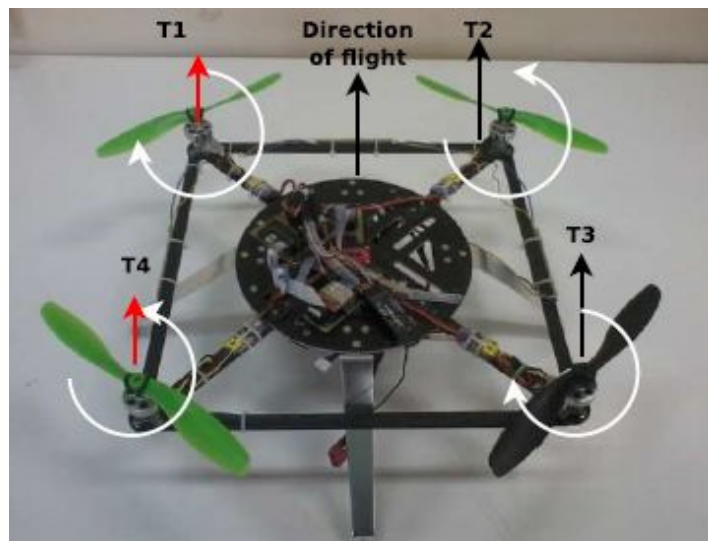
Στροφή (Yaw Rotation):



- Ισορροπία δυνάμεων $\rightarrow \sum_{i=1}^4 T_i = -mg$
- Παραλληλία διανυσμάτων $\rightarrow T_1, \dots, T_4 \parallel g$
- Ισορροπία Ροπών $\rightarrow \sum_{i=1}^4 M_i = 0$
- **Ανισορροπία** ταχυτήτων περιστροφής $\rightarrow (\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) \neq 0$

Με αποτέλεσμα $\dot{\psi} = K_{yaw} ((\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4))$ και $\psi = \int \dot{\psi} dt$

Κίνηση Αριστερά - Δεξιά (Roll Rotation):

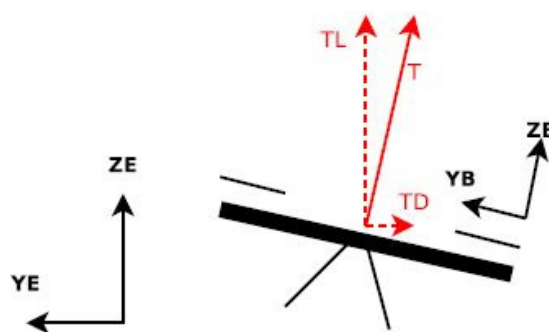


Με **ανισορροπία** ταχυτήτων περιστροφής έτσι ώστε

$$(\omega_1 + \omega_4) - (\omega_2 + \omega_3) \neq 0$$

προκαλείται ανισορροπία ροπών $\sum_{i=1}^4 M_i \neq 0$

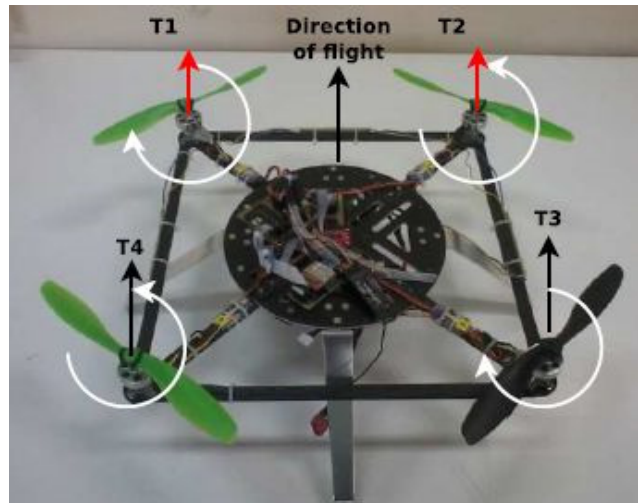
με αποτέλεσμα να μην υπάρχει παραλληλία μεταξύ των διανυσμάτων των δυνάμεων (T_1, \dots, T_4) και της επιτάχυνσης της βαρύτητας g , ενώ ισχύει $\dot{\phi} = K_{Roll} ((\omega_1 + \omega_4) - (\omega_2 + \omega_3))$ και $\phi = \int \dot{\phi} dt$



Κατά την κλίση του drone, η συνολική ώση $T = \sum_{i=1}^4 T_i$ αναλύεται στις συνιστώσες $TL = T \cos \phi$ και $TD = T \sin \phi$ εκ των οποίων η TD δημιουργεί την κίνηση δεξιά (ή αριστερά). Για να αποφευχθεί το φαινόμενο του diving θα πρέπει $TL = T \cos \phi = -mg$ με αποτέλεσμα να

απαιτείται περισσότερη παροχή ισχύος για τη διατήρηση του ύψους σε σχέση με τις περιπτώσεις αιώρησης ή στροφής.

Κίνηση Εμπρός - Πίσω (Pitch Rotation):



Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, με **ανισορροπία** ταχυτήτων περιστροφής έτσι ώστε

$$(\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4) \neq 0$$

προκαλείται ανισορροπία ροπών $\sum_{i=1}^4 Mi \neq 0$ και μη παραλληλία διανυσμάτων (T_1, \dots, T_4) και g , ενώ ισχύει $\dot{\theta} = K_{Pitch} ((\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4))$ και $\theta = \int \dot{\theta} dt$

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και θεωρώντας έναν κοινό παράγοντα k και μια συνολική ώση F προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης που αποδίδουν τις γωνιακές ταχύτητες του σκάφους, δεδομένων των ταχυτήτων περιστροφής των κινητήρων:

$$\dot{\phi} = k((\omega_1 + \omega_4) - (\omega_2 + \omega_3)) = k\omega_1 - k\omega_2 - k\omega_3 + k\omega_4$$

$$\dot{\theta} = k((\omega_1 + \omega_2) - (\omega_3 + \omega_4)) = k\omega_1 + k\omega_2 - k\omega_3 - k\omega_4$$

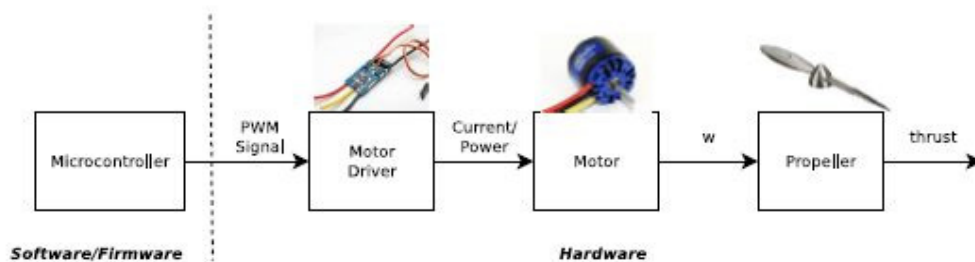
$$\dot{\psi} = k((\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4)) = k\omega_1 - k\omega_2 + k\omega_3 - k\omega_4$$

$$F = k((\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4)) = k\omega_1 + k\omega_2 + k\omega_3 + k\omega_4$$

που μπορούν να γραφούν σαν

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & -k & -k & k \\ k & k & -k & -k \\ k & -k & k & -k \\ k & k & k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} \quad \text{ή} \quad \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = K^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ F \end{pmatrix}$$

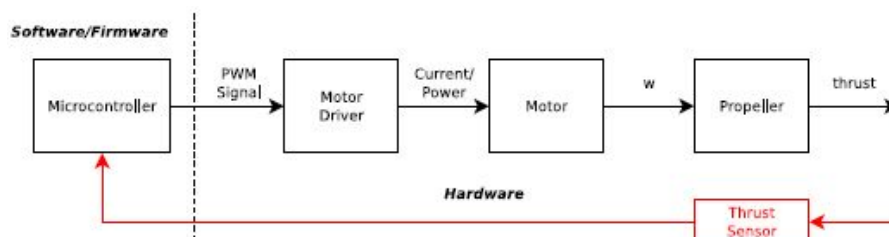
Συνεπώς για τον έλεγχο του σκάφους αρκεί η ρύθμιση των ω_i προκειμένου να επιβληθεί ένας συγκεκριμένος ρυθμός περιστροφής σε κάθε άξονά του. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, αυτό πραγματοποιείται με την οδήγηση των ESCs με σήματα PWM (pulse width modulation) μεταβλητού πλάτους.



Το σχήμα οδήγησης και ελέγχου των κινητήρων για παραγωγή ώσης

Στην πραγματικότητα όμως δεν υπάρχει απευθείας έλεγχος στην παραγωγή της ώσης F μέσω των στροφών για την ικανοποίηση της εξίσωσης, λόγω κατασκευαστικών ατελειών στα χαρακτηριστικά των επιμέρους συστημάτων (κινητήρες, έλικες, κ.τ.λ.). Τη λύση έρχεται να δώσει η εφαρμογή του ελεγκτή ανάδρασης (feedback controller) από τη θεωρία συστημάτων αυτόματου ελέγχου, σύμφωνα με την οποία:

1. Γίνεται μέτρηση του υπό εξέταση μεγέθους με τη βοήθεια κατάλληλου αισθητήρα
2. Συγκρίνεται το αποτέλεσμα με το επιθυμητό σημείο ελέγχου
3. Εφαρμόζεται διόρθωση στο σύστημα βάση του σφάλματος
4. Επιστροφή στο 1.



Ο πιο διαδεδομένος ελεγκτής ανάδρασης είναι ο **PID** από τα αρχικά των λέξεων Proportional – Integral – Derivative, ο οποίος για μέγεθος e ορίζεται από τη συνάρτηση

$$C(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{de(t)}{dt}$$

όπου για την k -στη στιγμή δειγματοληψίας από τον αισθητήρα υπολογίζεται από τη σχέση

$$C(k) = Kp e(k) + Ki \sum_{j=0}^k e(j) \Delta T + Kd \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta T}$$

Οι σταθερές Kp, Ki, Kd ρυθμίζουν τη συμπεριφορά του ελεγκτή PID. Το Kp αφορά στη βραχυπρόθεσμη διόρθωση, το Ki στην μακροπρόθεσμη και το Kd στη διόρθωση με βάση την τάση του σφάλματος. Οι τιμές των Kp, Ki, Kd είναι χαρακτηριστικές για κάθε σύστημα και προσδιορίζονται είτε με δοκιμές, είτε με αυτοματοποιημένες μεθόδους που στηρίζονται σε συγκεκριμένη μεθοδολογία, όπως η Ziegler-Nichols. Στην περίπτωση ενός multicopter drone, η τιμή του Kp εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του σκάφους (μέγεθος πλαισίου, βάρος, ώση, κ.τ.λ.), η τιμή του Ki σχετίζεται με το βαθμό ευστάθειας και απόρριψης της επίδρασης εξωτερικών παραγόντων, ενώ η τιμή του Kd με τη βελτίωση των διορθώσεων του Kp (overshooting regulation).

Αν οριστούν ως $(\dot{\phi}_M, \dot{\theta}_M, \dot{\psi}_M)$ οι πραγματικές γωνιακές ταχύτητες του σκάφους που προκύπτουν από τις μετρήσεις ενός γυροσκοπίου και ως $(\dot{\phi}_T, \dot{\theta}_T, \dot{\psi}_T)$ οι επιθυμητές γωνιακές ταχύτητες που έρχονται ως εντολές του χειριστή, τότε το πρόγραμμα που θα εκτελούσε το MCU σε μορφή ψευδοκώδικα θα μπορούσε να είναι:

```

while True do
    On  $\Delta T$  timer tick ;
     $(\dot{\phi}_T, \dot{\theta}_T, \dot{\psi}_T, F) = \text{sample\_remote\_control}()$ ;
     $(\dot{\phi}_M, \dot{\theta}_M, \dot{\psi}_M) = \text{sample\_gyro}()$ ;
     $e_{\dot{\phi}} := \dot{\phi}_T - \dot{\phi}_M$ ;    $e_{\dot{\theta}} := \dot{\theta}_T - \dot{\theta}_M$ ;    $e_{\dot{\psi}} := \dot{\psi}_T - \dot{\psi}_M$ ;
     $C_{\dot{\phi}} := \text{roll\_rate\_controller}(e_{\dot{\phi}})$ ;
     $C_{\dot{\theta}} := \text{pitch\_rate\_controller}(e_{\dot{\theta}})$ ;
     $C_{\dot{\psi}} := \text{yaw\_rate\_controller}(e_{\dot{\psi}})$ ;
     $(pwm_1, pwm_2, pwm_3, pwm_4)^T := K^{-1}(C_{\dot{\phi}}, C_{\dot{\theta}}, C_{\dot{\psi}}, F)^T$ ;
    send_to_motors( $pwm_1, pwm_2, pwm_3, pwm_4$ );
end

```

← PID controller functions / axis

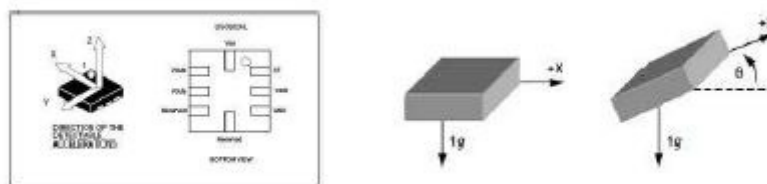
Σύμφωνα όμως με τα παραπάνω οι μετρήσεις που γίνονται αφορούν γωνιακές ταχύτητες και όχι γωνίες. Αυτό αποτελεί πρόβλημα καθώς αν θεωρηθεί για παράδειγμα πως

- η γωνία $\phi = 10^\circ$
- δεν υπάρχει περιστροφή περί τους άξονες $x_B \parallel x_E$ (Roll), δηλαδή $\dot{\phi} = 0$
- δεν υπάρχει εντολή για περιστροφή από το χειριστή

τότε το σκάφος δεν βρίσκεται σε οριζόντια θέση και εκτελεί μετακίνηση αριστερά ή δεξιά. Συνεπώς είναι αναγκαία η εύρεση τρόπου για τη μέτρηση των γωνιών και όχι του ρυθμού μεταβολής τους.

Τα γυροσκόπια μετρούν γωνιακές ταχύτητες οι οποίες μπορούν να ολοκληρωθούν στο χρόνο και να αποδώσουν γωνίες. Οι μετρήσεις όμως αυτές δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες για μεγάλα χρονικά διαστήματα, λόγω προσεγγιστικών σφαλμάτων, αποκλίσεων και θερμοκρασιακής ολίσθησης αυτού του τύπου αισθητήρων.

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν και μετρούν την επιτάχυνση στους τρεις άξονες (a_x, a_y, a_z) του συστήματος αναφοράς τους, με αποτέλεσμα όταν αυτός είναι ακίνητος, τα μετρούμενα μεγέθη να είναι οι προβολές του διανύσματος g της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε αυτούς τους άξονες.



Με βάση τα παραπάνω οι γωνίες ϕ (Roll) και θ (Pitch) προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-a_y}{-a_z} \text{ και } \theta = \tan^{-1} \frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}$$

Ωστόσο αν ο αισθητήρας δέχεται δονήσεις, όπως συνήθως συμβαίνει στα drones, εμφανίζονται και άλλου τύπου επιταχύνσεις με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην είναι και πάλι αξιόπιστες.

Τη λύση έρχονται να δώσουν οι αλγόριθμοι sensor fusion, βάση των οποίων μπορούν να αξιοποιηθούν και να συνδυαστούν οι δυο τύπου μετρήσεις προκειμένου να προσαρμοστεί κατάλληλα το σφάλμα και να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία. Τέτοιου τύπου αλγόριθμοι είναι οι:

- DCM (Direction Cosine Matrix)
- Complementary filters
- Kalman filters

που έχουν ως βασικό στόχο το προσδιορισμό μιας συνάρτησης σφάλματος

$$e(t) = \text{real}(t) - \text{estimated}(t)$$

και την εφαρμογή κατάλληλων μετατροπών έτσι ώστε

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0.$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν οριστεί ως `fusion_filter()` η συνάρτηση εφαρμογής του αλγορίθμου sensor fusion και ρυθμιστεί κατάλληλα ο χρονισμός εκτέλεσης του τμήματος εφαρμογής των εντολών του χειριστή, ο ψευδοκώδικας που εκτελεί το MCU θα μπορούσε να είναι:

while True do

 On T_r timer tick ;

$(\dot{\phi}_M, \dot{\theta}_M, \dot{\psi}_M) = \text{sample_gyro}();$

$(a_x, a_y, a_z) = \text{sample_accel}();$

$(\phi_M, \theta_M) = \text{fusion_filter}(\dot{\phi}_M, \dot{\theta}_M, \dot{\psi}_M, a_x, a_y, a_z);$

if after N loops then

$(\phi_T, \theta_T, \psi_T, F) = \text{sample_remote_control}();$

$\dot{\phi}_T := \text{roll_controller}(\phi_M, \phi_T);$

$\dot{\theta}_T := \text{pitch_controller}(\theta_M, \theta_T);$

end

$C_{\dot{\phi}} := \text{roll_rate_controller}(\dot{\phi}_M, \dot{\phi}_T);$

$C_{\dot{\theta}} := \text{pitch_rate_controller}(\dot{\theta}_M, \dot{\theta}_T);$

$C_{\dot{\psi}} := \text{yaw_rate_controller}(\dot{\psi}_M, \dot{\psi}_T);$

$(\text{pwm}_1, \text{pwm}_2, \text{pwm}_3, \text{pwm}_4)^T := K^{-1}(C_{\dot{\phi}_T}, C_{\dot{\theta}_T}, C_{\dot{\psi}_T}, F)^T;$

`send_to_motors(pwm1, pwm2, pwm3, pwm4);`

Στις περιπτώσεις αυτόνομης πλοήγησης στο χώρο, διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

Έλεγχος ύψους πτήσης

Αν οριστούν ως:

- $H_T \rightarrow$ το επιθυμητό ύψος πτήσης
- $H_M \rightarrow$ το μετρούμενο ύψος πτήσης από αισθητήρα (βαρόμετρο)
- $F \rightarrow$ μεταβλητή ελέγχου (στην περίπτωση αυτή, η συνολική ώση)
- $M \cdot T_r \rightarrow$ χρόνος δειγματοληψίας για τον έλεγχο του ύψους

τότε ο σχετικός ψευδοκώδικας θα μπορούσε να είναι:

```
while True do
  On  $T_r$  timer tick ;
  ...;
  if after  $M$  loops then
     $H_M = \text{sample\_altitude\_sensor}()$ ;
     $F := \text{altitude\_controller}(H_M, H_T)$ ;
  end
  ...
end
```

Πλοήγηση με GPS

Αν οριστούν ως:

- $Lat_T, Lon_T \rightarrow$ η επιθυμητή θέση (γεωγραφικό πλάτος και μήκος)
- $Lat_M, Lon_M \rightarrow$ η τρέχουσα θέση που μετρά το GPS
- $\phi_T, \theta_T \rightarrow$ μεταβλητές ελέγχου (Roll και Pitch)
- $G \cdot T_r \rightarrow$ χρόνος δειγματοληψίας GPS και ελέγχου της πλοήγησης

τότε με την παραδοχή ότι δεν είναι αναγκαία η χρήση αισθητήρα μαγνητικού πεδίου, ο σχετικός ψευδοκώδικας θα μπορούσε να είναι:

```
while True do
  On  $T_r$  timer tick ;
  ...;
  if after  $G$  loops then
     $(Lat_M, Lon_M) = \text{sample\_gps}()$ ;
     $\phi_T := \text{gps\_lon\_controller}(Lon_M, Lon_T)$ ;
     $\theta_T := \text{gps\_lat\_controller}(Lat_M, Lat_T)$ ;
  end
  ...
end
```


ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Ως φωτογραμμετρία ορίζεται η τέχνη, επιστήμη και τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων, προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και άλλων φαινομένων.

Η φωτογραμμετρία είναι κατάλληλη για πολύ μεγάλα, πολύ μικρά, μεταβλητά, απρόσιτα και πολύπλοκα αντικείμενα, καθώς και όταν απαιτείται μεγάλο πλήθος λεπτομερειών ή δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το είδος των μετρήσεων που θα χρειαστούν. Η ακρίβεια της φωτογραμμετρίας δεν οριοθετείται αλλά προκαθορίζεται.

Στα υπέρ της χρήσης της φωτογραμμετρίας περιλαμβάνονται:

- Η ταυτόχρονη καταγραφή ποσοτικής και ποιοτικής πληροφορίας
- Οι ταχύτατες διαδικασίες καταγραφής
- Η δυνατότητα καταγραφής σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή
- Η ιδιότητά της ως τηλεμετρική μέθοδος.

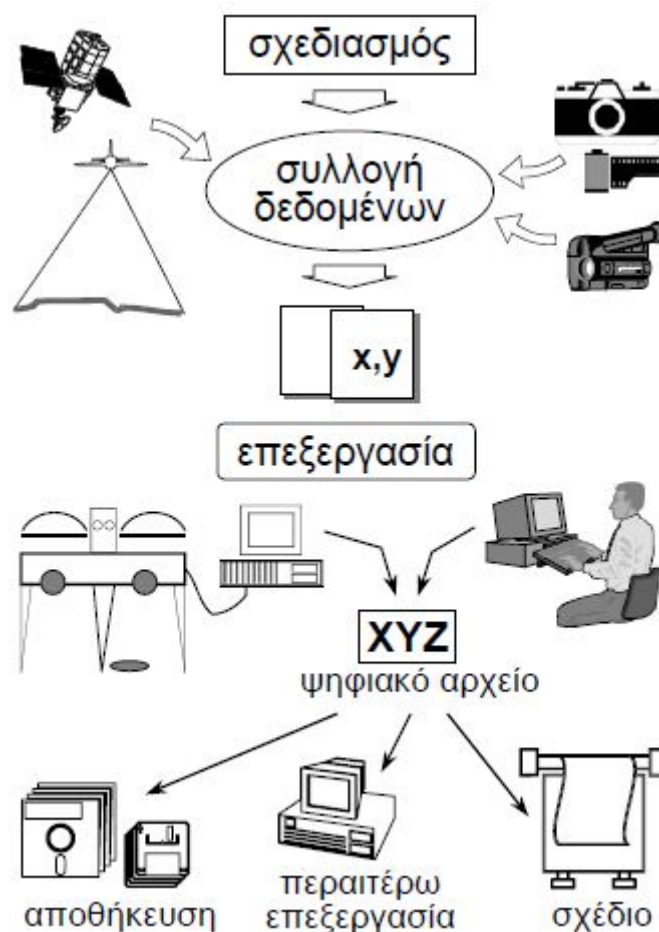
..ενώ στα κατά:

- Η ανάγκη ύπαρξης εξειδικευμένου προσωπικού για επεξεργασία δεδομένων και εργασία υπαίθρου
- Ο εξειδικευμένος και υψηλός κόστους εξοπλισμός
- Η εξάρτηση από γεωδαιτικές μετρήσεις.

Μια τυπική διαδικασία φωτογραμμετρικής απόδοσης, αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

Σχεδιασμός: Περιλαμβάνει την κατάστρωση των στρατηγικών και την οριοθέτηση των προδιαγραφών για την εξασφάλιση της καταλληλότητας των εικόνων που θα χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, η αποτίμηση των διατιθέμενων μέσων (μηχανή λήψης, φακοί), η απαιτούμενη ακρίβεια σε συνδυασμό με τη ζητούμενη κλίμακα του τελικού προϊόντος και ο προγραμματισμός πτήσης εντάσσονται στα πλαίσια του φωτογραμμετρικού σχεδιασμού.

Συλλογή Δεδομένων: Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η λήψη των εικόνων οι οποίες και συνιστούν το πρωταρχικό στοιχείο εισόδου. Ανάλογα με τη μεθοδολογία επίλυσης, (π.χ. Αεροτριγωνισμός) συλλέγονται επιπλέον δεδομένα, όπως στοιχεία GPS και τοπογραφικές μετρήσεις.



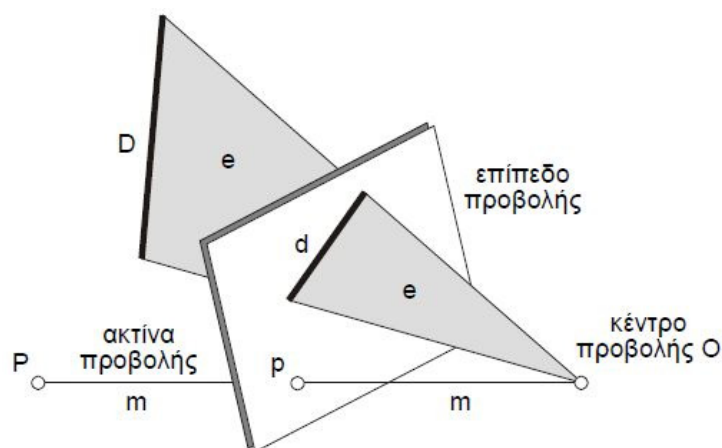
Βήματα φωτογραμμετρικής διαδικασίας

Επεξεργασία: Στις εικόνες μετρούνται σημεία ενδιαφέροντος (εικονοσημεία), με προϊόν τις συντεταγμένες τους x, y στην εικόνα (εικονοσυντεταγμένες). Με τη βοήθεια των εικονοσυντεταγμένων γίνεται ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων (X, Y, Z) των μετρημένων εικονοσημείων. Τα υπολογισμένα σημεία του χώρου καταγράφονται σε ψηφιακό αρχείο και μπορούν στη συνέχεια είτε να σχεδιαστούν είτε να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία για να παραχθεί ποικιλία φωτογραμμετρικών προϊόντων, όπως λ.χ. ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DTM) και ορθοφωτοχάρτες.

Η φωτογραμμετρική απόδοση του 3D χώρου είναι μια σύνθετη διαδικασία που εμπλέκει πολλές παραμέτρους και μοιραία πολλές πηγές σφάλματος. Πριν γίνει αναφορά σε σύνθετες μεθόδους όπως ο Αεροτριγωνισμός, θα πρέπει πρωταρχικά να γίνει περιγραφή εννοιών που σχετίζονται με την εικόνα και τη γεωμετρική περιγραφή της, των βασικών συστημάτων αναφοράς που επιτρέπουν αυτήν την περιγραφή και τέλος των θεμελιωδών φωτογραμμετρικών προβλημάτων με μία και δύο εικόνες.

2.2 Βασικές Ιδιότητες Κεντρικής Προβολής

Στη φωτογραμμετρία η εικόνα προσεγγίζεται γεωμετρικά με το μοντέλο της κεντρικής προβολής. Η χρήση του όρου της προσέγγισης δεν είναι τυχαία καθώς η εικόνα, λόγω σφαλμάτων των φακών αλλά και λόγω πολλών άλλων παραγόντων που επενεργούν στη φυσική διαδικασία της απεικόνισης (π.χ. ατμοσφαιρική διάθλαση), δεν είναι μια αυστηρή κεντρική προβολή. Στο μοντέλο της κεντρικής προβολής τα σημεία του χώρου προβάλλονται σε ένα επίπεδο προβολής (π.χ. αισθητήρας στις ψηφιακές μηχανές) μέσω μιας δέσμης ακτινών, οι οποίες διέρχονται στο σύνολό τους από το κέντρο προβολής (προβολικό κέντρο ή σημείο λήψης). Αποτέλεσμα της κεντρικής προβολής, και κατ' επέκταση μιας φωτογραφικής απεικόνισης, είναι ένα σύνολο εικονοσημείων τα οποία συγκροτούν μια προοπτικά παραμορφωμένη άποψη του αντικειμένου, δηλαδή μια προοπτική απεικόνισή του.



Κεντρική προβολή σημείου και ευθείας

Ιδιαίτερη σημασία για τη φωτογραμμετρία παρουσιάζουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της κεντρικής προβολής:

Μεταβλητή Κλίμακα: Κυριότερη ιδιότητα της φωτογραφικής εικόνας ως προοπτική απεικόνιση, είναι η μεταβλητή κλίμακα, η ανομοιομορφία δηλαδή των μεγεθών στην εικόνα, πολλές φορές με έντονες διακυμάνσεις από σημείο σε σημείο. Γενικά η κλίμακα εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, και συγκεκριμένα:

- την απόσταση φακού-αντικειμένου ή το ύψος πτήσης στην περίπτωση της αεροφωτογραφίας
- από το ανάγλυφο της περιοχής ή την προοπτική (βάθος) των αντικειμένων
- από το είδος του φακού
- από την κλίση του άξονα της μηχανής ως προς τον άξονα λήψης

Με βάση τα παραπάνω και εφόσον η κλίμακα της εικόνας εξαρτάται τοπικά από το υψόμετρο του σημείου του εδάφους και άρα διαφέρει από σημείο σε σημείο, στη φωτογραμμετρία υιοθετείται η βασική έννοια της σημειακής κλίμακας, όπου κάθε σημείο i απεικονίζεται υπό τη δική του κλίμακα $1:k_i$, και ισχύει:

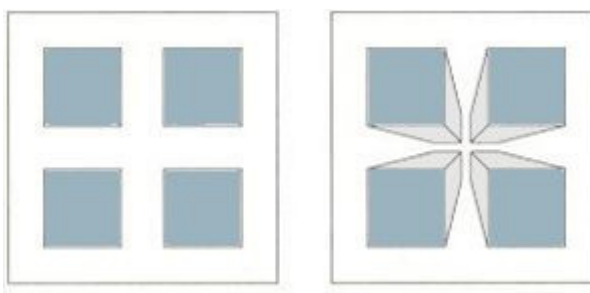
$$\frac{1}{k_i} = \frac{c}{H_i}$$

όπου k ο συντελεστής κλίμακας, c η σταθερά της μηχανής η οποία για αεροφωτογραφίες θεωρείται ισοδύναμη της εστιακής απόστασης του φακού και H_i η απόσταση φακού – αντικειμένου ή το ύψος πτήσης. Η παραπάνω σχέση αφορά σε αυστηρά κατακόρυφες λήψεις ή λήψεις με άξονα παράλληλο στη διεύθυνση του βάθους. Ωστόσο λόγω της ανάγκης περιγραφής της κλίμακας της εικόνας με μια τιμή, γίνεται χρήση της μέσης κλίμακας ή απλά κλίμακας της εικόνας, που αναφέρεται σε μια προσεγγιστική μέση απόσταση από το αντικείμενο ή ένα προσεγγιστικό μέσο υψόμετρο στην περίπτωση της αεροφωτογραφίας. Η μέση κλίμακα

έχει νόημα σε όσες εικόνες παρουσιάζουν σχετικά μικρές διακυμάνσεις κλίμακας όπως η κατακόρυφη αεροφωτογραφία όπου το ανάγλυφο του εδάφους είναι γενικά μικρό συγκρινόμενο με το ύψος πτήσης.

Τέλος και σύμφωνα με τα προηγούμενα, για σταθερή κλίμακα c : Η μεγάλες μεταβολές κλίμακας εμφανίζονται σε φακούς μικρής εστιακής απόστασης (ευρυγώνιους), με αποτέλεσμα αυτοί να παρουσιάζουν εντονότερη προοπτική.

Εκτροπή λόγω Ανάγλυφου: Η μεταβλητή κλίμακα σε μια εικόνα έχει ως άμεση συνέπεια την εκτροπή λόγω ανάγλυφου, δηλαδή την καταγραφή στην εικόνα στοιχείων και των τριών διαστάσεων του χώρου και όχι μόνο των δύο, όπως συμβαίνει σε ένα χάρτη που αποτελεί ορθή προβολή.

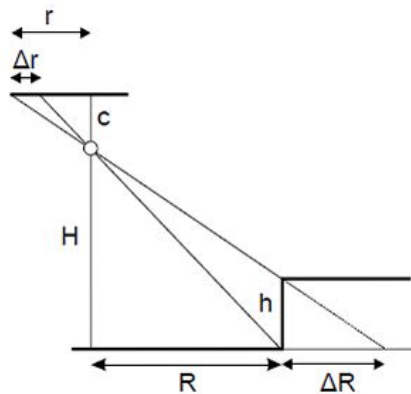


Χάρτης (ορθή προβολή) και αεροφωτογραφία (κεντρική προβολή)

Τα κατακόρυφα στοιχεία των αντικειμένων καταγράφονται ως οριζόντια ακτινικά μήκη, τα οποία κατευθύνονται προς το κέντρο της εικόνας. Αυτές οι ακτινικές εκτροπές λόγω ανάγλυφου Δr , περιγράφονται από τη σχέση:

$$\Delta r = \frac{rh}{H}$$

..συνεπώς είναι ανάλογες των κατακόρυφων στοιχείων h των αντικειμένων, μεγαλώνουν στα άκρα της εικόνας ενώ μηδενίζονται στο κέντρο της και είναι αντιστρόφως ανάλογες της απόστασης λήψης.



Εκτροπή Δr λόγω αναγλύφου h

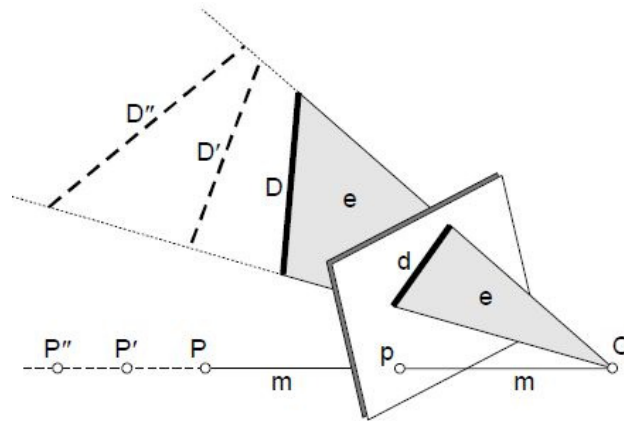
Ωστόσο η εκτροπή λόγω ανάγλυφου ανηγμένη στο έδαφος δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta R = h \frac{r}{c}$$

..με αποτέλεσμα για το ίδιο ύψος αντικειμένου h και την ίδια ακτινική απόσταση r , να είναι μικρότερη για φακούς μεγάλης εστιακής απόστασης (π.χ. τηλεφακούς). Αυτό έχει μεγάλη σημασία στον προγραμματισμό λήψεων καθώς μεγαλύτερη εκτροπή λόγω ανάγλυφου σημαίνει και μεγαλύτερες αποκρύψεις λεπτομερειών στις εικόνες, δηλαδή περισσότερες «τυφλές περιοχές» που οφείλονται σε ψηλά αντικείμενα ή και σε απότομες μεταβολές στο ίδιο το ανάγλυφο του εδάφους.

2.3 Η εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας

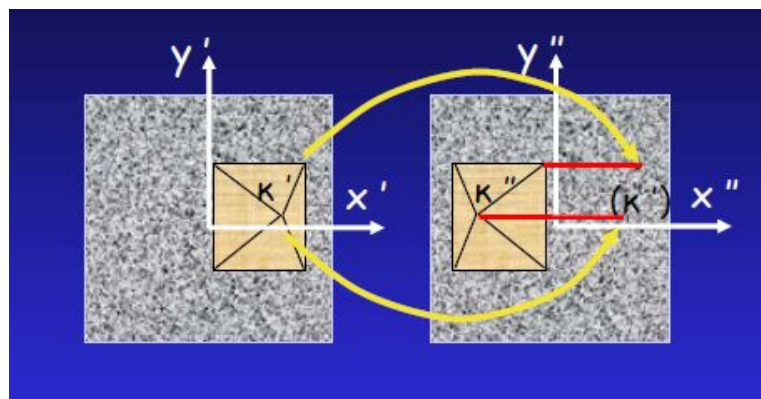
Για μια δεδομένη θέση της εικόνας, κάθε σημείο του χώρου, ορίζει μέσω της ακτίνας προβολής (m) ένα και μόνο εικονοσημείο (p). Αντίθετα, μετά από την προβολή και έχοντας την εικόνα στη σωστή θέση, εκείνο που μπορεί να οριστεί είναι μία ευθεία στο χώρο και όχι ένα συγκεκριμένο σημείο. Παρόμοια, μια ευθεία (D) απεικονίζεται μέσω του επιπέδου (e) στην ευθεία (d) της εικόνας, ενώ αντίθετα στην ευθεία (d) αντιστοιχεί το επίπεδο (e) στο χώρο.



Μονοσήμαντη αντιστοιχία χώρου – εικόνας

Συνεπώς, η αντιστοιχία χώρου - εικόνας είναι μονοσήμαντη, δηλαδή από το χώρο προς την εικόνα και όχι αμφιμονοσήμαντη. Αυτό πρακτικά καταδεικνύει πως γενικά δεν είναι εφικτή η ανακατασκευή του τρισδιάστατου χώρου από μία μόνο εικόνα.

Η προϋπόθεση για την εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας, είναι η χρήση δυο εικόνων που έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία. Η φαινομενική μετατόπιση ενός σημείου λόγω αλλαγής της θέσης παρατήρησης, λέγεται παράλλαξη.



Η παράλλαξη κατά τη διεύθυνση x (μετατόπιση κ'') είναι η κατά x συνιστώσα της εκτροπής λόγω ανάγλυφου

Διαφορετικές εκτροπές στις δύο εικόνες λόγω διακυμάνσεων του ανάγλυφου δημιουργούν διαφορές παράλλαξης. Το ανάγλυφο καταγράφεται ως διαφορές παράλλαξης, οι οποίες μπορούν να

αναχθούν σε μετρήσεις στην τρίτη διάσταση που είναι παράλληλη με τον άξονα λήψης. Στην ουσία η παράλλαξη είναι η μορφή με την οποία λανθάνει η τρίτη διάσταση του αντικειμένου στις εικόνες. Για την κανονική περίπτωση στερεοζεύγους εικόνων (άξονες λήψης παράλληλοι και κάθετοι στη βάση), ισχύουν οι βασικές φωτογραμμετρικές σχέσεις της παράλλαξης:

$$H = c \frac{B}{p_x} \quad X = \frac{B}{p_x} x' \quad Y = \frac{B}{p_x} y'$$

..όπου B η βάση – απόσταση μεταξύ των σημείων λήψης, H η απόσταση λήψης, c η σταθερά της μηχανής και p_x η κατά x παράλλαξη (εννοείται $p_y=0$ καθώς η διεύθυνση πτήσης είναι παράλληλη στον άξονα X) και x', y' οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου στην εικόνα.

2.4 Προσανατολισμοί της Εικόνας

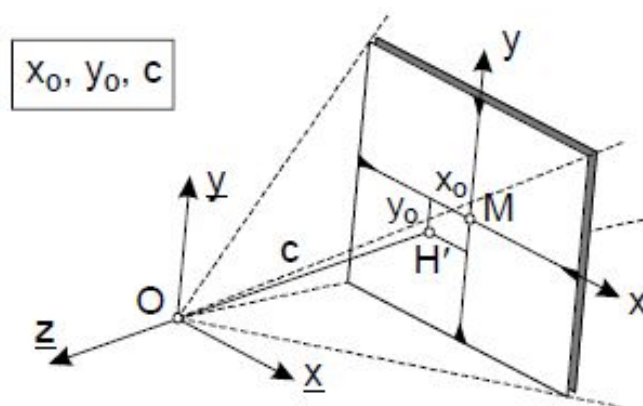
Μια κεντρική προβολή ορίζεται πλήρως εάν έχει οριστεί:

- εσωτερικά, με το να καθοριστεί η θέση του κέντρου προβολής ως προς το επίπεδο προβολής – δηλαδή η απόσταση και η θέση της προβολής του σημείου λήψης ως προς το επίπεδο του φωτογραφικού αισθητήρα. Προφανώς η σύνδεση του σημείου λήψης με τα εικονοσημεία αναπαράγει τη δέσμη ακτίνων.
- εξωτερικά, από τη θέση και τον προσανατολισμό του επιπέδου προβολής στο χώρο. Δεδομένου ότι το επίπεδο προβολής είναι ήδη προσανατολισμένο εσωτερικά και συνεπώς η δέσμη είναι γνωστή, αυτό ισοδυναμεί με τον προσανατολισμό της ίδιας της δέσμης στο χώρο.

Συνεπώς ο εσωτερικός προσανατολισμός της εικόνας αντιστοιχεί στην ανάπλαση της δέσμης ακτίνων, ενώ ο εξωτερικός στην αποκατάσταση της θέσης της δέσμης στο χώρο.

Εσωτερικός Προσανατολισμός: Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού ονομάζεται βαθμονόμηση της μηχανής (camera calibration), κατά την οποία πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της κεντρικής προβολής που προσαρμόζεται βέλτιστα στο υπό εξέταση

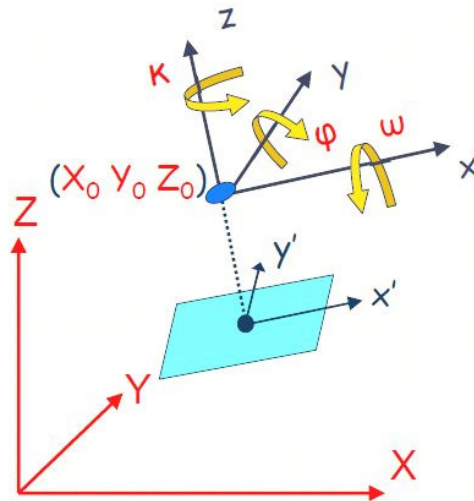
σύστημα μηχανή - φακός καθώς και η εκτίμηση των αποκλίσεων της πραγματικής απεικόνισης από το μαθηματικό μοντέλο. Αναλυτικότερα, γίνεται ο προσδιορισμός των εικονοσυντεταγμένων x_0, y_0 του πρωτεύοντος σημείου, της σταθεράς c της μηχανής και των σφαλμάτων του φακού όπως η ακτινική διαστροφή Δr .



Βασικές παράμετροι εσωτερικού προσανατολισμού

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι προσδιορισμού των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού, η εργαστηριακή βαθμονόμηση που πραγματοποιείται σε εργαστήριο με ειδική διαδικασία και η βαθμονόμηση πεδίου ή αυτοβαθμονόμηση που δύναται να διεξαχθεί κατά την ίδια τη φωτογραμμετρική εργασία και αποτελεί μέρος της διαδικασίας του Αεροτριγωνισμού.

Εξωτερικός Προσανατολισμός: Ο εξωτερικός προσανατολισμός αφορά στον προσδιορισμό εκείνων των παραμέτρων βάσει των οποίων γίνεται η ένταξη της αναπλασμένης δέσμης των προβολικών ακτινών στο χώρο – γεωδαιτικό σύστημα. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν στις τρεις γεωδαιτικές συντεταγμένες X_0, Y_0, Z_0 του σημείου λήψης στο χώρο και στις τρεις στροφές περί τους άξονες – στροφή ω περί τον X , στροφή ϕ περί τον Y , στροφή κ περί τον Z – που ορίζουν τη διεύθυνση του άξονα λήψης και τη στροφή της εικόνας γύρω από αυτόν.



Εξωτερικός Προσανατολισμός της εικόνας

Γνωστός εξωτερικός προσανατολισμός συνεπάγεται την αποκατάσταση τόσο της θέσης της δέσμης στο χώρο (με τις τρεις πρώτες παραμέτρους) όσο και του προσανατολισμού της (με τις τρεις τελευταίες παραμέτρους).

2.5 Συνθήκη Συγγραμμικότητας

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, για να προσδιοριστεί η θέση μιας ακτίνας ενός σημείου A στον τρισδιάστατο χώρο, θα πρέπει να είναι γνωστά:

- η θέση του αντίστοιχου εικονοσημείου A' στην εικόνα ($x-x_0, y-y_0$)
- η θέση του σημείου λήψης O (X_0, Y_0, Z_0)
- ο προσανατολισμός του άξονα λήψης (ω, ϕ, κ)
- οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου A στο χώρο (X, Y, Z)

με την προϋπόθεση πως τα σημεία A, A' και O είναι συνευθειακά, δηλαδή ισχύει $\overrightarrow{OA'} = \lambda \overrightarrow{OA}$. Η εξίσωση αυτής της ευθείας στο χώρο δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix} = \frac{1}{k} R \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

..όπου $1/k$ η κλίμακα στο σημείο A , και R ο ορθοκανονικός πίνακας στροφής στο χώρο. Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη συνθήκη συγγραμμικότητας που ισχύει για κάθε σημείο στην εικόνα και συνδέει τις εικονοσυντεταγμένες του x, y με τις συντεταγμένες του X, Y, Z στο γεωδαιτικό σύστημα μέσω των τριών βασικών στοιχείων x_0, y_0, c του εσωτερικού προσανατολισμού και των έξι στοιχείων $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ του εξωτερικού προσανατολισμού.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\kappa \mathbf{R}_\phi \mathbf{R}_\omega = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

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

Ο ορθοκανονικός πίνακας στροφής R

Ανεπτυγμένη η συνθήκη συγγραμμικότητας δίνει τρεις εξισώσεις, οι οποίες αν διαιρεθούν με την τρίτη, προκύπτουν οι σχέσεις:

$$x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

..οι οποίες αποτελούν την πιο κοινή έκφραση των εξισώσεων συγγραμμικότητας δεδομένου ότι είναι λυμένες ως προς τις εικονοσυντεταγμένες x και y , οι οποίες συνήθως είναι τα μεγέθη που μετρούνται άμεσα.

2.6 Μοντέλο Συνόρθωσης

Η συνθήκη συγγραμμικότητας βρίσκει εφαρμογή στη λύση των σημαντικότερων φωτογραμμετρικών προβλημάτων όπου σχεδόν πάντοτε οι εξισώσεις είναι περισσότερες από τους αγνώστους. Για την πλήρη εκμετάλλευση της πλεονάζουσας πληροφορίας, οι παρατηρήσεις (μετρούμενο μέγεθος – εικονοσυντεταγμένες), συνορθώνονται επιλύοντας με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (MET).

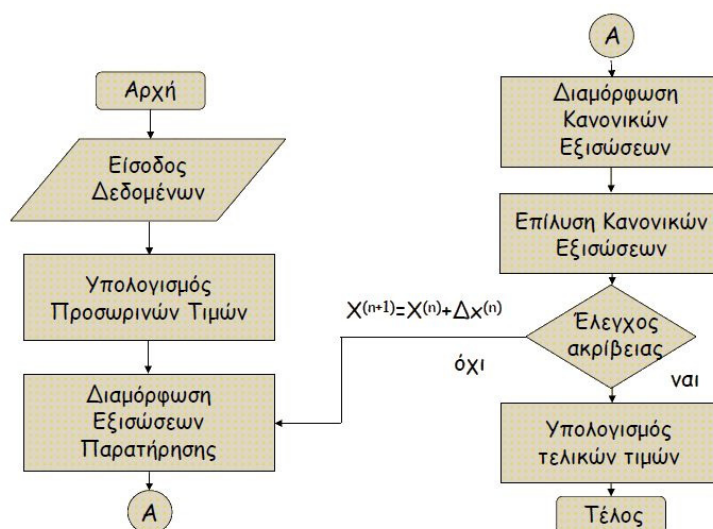
Για να εφαρμοστεί η MET πρέπει να έχει καταστρωθεί ένα γραμμικό σύστημα της μορφής:

$$l - v = A\Delta$$

..όπου l ο πίνακας παρατηρήσεων με διάσταση $m \times 1$, v τα σφάλματα των μετρήσεων, A ο πίνακας συντελεστών (ή πίνακας σχεδιασμού) με διάσταση $m \times n$ και Δ ο πίνακας αγνώστων με διάσταση $n \times 1$. Η λύση του συστήματος με την προϋπόθεση ότι ικανοποιείται η αρχή των ελαχίστων τετραγώνων $\sum v_i^2 = \min$, όπου i η κάθε παρατήρηση, προκύπτει ως:

$$\Delta = (A^T A)^{-1} A^T l$$

Ωστόσο οι εξισώσεις συγγραμμικότητας δεν είναι γραμμικές ως προς τους αγνώστους. Η γραμμικοποίησή τους επιτυγχάνεται με ανάπτυξη των εξισώσεων σε σειρά κατά Taylor περί αρχικές (ή προσεγγιστικές) τιμές των αγνώστων και χρησιμοποίηση μόνο των γραμμικών όρων της σειράς.



Λογικό Διάγραμμα επίλυσης εξισώσεων

Κατά συνέπεια η λύση επιτυγχάνεται με πολλαπλές εφαρμογές της ΜΕΤ μέσω διαδοχικών προσεγγίσεων. Στις διαδοχικές αυτές προσεγγίσεις υπολογίζονται κάθε φορά οι διορθώσεις που πρέπει να γίνουν στις προσωρινές τιμές που προσδιορίζονται για τους αγνώστους, ώστε να επιτευχθεί αριθμητική λύση εντός των ορίων σύγκλισης που αντιστοιχούν στην επιδιωκόμενη ακρίβεια.

2.7 Βασικά Φωτογραμμετρικά Προβλήματα

Οι εικονοσυντεταγμένες μέσω των εξισώσεων συγγραμμικότητας προκύπτουν ως συνάρτηση τριών ομάδων παραμέτρων, των στοιχείων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού και των γεωδαιτικών συντεταγμένων. Ομαδοποιώντας τις παραμέτρους οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν:

$$\begin{array}{c}
 x = F_x(\{x_0, y_0, c, \Delta x, \Delta y\}, \{X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa\}, \{X, Y, Z\}) \\
 y = F_y(\{x_0, y_0, c, \Delta x, \Delta y\}, \{X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa\}, \{X, Y, Z\}) \\
 \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \qquad \qquad \qquad \mathbf{1} \qquad \qquad \qquad \mathbf{2} \qquad \qquad \qquad \mathbf{3}
 \end{array}$$

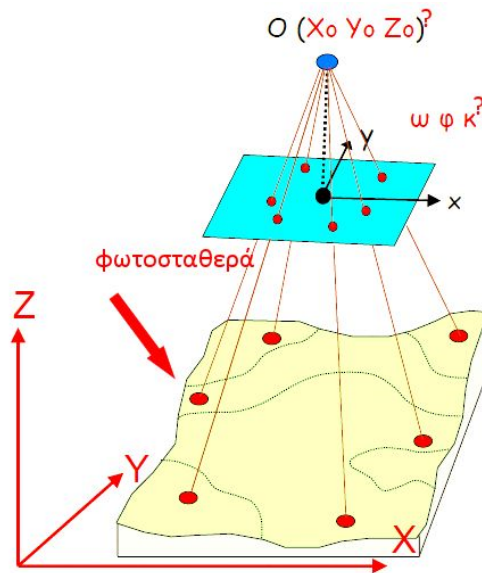
..με στόχο την απλούστευση της χρήσης τους στα βασικά φωτογραμμετρικά προβλήματα.

Βαθμονόμηση της Μηχανής: Αφορά στον προσδιορισμό των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού, όπου η βαθμονόμηση γίνεται με τη χρήση σημείων γνωστών συντεταγμένων (φωτοσταθερών) σε ειδικά πεδία ελέγχου.

- άγνωστοι → μέρος **1** (πίνακας Δ)
- γνωστοί → μέρη **2** και **3** (περιλαμβάνονται στον πίνακα Α)
- παρατηρήσεις → x και y (πίνακας Ι)

Το πεδίο ελέγχου φωτογραφίζεται και μετρούνται οι εικονοσυντεταγμένες x και y των φωτοσταθερών, οι οποίες λειτουργούν ως οι παρατηρήσεις της συνόρθωσης.

Οπισθοτομία: Ως οπισθοτομία ορίζεται η φωτογραμμετρική διαδικασία μέσω της οποίας προσδιορίζονται οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού μιας εικόνας, δηλαδή η θέση του σημείου τομής των



Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία

ακτινών στο χώρο, αλλά και του προσανατολισμού της δέσμης ως στερεού. Με άλλα λόγια το ζητούμενο είναι ο προσανατολισμός και η θέση της δέσμης στο χώρο ώστε η κάθε ακτίνα της αναπλασμένης δέσμης να διέρχεται από το αντίστοιχο φωτοσταθερό :

- άγνωστοι → μέρος **2** (πίνακας Δ)
- γνωστοί → μέρη **1** και **3** (περιλαμβάνονται στον πίνακα Α)
- παρατηρήσεις → x και y (πίνακας Ι)

Η λύση του προβλήματος είναι εφικτή με 3 σημεία γνωστών συντεταγμένων, εφόσον για m φωτοσταθερά οι βαθμοί ελευθερίας (περίσσεια παρατηρήσεων) δίνεται από τη σχέση $2xm-6$. Συνήθως όμως και προκειμένου να υπάρχει περίσσεια εξισώσεων, η φωτογραμμετρική οπισθοτομία χρησιμοποιεί ≥ 4 φωτοσταθερά που κατά προτίμηση ορίζουν ένα όσο το δυνατό μεγάλο τετράπλευρο στην εικόνα.

Για λόγους νοηματικής σύνδεσης με την προηγούμενη παράγραφο (Μοντέλο Συνόρθωσης), ακολουθεί περιγραφή της τεχνικής επίλυσης μόνο για την περίπτωση της οπισθοτομίας. Οι εξισώσεις παρατήρησης μετά τη γραμμικοποίηση γίνονται:

$$x = F_x = F_x^{(0)} + \left(\frac{\theta F_x}{\theta \omega}\right)^{(0)} d\omega + \left(\frac{\theta F_x}{\theta \phi}\right)^{(0)} d\phi + \left(\frac{\theta F_x}{\theta \kappa}\right)^{(0)} d\kappa + \left(\frac{\theta F_x}{\theta X_0}\right)^{(0)} dX_0 + \left(\frac{\theta F_x}{\theta Y_0}\right)^{(0)} dY_0 + \left(\frac{\theta F_x}{\theta Z_0}\right)^{(0)} dZ_0$$

και

$$y = F_y = F_y^{(0)} + \left(\frac{\theta F_y}{\theta \omega}\right)^{(0)} d\omega + \left(\frac{\theta F_y}{\theta \phi}\right)^{(0)} d\phi + \left(\frac{\theta F_y}{\theta \kappa}\right)^{(0)} d\kappa + \left(\frac{\theta F_y}{\theta X_0}\right)^{(0)} dX_0 + \left(\frac{\theta F_y}{\theta Y_0}\right)^{(0)} dY_0 + \left(\frac{\theta F_y}{\theta Z_0}\right)^{(0)} dZ_0$$

..όπου οι άγνωστοι είναι οι διαφορικές μεταβολές των προσωρινών τιμών των αρχικών αγνώστων, δηλαδή των $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)^{(0)}$. Στη συνέχεια οι εξισώσεις παρατήρησης υπό μορφή πινάκων διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{matrix} \left(\begin{array}{cccccc} \frac{\partial F_x}{\partial X_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_x}{\partial \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \phi} & \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \phi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \phi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \end{array} \right) & \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \\ \Delta \omega \\ \Delta \phi \\ \Delta \kappa \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} x_1 - F_x^{(0)} \\ y_1 - F_y^{(0)} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n - F_y^{(0)} \end{pmatrix} \\ 2n \times 6 & 6 \times 1 & & 2n \times 1 \\ \mathbf{A} & \mathbf{\Delta} & = & \mathbf{I} \end{matrix}$$

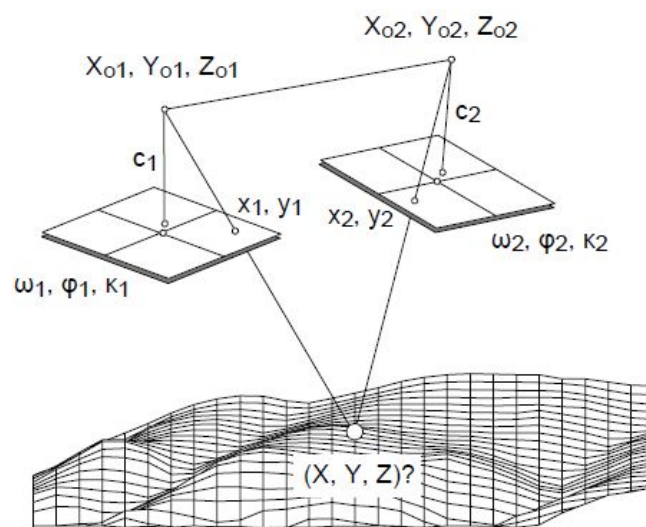
Η επίλυση γίνεται εφαρμόζοντας τη MET σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο (Μοντέλο Συνόρθωσης). Μετά την πρώτη επίλυση, προσδιορίζονται οι άγνωστοι, δηλαδή οι διαφορικές μεταβολές των προσωρινών τιμών. Η επίλυση πρέπει να επαναληφθεί με νέες προσωρινές τιμές, τις παλιές συν τις διαφορικές μεταβολές που υπολογίστηκαν από την πρώτη επίλυση.

$$(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)^{(1)} = (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)^{(0)} + (\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa)$$

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, έως ότου οι διορθώσεις (διαφορικές μεταβολές) των προσωρινών τιμών είναι κάτω από το όριο της ακρίβειας που απαιτείται.

Εμπροσθοτομία: Στη φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία, συμμετέχουν δυο εικόνες. Η διαδικασία αφορά στον προσδιορισμό σημείων του χώρου από μετρήσεις σε εικόνες γνωστού εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού:

- άγνωστοι → μέρος **3** (πίνακας Δ)
- γνωστοί → μέρη **1₁**, **2₁** και **1₂**, **2₂** (περιλαμβάνονται στον πίνακα A)
- παρατηρήσεις → x_1, y_1 και x_2, y_2 (πίνακας I)



Φωτογραμμετρική Εμπροσθοτομία

Στη φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία σε στερεοζεύγος εικόνων υπάρχει περίσσεια μίας εξίσωσης καθώς για κάθε σημείο αντιστοιχούν τέσσερις εξισώσεις από τις οποίες βρίσκονται οι τρεις άγνωστες γεωδαιτικές συντεταγμένες.

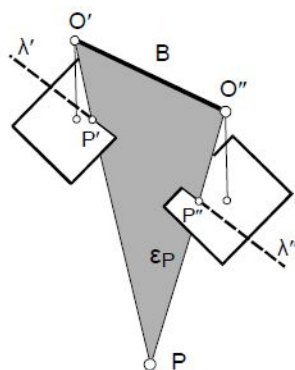
2.8 Προσανατολισμοί στερεοσκοπικού Ζεύγους

Το στερεοσκοπικό μοντέλο είναι η υπό κλίμακα τρισδιάστατη απεικόνιση ή αναπαράσταση του προς μέτρηση αντικειμένου, που προκύπτει από την κατάλληλη παρατήρηση δύο (τουλάχιστον) επικαλυπτόμενων εικόνων του (στερεοζεύγος). Για να δημιουργηθεί το στερεοσκοπικό μοντέλο θα πρέπει οι δύο προβολικές δέσμες να βρεθούν σε ακριβώς ανάλογη θέση με αυτήν που είχαν κατά τη στιγμή της λήψης.

Σχετικός Προσανατολισμός: Καλείται η διαδικασία δημιουργίας ενός στερεοσκοπικού μοντέλου, που ισοδυναμεί με την ορθή ανάπλαση του σχήματός του αλλά και τη διασφάλιση της συνεχούς στερεοσκοπικής όρασης. Ο όρος προσανατολισμός σε αυτή την περίπτωση αφορά στον προσδιορισμό εκείνων των παραμέτρων που τοποθετούν την μια εικόνα σε σχέση με την άλλη στο χώρο, σε ανάλογη θέση με αυτήν που είχαν κατά τη στιγμή της λήψης.

Κατά τη στιγμή της λήψης όλα τα ζεύγη ομόλογων ακτίνων (αυτών που προέρχονται από το ίδιο σημείο του αντικειμένου) τέμνονται. Η αλληλοτομία αυτή είναι ικανή και αναγκαία προϋπόθεση για να διασφαλιστεί η στερεοσκοπική παρατήρηση ή ισοδύναμα, να δημιουργηθεί το στερεοσκοπικό μοντέλο. Άλλα ισοδύναμα του σχετικού προσανατολισμού περιλαμβάνουν:

- τη δημιουργία ≥ 5 επιπολικών επιπέδων
- άρση ασυμβατότητας ≥ 5 ομόλογων ακτινών
- εξάλειψη της γ παράλλαξης των εικόνων

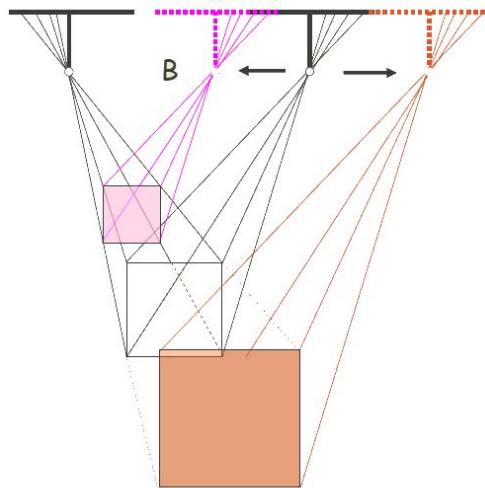


Επιπολικό επίπεδο $\epsilon\rho$ και επιπολικές ευθείες $\lambda' \lambda''$

Η αλληλοτομία των άπειρων ζευγών ομόλογων ακτίνων των δύο εικόνων εξασφαλίζεται εφόσον τηθούν 5 ομόλογα ζεύγη. Αν θεωρηθεί πως οι δύο δέσμες έχουν 12 βαθμούς ελευθερίας:

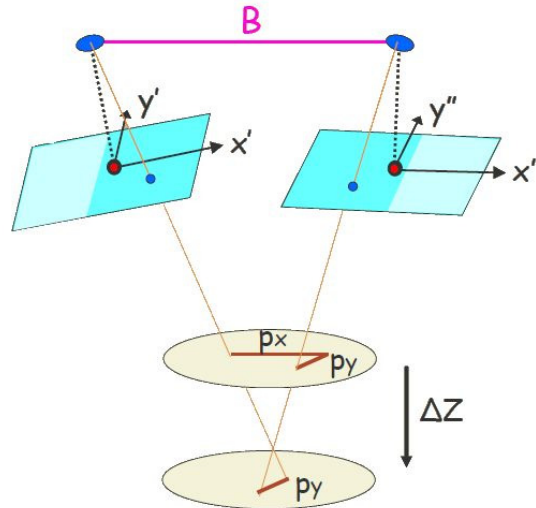
X_0	X_0'	X_0	ΔX_0
Y_0	Y_0'	Y_0	ΔY_0
Z_0	Z_0'	Z_0	ΔZ_0
Ω	ω'	ω	$\Delta \omega$
Φ	ϕ'	ϕ	$\Delta \phi$
K	κ'	κ	$\Delta \kappa$

..από αυτούς, οι 6 της μιας δέσμης τοποθετούν το ζεύγος των δεσμών στο χώρο (θέση), ενώ το ΔX_0 επιδρά μόνο στην κλίμακα (μέγεθος) του στερεοσκοπικού μοντέλου με αποτέλεσμα να μη συμβάλλουν στην αλληλοτομία (σχήμα) των ομόλογων ακτίνων. Συνεπώς τα απαραίτητα στοιχεία για την επίτευξη του Σχετικού Προσανατολισμού είναι πέντε: $\Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa$.



Η μεταβολή της βάσης B (ΔX_0) επιδρά μόνο στο μέγεθος του μοντέλου

Οι πέντε αυτές κινήσεις των δύο δεσμών επιτυγχάνουν την αλληλοτομία των ομόλογων ζευγών ακτίνων ή καταργούν την ασυμβατότητά τους. Η ασυμβατότητα έχει δύο συνιστώσες, μία κατά x, την παράλλαξη x (ρ_x που σχετίζεται με τα υψόμετρα) και μία κατά y την παράλλαξη y (ρ_y). Με εξάλειψη της y-παράλλαξης εξασφαλίζεται η αλληλοτομία των ομόλογων ακτίνων.



Ασυμβατότητα ομόλογων ακτινών λόγω παράλληλης

Οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό των 5 παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού προκύπτουν είτε από τη συνθήκη συνεπιπεδότητας είτε από την εξίσωση της γ - παράλληλης. Η συνθήκη συνεπιπεδότητας εκφράζεται από τη σχέση:

$$c (x''r_{12} + y''r_{22} - cr_{32}) + y'(x''r_{13} + y''r_{23} - cr_{33}) - \\ -\beta_y [x'(x''r_{13} + y''r_{23} - cr_{33}) + c(x''r_{11} + y''r_{21} - cr_{31})] + \\ +\beta_z [x'(x''r_{12} + y''r_{22} - cr_{32}) - y'(x''r_{11} + y''r_{21} - cr_{31})] = 0$$

..όπου x', y', x'', y'' το ζεύγος των εικονοσυντεταγμένων ενός ομόλογου σημείου στις δυο εικόνες, β_y, β_z οι προσδιοριζόμενες σχετικές συνιστώσες της βάσης, ενώ με ανάλυση των όρων r_{ji} προκύπτουν και οι γωνίες $\omega_\Sigma, \phi_\Sigma, \kappa_\Sigma$ της δεξιάς εικόνας ως προς την αριστερή. Αντίστοιχα η εξίσωση γ - παράλληλης δίνεται από τη σχέση:

$$P_y = -d\beta_y + \frac{Y_M}{Z_M} d\beta_z + H \left(\frac{Y_M^2}{Z_M^2} + 1 \right) d\omega - \frac{(X_M - B)}{Z_M} d\phi + X_M d\kappa$$

..η οποία συνδέει τις διαφορικές μετακινήσεις των δύο δεσμών (απαραίτητες για την επίτευξη αλληλοτομίας των ομόλογων ακτινών) με συντεταγμένες, είτε σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς του μοντέλου (X_M, Y_M, Z_M) , είτε των εικόνων (εικονοσυντεταγμένες).

Και στις δυο περιπτώσεις, η περίσσεια των παρατηρήσεων επιβάλλει να προκύψουν οι τιμές των παραμέτρων με συνόρθωση με την ΜΕΤ.

Απόλυτος Προσανατολισμός: Ο απόλυτος προσανατολισμός αποτελεί τη διαδικασία ένταξης του μοντέλου στο γεωδαιτικό σύστημα, κάτι που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της κατάλληλης κλίμακας – μεγέθους αλλά και της θέσης του στο χώρο. Οι παράμετροι του απόλυτου προσανατολισμού περιλαμβάνουν την κλίμακα του μοντέλου (λ), τη θέση του (3 μεταθέσεις t_x, t_y, t_z) και τον προσανατολισμό του (3 στροφές Ω, Φ, κ) στο χώρο. Ο απόλυτος προσανατολισμός αποτελεί ουσιαστικά έναν μετασχηματισμό ομοιότητας ο οποίος μέσω της κλίμακας λ , της μετάθεσης t με τις τρεις συνιστώσες της t_x, t_y, t_z και του πίνακα R_A των τριών στροφών Ω, Φ, κ του μοντέλου, θα μεταφέρει τις συντεταγμένες X', Y', Z' μοντέλου στις αντίστοιχες γεωδαιτικές X, Y, Z πράγμα που εκφράζεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda R_A^T \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

Κάθε φωτοσταθερό σημείο δίνει τρεις εξισώσεις, οπότε για m πλήρη φωτοσταθερά προκύπτει σύστημα $3xm$ εξισώσεων με $3xm-7$ βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς αρκούν δυο πλήρη φωτοσταθερά και ένα γνωστό υψόμετρο, ωστόσο στην πράξη αποφεύγεται η επίλυση με τον ελάχιστο αριθμό φωτοσταθερών, χρησιμοποιώντας κατά προτίμηση 4 και πλέον, καλά κατανομημένα φωτοσταθερά.

2.9 Φωτογραμμετρικά Σφάλματα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στην κανονική περίπτωση στερεοζεύγους, η μετάδοση σφαλμάτων στις συντεταγμένες του χώρου, καθώς ουσιαστικά προσδίδει τον τρόπο που επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες το τελικό φωτογραμμετρικό προϊόν.

- Αν σ η αβεβαιότητα με την οποία έχουν μετρηθεί οι εικονοσυντεταγμένες, τότε το οριζοντιογραφικό σφάλμα προκύπτει από τη σχέση $\sigma_{xy} = \pm k\sigma$ με αποτέλεσμα να μεγεθύνεται

στο χώρο βάση του συντελεστή κλίμακας, πράγμα χρήσιμο για τη χονδρική εκτίμηση κλίμακας εικόνων με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις ακρίβειας.

- Το υψομετρικό σφάλμα προκύπτει από τη σχέση $\sigma_H = \pm\sqrt{2}k\frac{H}{B}\sigma$ όπου σ το σφάλμα παράλλαξης, με συνέπεια να εξαρτάται αναλογικά από την κλίμακα και το λόγο H/B. Η κατάλληλη επιλογή του λόγου H/B έχει μεγάλη σημασία στη φωτογραμμετρία καθώς έχει αντικρουόμενες επιδράσεις στη φωτογραμμετρική διαδικασία. Αναλυτικότερα, για δεδομένο ύψος πτήσης η παραπάνω σχέση επιβάλλει κατά το δυνατό μεγάλες βάσεις B οι οποίες όμως συνεπάγονται στερεοζεύγη με μικρές επικαλύψεις, τα οποία πρέπει για πολλούς λόγους να αποφεύγονται. Επίσης ο λόγος H/B εξαρτάται από τη σταθερά της μηχανής, αφού ένας ευρυγώνιος φακός σημαίνει μεγαλύτερο γωνιακό άνοιγμα φακού επιτρέποντας μεγαλύτερες βάσεις B. Όμως οι ευρυγώνιοι φακοί συνεπάγονται μεγάλες εκτροπές λόγω ανάγλυφου, άρα και μεγαλύτερες αποκρύψεις λεπτομερειών.
- Η επίδραση του σφάλματος της σταθεράς της μηχανής c , προκύπτει από τη σχέση $\sigma_H = \pm kc_c$, επιδρώντας αναλογικά στην υψομετρία μέσω του συντελεστή κλίμακας, ενώ δεν έχει σχεδόν καθόλου επίπτωση στην οριζοντιογραφία.
- Παρόμοια με παραπάνω, το σφάλμα του πρωτεύοντος σημείου επιδρά αναλογικά μέσω του συντελεστή κλίμακας στην παράλληλη με αυτό διεύθυνση του γεωδαιτικού συστήματος και καθόλου στην κάθετη.
- Τα σφάλματα της θέσης των σημείων λήψης μεταδίδονται ως έχουν στην αντίστοιχη γεωδαιτική συντεταγμένη σύμφωνα με τις σχέσεις: $\sigma_X = \pm\sigma_{X_0}$, $\sigma_Y = \pm\sigma_{Y_0}$, $\sigma_Z = \pm\sigma_{Z_0}$
- Το σφάλμα των γωνιών λήψης επιδρά αναλογικά στο σφάλμα των γεωδαιτικών συντεταγμένων μέσω του παράγοντα H/B για τα υψόμετρα και 1/H για την οριζοντιογραφία.

Συνολικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική ακρίβεια σε μια διεικονική απόδοση, είναι:

- Η κλίμακα των φωτογραφιών
- Το είδος φακού
- Το ύψος πτήσης
- Η αποκατάσταση των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού
- Ο αριθμός, η διάταξη και η ακρίβεια των φωτοσταθερών

2.10 Αεροτριγωνισμός

Στην περίπτωση που μια εργασία απαιτεί τον προσανατολισμό ενός μεγάλου αριθμού ζευγών, ο εντοπισμός τόσο στο έδαφος όσο και στις εικόνες τόσων πολλών σημείων είναι συνήθως αδύνατος και – σε κάθε περίπτωση – χρονοβόρος. Οι μετρήσεις με τοπογραφικές και Γεωδαιτικές μεθόδους απαιτούν έμπειρο προσωπικό, ακριβό εξοπλισμό και κατά συνέπεια μεγάλο κόστος και χρόνο. Ταυτόχρονα, οι φωτογραμμετρικές διαδικασίες για τον προσανατολισμό τόσο μεγάλου αριθμού στερεοσκοπικών ζευγών ξεχωριστά, συνεπάγονται υπερβολικές απαιτήσεις σε εξοπλισμό, προσωπικό και χρόνο.

Ο Αεροτριγωνισμός (ή Φωτοτριγωνισμός για να καλυφθούν και οι περιπτώσεις επίγειων λήψεων), αποτελεί τη μεθοδολογία που αποσκοπεί στη δημιουργία ενός συνολικού δικτύου του οποίου ο εξωτερικός προσανατολισμός προσδιορίζεται με χρήση ελάχιστων φωτοσταθερών και σε ένα βήμα. Ο επίσημος ορισμός που έχει δοθεί το 1988 από τη Διεθνή Ένωση Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης (ISPRS) αναφέρει: Αεροτριγωνισμός είναι η διαδικασία πύκνωσης του οριζοντιογραφικού και υψομετρικού δικτύου ελέγχου, κατά την οποία οι μετρήσεις σε επικαλυπτόμενες φωτογραφίες συσχετίζονται σε ενιαία λύση στο χώρο με τη βοήθεια των προοπτικών ιδιοτήτων των εικόνων.

Προϊόν του αεροτριγωνισμού είναι ο εξωτερικός προσανατολισμός όλων των εικόνων του δικτύου, αλλά και ο προσδιορισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων αγνώστων σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την συσχέτιση των εικόνων ή των μοντέλων. Τα ειδικά σημεία που χρησιμοποιούνται στον αεροτριγωνισμό είναι τα εξής:

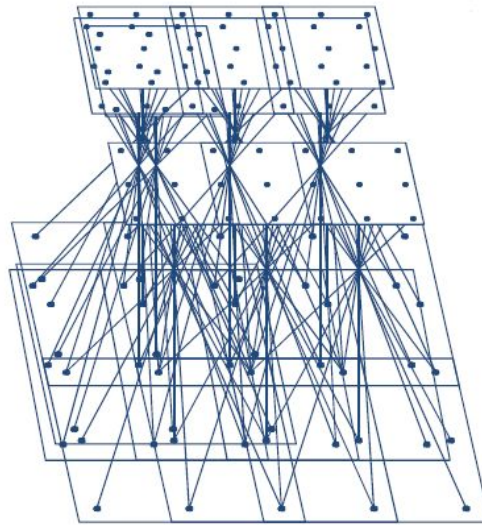
- Φωτοσταθερά (GCPs - ground control points): αποτελούν σημεία με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες και τα οποία χρησιμεύουν για τη συσχέτιση εικόνων και μοντέλων αλλά και για τη μετάδοση της πληροφορίας του γεωδαιτικού συστήματος στο δίκτυο.
- Σημεία Σύνδεσης (TPs - tie points): είναι σημεία που χρησιμεύουν για τη συσχέτιση εικόνων, μοντέλων ή λωρίδων μεταξύ τους. Οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες υπολογίζονται κατά την επίλυση του δικτύου.
- Σημεία Ελέγχου (CP - check points): σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, τα οποία συνήθως έχουν προσημανθεί σαν απλά φωτοσταθερά, αλλά δεν συμμετέχουν στη συνόρθωση και επίλυση του δικτύου, ώστε να χρησιμεύσουν αργότερα για έλεγχο της ακρίβειας.

Οι μέθοδοι συνόρθωσης του μπλοκ (εικόνες που συμμετέχουν στην επίλυση) του αεροτριγωνισμού, είναι οι εξής:

- Συνόρθωση μπλοκ με ανεξάρτητα μοντέλα, όπου κάθε μοντέλο θεωρείται ως το μοναδιαίο στοιχείο
- Συνόρθωση μπλοκ κατά δέσμες, όπου το μοναδιαίο στοιχείο θεωρείται η δέσμη των ακτίνων. Ουσιαστικά πρόκειται για εφαρμογή της Συνθήκης Συγγραμμικότητας για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού στερεοζευγών σε ένα βήμα και με τη χρήση φωτοσταθερών και σημείων σύνδεσης.

Η μέθοδος των δεσμών αποτελεί σήμερα την πιο κοινά χρησιμοποιούμενη μέθοδο καθώς απαιτεί τη διενέργεια του ελάχιστου δυνατού όγκου εργασιών. Συνεπώς επιτυγχάνεται περιορισμός των πιθανών πηγών σφαλμάτων και μεγιστοποίηση των ακριβειών, με εφαρμογή κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων συνόρθωσης. Η βασική μονάδα υπολογισμών είναι η δέσμη, δηλ. κάθε εικόνα ξεχωριστά που ορίζεται στο χώρο από το προβολικό κέντρο και τα σημεία στην εικόνα και το αντικείμενο. Η εφαρμογή της μεθόδου συνεπάγεται την

μετατόπιση (3 μετατοπίσεις) και τη στροφή (3 στροφές) των δεσμών, ώστε να τέμνονται όσο καλύτερα γίνεται στα σημεία σύνδεσης και να



Μέθοδος της Δέσμης

διέρχονται όσο πλησιέστερα γίνεται από τα φωτοσταθερά σημεία. Ως εξίσωση παρατήρησης χρησιμοποιείται η Συνθήκη Συγγραμμικότητας, παρατηρούμενα μεγέθη είναι οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων σύνδεσης και φωτοσταθερών, ενώ αρχικά δεδομένα αποτελούν τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού (σε περιπτώσεις που δεν γίνεται αυτοβαθμονόμηση) και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των φωτοσταθερών.

$$\begin{aligned}
 x = F_x = F_x^{(0)} &+ \frac{\partial F_x}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial F_x}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial F_x}{\partial c} dc + \frac{\partial F_x}{\partial k_1} dk_1 + \frac{\partial F_x}{\partial k_2} dk_2 + \\
 &+ \frac{\partial F_x}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial F_x}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} d\kappa + \\
 &+ \frac{\partial F_x}{\partial X} dX + \frac{\partial F_x}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_x}{\partial Z} dZ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y = F_y = F_y^{(0)} &+ \frac{\partial F_y}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial F_y}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial F_y}{\partial c} dc + \frac{\partial F_y}{\partial k_1} dk_1 + \frac{\partial F_y}{\partial k_2} dk_2 + \\
 &+ \frac{\partial F_y}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial F_y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} d\kappa + \\
 &+ \frac{\partial F_y}{\partial X} dX + \frac{\partial F_y}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_y}{\partial Z} dZ
 \end{aligned}$$

Γραμμικοποιημένες εξισώσεις παρατήρησης στη μέθοδο των Δεσμών (περίπτωση με αυτοβαθμονόμηση – βλέπε παρακάτω)

Κάθε μετρούμενο σημείο σε μία εικόνα δίνει 2 εξισώσεις για τους 6 αγνώστους του εξωτερικού προσανατολισμού. Αν είναι σημείο σύνδεσης, προσθέτει στο σύστημα 3 αγνώστους (X,Y,Z). Οι εξισώσεις αυτές δεν είναι γραμμικές και κατά συνέπεια απαιτείται Γραμμικοποίηση και προσεγγιστικές τιμές για τους αγνώστους. Συνεπώς η διαδικασία της συνόρθωσης γίνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις, κατά όμοιο τρόπο με αυτόν που αναλύθηκε στην παράγραφο της οπισθοτομίας.

$$\begin{matrix}
 \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x_0} & \frac{\partial F_x}{\partial y_0} & \frac{\partial F_x}{\partial c} & \frac{\partial F_x}{\partial k_1} & \frac{\partial F_x}{\partial k_2} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x_0} & \frac{\partial F_y}{\partial y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial c} & \frac{\partial F_y}{\partial k_1} & \frac{\partial F_y}{\partial k_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_x}{\partial x_0} & \frac{\partial F_x}{\partial y_0} & \frac{\partial F_x}{\partial c} & \frac{\partial F_x}{\partial k_1} & \frac{\partial F_x}{\partial k_2} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x_0} & \frac{\partial F_y}{\partial y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial c} & \frac{\partial F_y}{\partial k_1} & \frac{\partial F_y}{\partial k_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta c \\ \Delta k_1 \\ \Delta k_2 \end{pmatrix} & + & \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_x}{\partial \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_x}{\partial X_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_x}{\partial \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \\ \Delta \omega \\ \Delta \varphi \\ \Delta \kappa \end{pmatrix} & + & \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X} & \frac{\partial F_x}{\partial Y} & \frac{\partial F_x}{\partial Z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X} & \frac{\partial F_y}{\partial Y} & \frac{\partial F_y}{\partial Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_x}{\partial X} & \frac{\partial F_x}{\partial Y} & \frac{\partial F_x}{\partial Z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X} & \frac{\partial F_y}{\partial Y} & \frac{\partial F_y}{\partial Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} x_1 - F_x^{(0)} \\ y_1 - F_y^{(0)} \\ \vdots \\ y_n - F_y^{(0)} \end{pmatrix}
 \end{matrix}$$

A1
Δ1
A2
Δ2
A3
Δ3
L

Διαμόρφωση των εξισώσεων παρατήρησης σε μορφή πινάκων

2.11 Σφάλματα και Αξιοπιστία Αεροτριγωνισμού

Σφάλματα υπεισέρχονται σε κάθε βήμα της διαδικασίας του αεροτριγωνισμού όπως στη φωτογράφιση, στις τοπογραφικές ή γεωδαιτικές μετρήσεις και στη συνόρθωση. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να οφείλονται σε ατέλειες του εξοπλισμού, σε λάθη του προσωπικού ή σε άλλους εξωτερικούς παράγοντες. Ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, διακρίνονται σε τυχαία, συστηματικά και χονδροειδή. Τα τυχαία σφάλματα είναι αναπόφευκτα, όπως σε κάθε διαδικασία όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις. Αντίθετα τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να εξαλειφθούν με τον εμπλουτισμό του μαθηματικού μοντέλου επίλυσης του αεροτριγωνισμού με τις κατάλληλες μαθηματικές συναρτήσεις, ενώ τα χονδροειδή σφάλματα αντιμετωπίζονται με την εφαρμογή ειδικών τεχνικών, που η σωστή επιλογή τους επηρεάζει ουσιαστικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του αεροτριγωνισμού.

Μια από τις μεθόδους διόρθωσης των συστηματικών σφαλμάτων βασίζεται στην επέκταση με πρόσθετες παραμέτρους του συναρτησιακού μοντέλου επίλυσης του block. Οι πρόσθετες παράμετροι εξαλείφουν τις επιδράσεις των συστηματικών σφαλμάτων. Η μέθοδος ονομάζεται επίλυση με πρόσθετες παραμέτρους ή με αυτορρύθμιση (*self-calibration*), καθώς η εξάλειψη των συστηματικών παραμορφώσεων των δεδομένων βασίζεται σε πληροφορίες που προκύπτουν από τα ίδια τα δεδομένα. Οι πρόσθετες παράμετροι βασίζονται είτε σε μοντέλα φυσικών παραμορφώσεων είτε σε καθαρά γεωμετρικές θεωρήσεις, οι οποίες έχουν δώσει παρόμοια αποτελέσματα και βελτίωση της ακρίβειας κατά 20-30%.

Τα χονδροειδή σφάλματα αφορούν σε αυτά που δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως συστηματικά ή τυχαία συνεπώς η ποικιλία στο μέγεθος και τη μορφή τους είναι μεγάλη και οι τρόποι προσδιορισμού και εξάλειψής τους είναι πολυπλοκότεροι από αυτούς των συστηματικών σφαλμάτων. Οι συνηθέστερες μέθοδοι προσδιορισμού και αντιμετώπισης των χονδροειδών σφαλμάτων είναι οι εμπειρικές και οι αυτόματες μέθοδοι που βασίζονται σε στατιστικούς ελέγχους, όπως το “Data Snooping”.

Εκτός από την ακρίβεια, ένας ακόμη σημαντικός δείκτης κατά τον ποιοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων συνόρθωσης αεροτριγωνισμού, είναι η Αξιοπιστία. Δείκτες αξιοπιστίας στη φωτογραμμετρία αποτελούν η εσωτερική και εξωτερική αξιοπιστία. Ως εσωτερική αξιοπιστία ορίζεται το ελάχιστο μέγεθος σφάλματος για κάθε παρατήρηση που μπορεί να ανακαλυφθεί με μια συγκεκριμένη πιθανότητα, μέσω στατιστικού ελέγχου, ενώ η εξωτερική αξιοπιστία περιγράφει την επίδραση των μη απαλειφθέντων σφαλμάτων σε επίλυση αεροτριγωνισμού, στις προσδιοριζόμενες συντεταγμένες σημείων. Επιγραμματικά για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής αξιοπιστίας στον αεροτριγωνισμό, θα πρέπει:

- Στις επιλύσεις με δέσμες, η κατά πλάτος επικάλυψη των φωτογραφιών να είναι 60% ή να γίνονται διπλές πτήσεις με κάθετους μεταξύ τους άξονες.

- Η χρήση μεθόδων αυτορρύθμισης κατά την επίλυση, είναι απαραίτητη όταν δεν είναι γνωστά με ακρίβεια τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού.
- Η περιοχή ενδιαφέροντος να βρίσκεται πάντοτε στο εσωτερικό ενός block, με λήψη και μέτρηση μιας πρόσθετης λωρίδας φωτογραφιών κατά μήκος της περιμέτρου του.
- Η αξιοπιστία των φωτοσταθερών να εξασφαλίζεται κατά τη διάρκεια των τοπογραφικών μετρήσεών τους.

2.12 Συνδυασμένες Επιλύσεις Αεροτριγωνισμού

Στο σύστημα εξισώσεων των αναλυτικών μεθόδων αεροτριγωνισμού μπορούν να συμπεριληφθούν, με κατάλληλο «βάρος» ως πρόσθετες παρατηρήσεις και άλλα είδη παρατηρήσεων που να περιλαμβάνουν τις άγνωστες ποσότητες, εκτός των φωτογραμμετρικών. Οι επιλύσεις αυτές που βασίζονται σε πρόσθετα είδη παρατηρήσεων, καλούνται συνδυασμένες επιλύσεις αεροτριγωνισμού. Πλεονεκτήματα των συνδυασμένων επιλύσεων, αποτελούν η επίτευξη σημαντικής οικονομίας (χρόνου, κόπου, κόστους), η αύξηση της σχετικής ακρίβειας, η αύξηση της εσωτερικής και εξωτερικής αξιοπιστίας αλλά και η ευελιξία στον προγραμματισμό των μετρήσεων. Τα κυριότερα είδη πρόσθετων παρατηρήσεων είναι:

Μετρήσεις GPS/IMU: Τα τελευταία χρόνια η χρήση κινηματικού εντοπισμού θέσης (RTK - Real Time Kinematic) επέτρεψε τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων λήψης (X_0, Y_0, Z_0) των φωτογραφιών με ακρίβεια λίγων εκατοστών. Η εκ των προτέρων γνώση των σημείων λήψης σε κάθε αεροφωτογραφία του block περιορίζει δραστικά, αν δεν εξαλείφει τελείως (με ενδεχόμενη μελλοντική τελειοποίηση του δορυφορικού εντοπισμού), τον αριθμό των αναγκαίων φωτοσταθερών στο έδαφος. Θεωρητικά ανεξάρτητα από το μέγεθος και τη μορφή του block φωτογραφιών, αρκεί η γνώση 1 μόνον σημείου στο έδαφος, για την εξάλειψη τυχόν συστηματικών μετατοπίσεων μεταξύ των συστημάτων GPS και γεωδαιτικού, ή η γνώση 3 σημείων αν υπάρχουν και προβλήματα

στροφών μεταξύ των συστημάτων. Πρακτικά μετρώνται τουλάχιστον 4 σημεία, στις γωνίες του block. Τα γωνιακά στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων του block (γωνίες ω , ϕ , κ), προσδιορίζονται από την αδρανειακή μονάδα (IMU - Inertial Measurement Unit), η οποία συνήθως περιλαμβάνεται στο Αδρανειακό Σύστημα Πλοήγησης (INS - Inertial Navigation System), που παρέχει μη επεξεργασμένα δεδομένα της IMU ως πληροφορία για την πλοήγηση του αεροσκάφους.



Μονάδα GPS/INS κατάλληλη για τοποθέτηση σε αεροπλάνο

Η μονάδα IMU μπορεί να αποτελέσει αρωγό του συστήματος GPS παρέχοντας ακριβείς πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα μετά από πιθανή απώλεια σήματος μέχρι την επανασύνδεσή του. Αντίστοιχα η μονάδα GPS μπορεί να αποδώσει ακριβείς εκτιμήσεις για τη συμπεριφορά των στατιστικών σφαλμάτων του IMU. Η ενοποίηση των παρατηρήσεων GPS και IMU/INS γίνεται συνήθως με τη μέθοδο Kalman filtering, που εφαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο.

Τοπογραφικές Μετρήσεις: Πολλές φορές η αποτελεσματικότητα επίγειων στατικών μετρήσεων GPS, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα, είναι αμφίβολη λόγω περιορισμένης ορατότητας δορυφόρων. Ταυτόχρονα ο προσδιορισμός συντεταγμένων με κλασικές τοπογραφικές διαδικασίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία λόγω της υπάρχουσας δόμησης. Ωστόσο οι μετρήσεις αποστάσεων ή υψομετρικών διαφορών είναι ιδιαίτερα εύκολες και δεν απαιτούν τη χρήση ιδιαίτερου εξοπλισμού, στοιχεία τα οποία μπορούν

να συνορθωθούν ταυτόχρονα με τις φωτογραμμετρικές παρατηρήσεις σε συνδυασμένη επίλυση με τα εξής πλεονεκτήματα:

- Περιορισμό των απαιτήσεων για ύπαρξη πυκνού δικτύου φωτοσταθερών, συντελώντας σε οικονομικότερες διαδικασίες (μέτρηση αποστάσεων περιμετρικά του block και υψομετρικών διαφορών στην περίμετρο και το εσωτερικό του).
- Αύξηση της σχετικής ακρίβειας μεταξύ αγνώστων σημείων και ισχυροποίηση του δικτύου στα σημεία αυτά.
- Αύξηση της εξωτερικής αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Οι μετρήσεις μπορεί να είναι κεκλιμένες ή οριζόντιες αποστάσεις, υψομετρικές διαφορές, οριζόντιες γωνίες ή διευθύνσεις, κατακόρυφες γωνίες και διαφορές συντεταγμένων σημείων. Η επίδρασή τους στην ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το είδος της παρατήρησης με συνέπεια στην οριζοντιογραφία πρωτεύοντα ρόλο να έχουν οι αποστάσεις και δευτερευόντως οι οριζόντιες γωνίες, ενώ στην υψομετρία οι υψομετρικές διαφορές.

**UAVs KAI
ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΝΑΕΡΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ**

3.1 Εναέρια ψηφιακή Φωτογραμμετρία

Υπάρχουν τέσσερις κύριες φάσεις στην εξέλιξη της επιστήμης της φωτογραμμετρίας, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τις συνεχιζόμενες εξελίξεις της τεχνολογίας και ιδιαίτερα με τις εξελίξεις στην ηλεκτρονική, τους υπολογιστές και το λογισμικό.

Η πρώτη φάση σχετίζεται με την εφεύρεση της φωτογραφίας που ακολουθείται από πολλά χρόνια πειραμάτων και ερευνών τα οποία προετοίμασαν το έδαφος για το επόμενο στάδιο.

Η δεύτερη φάση αντιστοιχεί στην εποχή της αναλογικής φωτογραμμετρίας, όπου εφευρέθηκαν τα αναλογικά όργανα διόρθωσης και στερεοαπόδοσης. Τα αεροπλάνα και οι φωτογραφικές μηχανές είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί στους δυο παγκοσμίους πολέμους και συντέλεσαν στην εγκαθίδρυση των εναέριων τοπογραφικών μεθόδων που εξακολουθούν να αποτελούν τις βασικές αρχές της φωτογραμμετρίας μέχρι και σήμερα.



Αναλογικό Φωτογραμμετρικό Όργανο (1940 - 1953)

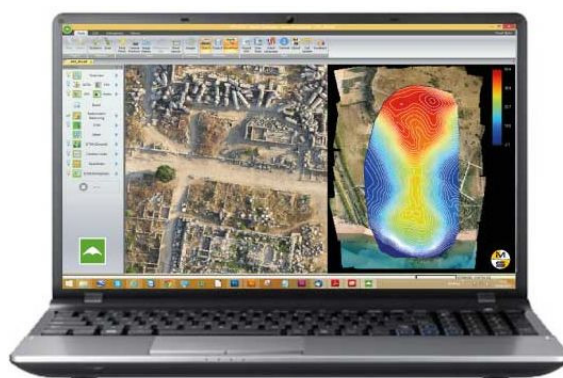
Η δεκαετία του 1950 αποτέλεσε την τρίτη, αναλυτική φάση στην εξέλιξη της φωτογραμμετρίας με την ανακάλυψη των υπολογιστικών συστημάτων. Ήταν η περίοδος που έγιναν σοβαρές προσπάθειες για την εφαρμογή θεωριών εκτίμησης στις φωτογραμμετρικές μετρήσεις, με την

ανάπτυξη σχετικών προγραμμάτων και τη σημαντική βελτίωση τεχνικών όπως ο Αεροτριγωνισμός.



Αναλυτικός Φωτογραμμετρικός Σταθμός (1988 - 1991)

Η τέταρτη και τρέχουσα φάση, αποτελεί την περίοδο της ψηφιακής φωτογραμμετρίας, όπου η αναλογική υπόσταση σε όλα τα στάδια της μεθόδου έχει αντικατασταθεί από ψηφιακά δεδομένα και λογισμικό. Ο κύριος λόγος μετάβασης από την αναλογική και αναλυτική φάση στην ψηφιακή, ήταν η ανάγκη για οικονομικότερα και πιο ευέλικτα φωτογραμμετρικά προϊόντα.



Ψηφιακή Φωτογραμμετρία - Σταθμός εργασίας σε Notebook

Η ψηφιακή φωτογραμμετρία επέτρεψε την τεράστια εξοικονόμηση χρόνου, κόπου και κόστους για την παραγωγή προϊόντων που λόγω της ψηφιακής μορφής τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας σε

άλλα συστήματα ανάλυσης. Οι αναλογικές φωτογραφικές μηχανές αντικαταστάθηκαν με ψηφιακές, καθιστώντας έτσι και το στάδιο της ψηφιοποίησης περιττό, ενώ εξειδικευμένο λογισμικό αναλαμβάνει με μεγάλο βαθμό αυτοματοποίησης, την εφαρμογή όλων εκείνων των φωτογραμμετρικών διεργασιών για την παραγωγή του επιθυμητού προϊόντος.

Ανάλογα με τον τρόπο λήψης των δεδομένων εισόδου (εικόνων) η φωτογραμμετρική μέθοδος διακρίνεται σε δυο τύπους:

- Στην επίγεια (εγγύς πεδίου) φωτογραμμετρία, στην οποία γίνονται κοντινές λήψεις εικόνων, - κατά βάση με φωτογραφικές μηχανές χειρός στηριζόμενες σε τρίποδα -, για την τρισδιάστατη απόδοση μοντέλων αντικείμενων ή σκηνών (κτήρια, πρόσωπα, αυτοκινητιστικά δυστυχήματα, κινηματογραφικά σκηνικά κ.τ.λ.)
- Στην *εναέρια φωτογραμμετρία* όπου οι εικόνες προέρχονται από ειδική φωτογραφική μηχανή (φωτομηχανή) προσαρμοσμένη στο κάτω μέρος ενός αεροπλάνου, με σκοπό την τοπογραφική αποτύπωση και χαρτογράφηση περιοχών μεγάλης έκτασης.



Φωτομηχανές για εναέρια φωτογραμμετρία

Τα προτερήματα της χρήσης εναέριας φωτογραμμετρίας έναντι κλασικών τοπογραφικών μεθόδων, συνοψίζονται στα εξής:

- Στην παροχή ποιοτικής πληροφορίας, παράλληλα με τη μετρητική. Μια φωτογραμμετρική αποτύπωση αποτελεί μια εικονογραφική εγγραφή μιας τοποθεσίας ή ενός αντικειμένου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή .

- Στην ελαχιστοποίηση των εργασιών πεδίου και ότι αυτό συνεπάγεται στην οικονομικότητα και ταχύτητα απόδοσης αποτελεσμάτων. Ενδεχόμενες συμπληρωματικές μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου, χωρίς ανάγκη επιστροφής στο πεδίο. Ειδικότερα η χρήση εναέριας φωτογραμμετρίας σε εφαρμογές μεγάλης έκτασης είναι πολύ οικονομικότερη και ποιοτικά αποδοτικότερη έναντι της χρήσης συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων.
- Στη δυνατότητα εφαρμογής σε περιπτώσεις με δύσκολη και επικίνδυνη προσπέλαση ή σε περιπτώσεις που η κύρια δραστηριότητα είναι δύσκολο ή οικονομικά ασύμφορο να διακοπεί προκειμένου να γίνει η λήψη των τοπογραφικών μετρήσεων.

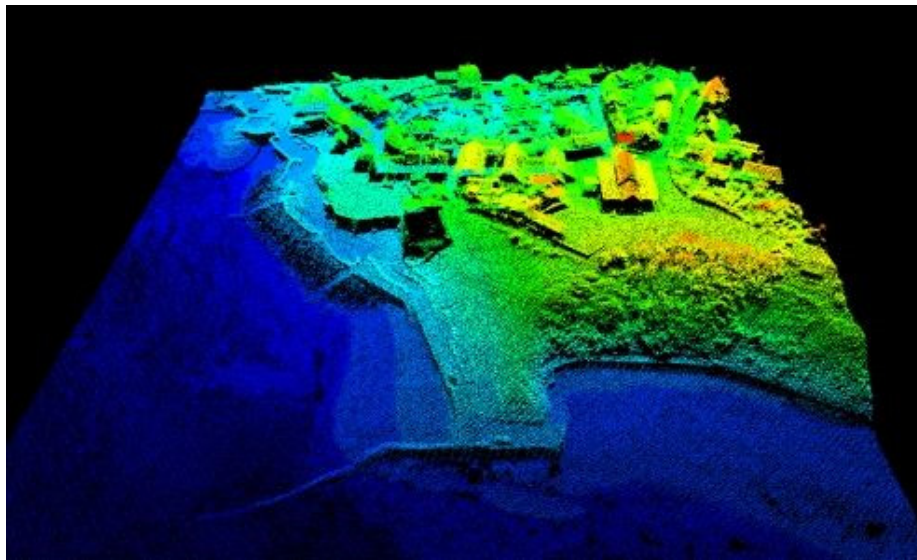
..ενώ τα μειονεκτήματα:

- Η επίδραση των καιρικών συνθήκων στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, όπως για παράδειγμα η μη ακριβής αναπαράσταση του εδάφους σε περιοχές καλυμμένες με νερό ή χιόνι.
- Η αδυναμία ακριβούς αποτύπωσης αντικειμένων ή περιοχών που καλύπτονται από ψηλότερα αντικείμενα, όπως κατασκευές, κτήρια ή δέντρα.
- Η εξάρτηση από την ακρίβεια των φωτοσταθερών σημείων.
- Η γενική ακρίβεια της μεθόδου είναι κατά βάση χαμηλότερη σε σύγκριση με τις συμβατικές τοπογραφικές μεθόδους.

Η εφαρμογή της εναέριας φωτογραμμετρίας μπορεί να συντελεστεί με λήψη συμβατικών αεροφωτογραφιών, εναέρια σάρωση με laser (airborne LiDAR – Light Detection And Ranging) ή λήψη φωτογραφιών για DIM (Dense Image Matching).

Airborne LiDAR: Αποτελεί μονάδα ενεργητικού δέκτη προσαρμοσμένου σε εναέριο μέσο, ο οποίος εκπέμπει χιλιάδες παλμούς laser ανά δευτερόλεπτο. Ο κάθε παλμός ανακλάται και επιστρέφει στο δέκτη ενώ ο χρόνος της διαδρομής μετριέται με ακρίβεια και μετατρέπεται σε απόσταση. Αυτή η απόσταση καθώς και η θέση και ο προσανατολισμός του αεροσκάφους (GPS/INS), χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό

των συντεταγμένων του στόχου – σημείου στο χώρο. Για κάθε παλμό και ανάλογα με τη γωνία σάρωσης, υπάρχουν πολλαπλές επιστροφές, με τις πρώτες να αντιστοιχούν στην αποτύπωση ψηλότερων σημείων (DSM – Digital Surface Model) και τις τελευταίες στην αποτύπωση του εδάφους (DTM - Digital Terrain Model) δίνοντας στο LiDAR, ένα ισχυρό πλεονέκτημα έναντι της φωτογραμμετρίας στην αποτύπωση καλυπτόμενων περιοχών κάτω από δέντρα ή βλάστηση.

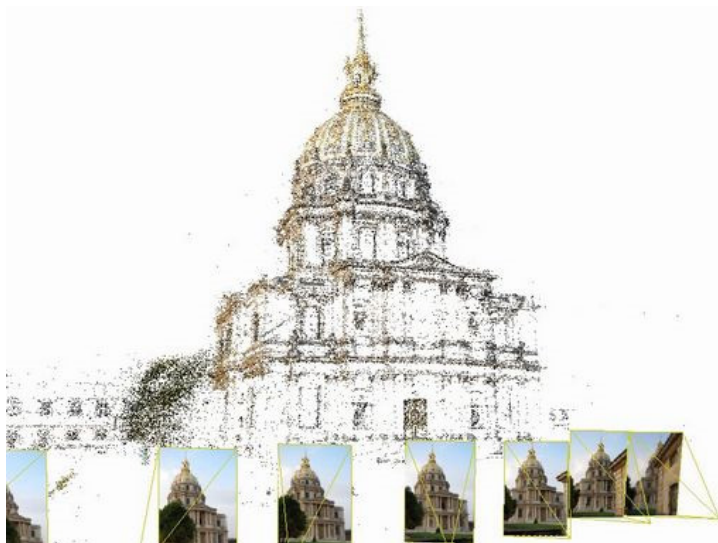


Επιφάνεια DSM παραχθείσα από εναέρια σάρωση LiDAR

Το προϊόν μιας σάρωσης LiDAR είναι ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων με συντεταγμένες στο χώρο, μια απ' ευθείας τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής ή του αντικειμένου που σαρώθηκε, χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες. Ωστόσο η χαμηλή ερμηνευτική πληροφορία ενός νέφους σημείων σε σχέση με μια εικόνα, περιόρισε την χρήση του LiDAR σε έναν επικουρικό ρόλο κατά την εφαρμογή κλασσικών φωτογραμμετρικών μεθόδων και ιδιαίτερα για τη βελτίωση του υψομετρικού σφάλματος, τη δυνατότητα 24ωρης λειτουργίας και τη δυνατότητα αποτύπωσης κάτω από τη βλάστηση. Από τις μεθόδους εναέριας φωτογραμμετρίας, η υψηλής πυκνότητας σάρωση με LiDAR (> 40 σημεία/μ²), επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα ακρίβειας, ωστόσο η σάρωση σε τέτοια πυκνότητα συνήθως είναι εξαιρετικά ακριβή.

Συμβατική Αεροφωτογράφιση: Αφορά στη λήψη εναέριων εικόνων μιας περιοχής με συγκεκριμένη επικάλυψη κατά μήκος και πλάτος με τη βοήθεια ειδικών φωτογραφικών μηχανών μεγάλου φορμά. Το τρισδιάστατο στερεομοντέλο προκύπτει με ημιαυτόματη ή χειροκίνητη επεξεργασία των εικόνων, σε ειδικό στερεοσκοπικό φωτογραμμετρικό σταθμό από εξειδικευμένο προσωπικό. Αν και η πυκνότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις επίγειες μεθόδους, τις περισσότερες φορές δεν επαρκεί για ικανοποιητική απόδοση περιοχών με ποικιλόμορφο ανάγλυφο (π.χ. υπαίθριες μεταλλευτικές εκμεταλλεύσεις). Το κόστος της συμβατικής αεροφωτογράφισης, είναι αρκετά υψηλό με αποτέλεσμα η μέθοδος να θεωρείται προσιτή μόνο σε εφαρμογές πολύ μεγάλων εκτάσεων ή σε εκτάσεις που εμπίπτουν στην ίδια σύμβαση έργου.

Dense Image Matching: Με τη μέθοδο αυτή δημιουργείται ένα πυκνό νέφος ομόλογων σημείων στο χώρο, μέσω φωτογραφιών με υψηλή επικάλυψη. Τα ομόλογα σημεία, οι θέσεις λήψης και η γεωμετρία του μοντέλου προσδιορίζονται ταυτόχρονα μέσω μιας διαδικασίας αυτόματου εντοπισμού κοινών σημείων και χαρακτηριστικών σε επικαλυπτόμενες εικόνες, γνωστής από το χώρο της τεχνητής όρασης που καλείται SFM (Structure From Motion), ενώ τα εντοπιζόμενα κοινά σημεία αποτελούν στοιχεία εισόδου φωτογραμμετρικών μεθοδολογιών όπως ο Αεροτριγωνισμός.

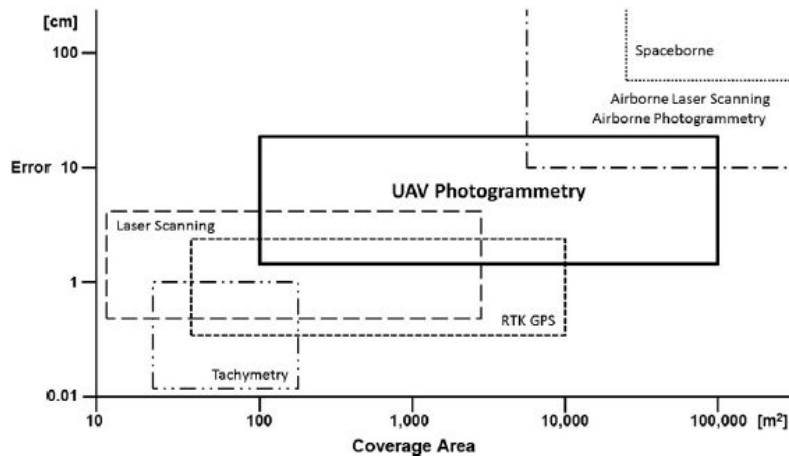


Παραγωγή νέφους ομόλογων σημείων με Dense Image Mapping

Η λειτουργία του αλγορίθμου SFM στηρίζεται στη χρήση συνδυασμών από “region of interest detectors” και “feature descriptors”. Ο detector εντοπίζει περιοχές με απότομες αλλαγές που είναι πιθανό να εντοπιστούν και σε άλλες εικόνες, ενώ ο descriptor τις περιγράφει με τρόπο αμετάβλητο ως προς τους περισσότερους αφινικούς μετασχηματισμούς (περιστροφή, κλίμακα, μετάθεση). Κοινές περιπτώσεις αποτελούν ο DoG (Difference of Gaussians) detector και ο SIFT (Scale Invariant Feature Transform) descriptor με το δεύτερο να εμφανίζει μεγάλη ανοχή στις αλλαγές φωτεινότητας και θέσης με αποτέλεσμα τις ανιχνεύσιμες ομοιότητες ακόμη και σε εικόνες που έχουν ληφθεί από διαφορετικές γωνίες. Παρόλο που θεωρητικά η εν λόγω μέθοδος μπορεί να ενταχθεί στη συμβατική αεροφωτογράφιση, η απαίτηση για υψηλές επικαλύψεις που συνεπάγονται πολλαπλές και πολύ κοντινές λωρίδες πτήσης, τη μετατρέπει σε μέθοδο πρακτικά και οικονομικά ασύμφορη για την περίπτωση λήψης εικόνων από επανδρωμένα εναέρια μέσα. Ωστόσο οι χαμηλές και σε περιορισμένη έκταση πτήσεις αποτελούν εγγενές πεδίο εφαρμογής των UAVs, με αποτέλεσμα οι περισσότερες εταιρείες που συλλέγουν δεδομένα με μη επανδρωμένα αεροσκάφη να χρησιμοποιούν αυτή την προσέγγιση για μοντελοποίηση.

3.2 Η χρήση των UAV στη Φωτογραμμετρία

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, η χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων στη φωτογραμμετρία, δεν είναι μόνο αποτέλεσμα της δυνατότητάς τους για πτήση και λήψη εικόνων, αλλά ο συνδυασμός τους με φθηνές και αποδοτικές ψηφιακές μεθόδους επεξεργασίας όπως το DIM. Ο συνδυασμός αυτός ίσως αποτελέσει μια καινούργια φάση στην ιστορία της φωτογραμμετρίας, δεδομένου πως η τεχνολογία των δύο μερών εξελίσσεται συνεχώς και οδεύει προς την πλήρη αυτοματοποίηση της μεθόδου. Σχεδόν όλες οι μεγάλες εταιρείες του χώρου, έχουν πλέον αναμιχθεί ενεργά στο “UAV Photogrammetry” προσφέροντας ολοκληρωμένες λύσεις φωτογραμμετρικών προϊόντων βασιζόμενων σε UAV και λογισμικό, δημιουργώντας μια αγορά πολλών εκατομμυρίων δολαρίων παγκοσμίως.



Διάγραμμα ακρίβειας - έκτασης ανάλογα με τη μέθοδο αποτύπωσης

Η φωτογραμμετρία με χρήση UAV, παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα που έχει η εναέρια φωτογραμμετρία έναντι των συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων και επιπλέον:

- Τη δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές χαμηλού υψομέτρου και κοντινού πτητικού προφίλ στα αντικείμενα ή σε ειδικές καιρικές συνθήκες όπου το χαμηλό υψόμετρο πλεονεκτεί.
- Τη δυνατότητα αντικατάστασης ενός επανδρωμένου εναέριου μέσου σε όλες τις περιπτώσεις που η χρήση του δεν είναι εφικτή για λόγους ασφάλειας, διαθεσιμότητας ή κόστους.
- Τη γρήγορη απόκτηση μετρητικής πληροφορίας, πολλές φορές με τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο εικόνων και δεδομένων στο σταθμό βάσης.

Comparison of RTK GPS vs. UAV survey results.

Survey method		RTK GPS survey	UAV photogrammetric mapping
Coverage area		60,000 m ²	60,000 m ²
Time needed	Preparation	30 min	40 min
	Recording	540 min	15 min
	Evaluation/ Processing	60 min	150 min
	Overall	630 min	205 min
Point count		1800	5,500,000 (not all might be used)
Point density		0.03 points/m ²	92 points/m ²
Result		Interpreted surface model	Dense surface model, orthophoto

Σύγκριση UAV φωτογραμμετρίας και συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων

Ιδιαίτερα σε εφαρμογές μικρής κλίμακας που είναι αναγκαία η επαναληψιμότητα των μετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα, η φωτογραμμετρία με UAV μπορεί να αποτελέσει κορυφαίο εργαλείο αποτίμησης και σχεδιασμού με πολύ μικρό κόστος. Επιπρόσθετα η συνεχιζόμενη τεχνολογική εξέλιξη, επέτρεψε το χειρισμό τόσο του UAV όσο και του φωτογραμμετρικού λογισμικού από μη εξειδικευμένο προσωπικό, χωρίς την ανάγκη για επιπρόσθετες δαπάνες χρημάτων και χρόνου για εκμάθηση.

Το κόστος απόκτησης και συντήρησης ενός συστήματος UAV είναι πλέον αρκετά χαμηλό, ώστε αυτό να μην αποτελεί ιδιαίτερο παράγοντα επιλογής για τη χρήση σε μια εφαρμογή φωτογραμμετρίας, σε σχέση με άλλους παράγοντες όπως η ικανότητα ανύψωσης φορτίου, το εύρος πτήσης ή το μέγεθος. Αυτή τη στιγμή στην αγορά κυριαρχούν τα παρακάτω είδη UAV, καθένα με ιδιαίτερα λειτουργικά και πτητικά χαρακτηριστικά:



Πτέρυγα UX5 της εταιρείας Trimble

Πτέρυγες (Wings): Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ενιαία πτέρυγα σε σχήμα V με δυο επιφάνειες ελέγχου. Η απογείωσή τους γίνεται συνήθως με το χέρι ή καταπέλτη, ενώ λόγω των δυο μόνο πηδαλίων, ο πτητικός έλεγχος είναι ιδιαίτερα εύκολος ακόμη και σε πλήρως χειροκίνητη ρύθμιση.

Λόγω του ότι είναι ιδιαίτερα ελαφριά και εύκολα ελεγχόμενα, η προσγείωσή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμη και σε περιορισμένο χώρο, χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια και κυρίως με ελάχιστες ή καθόλου φθορές. Η δυνατότητα φορτίου είναι περιορισμένη με αποτέλεσμα αφενός μεν να φέρουν φωτογραφικές μηχανές περιορισμένων δυνατοτήτων, αφετέρου δε οι μπαταρίες τους να είναι χαμηλής ή μέτριας ονομαστικής χωρητικότητας περιορίζοντας το εύρος πτήσης. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους είναι η περιορισμένη αντοχή στον αέρα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την

ποιότητα των φωτογραφιών, δεδομένης και της απουσίας μηχανισμών σταθεροποίησης.

Μοτοανεμόπτερα (Motor Gliders): Αφορούν σε μια συμβατική σχεδίαση αεροπλάνου υπό κλίμακα, που αποτελείται από την κύρια πτέρυγα, το σώμα και το ουραίο σύστημα με συνολικά 4 επιφάνειες ελέγχου. Παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλεπόμενη και σταθερή συμπεριφορά κατά την πτήση τους, με σαφώς μεγαλύτερες ανοχές στις καιρικές συνθήκες σε σχέση με τις πτέρυγες. Λόγω της ιδιαίτερης δυνατότητάς τους για ανύψωση φορτίου, μπορούν να φέρουν μεγαλύτερες πηγές ενέργειας



Skywalker UAV 1.68m με ελεγκτή πτήσης Arduplane

και περισσότερο ή καλύτερο εξοπλισμό, κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη επιχειρησιακή εμβέλεια, περισσότερες δυνατότητες και ποιοτικότερα αποτελέσματα. Μειονέκτημά τους η ανάγκη για χώρο προσγείωσης ή /και απογείωσης (αν λόγω μεγέθους δεν γίνεται με το χέρι) αλλά και για έμπειρο χειριστή ιδιαίτερα στις φάσεις που τυχόν απαιτηθεί χειροκίνητη πλοήγηση ή προσγείωση.

Ελικόπτερα Πολλαπλών Στροφείων (Multicopters): Αποτελούν το σύστημα επιλογής στις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω της πλήρους αυτοματοποίησης σε όλο το φάσμα της λειτουργίας τους, από την απογείωση και την πλοήγηση μέχρι και την προσγείωση. Προσφέρουν πολύ ακριβή έλεγχο πτήσης, γεγονός που τα κάνει κατάλληλα σε



Multicopter τύπου X8 με σταθεροποιητή κάμερας και ανασυρόμενα σκέλη

εφαρμογές πολύ υψηλής ακρίβειας με χαμηλό υψόμετρο ή πιθανά εμπόδια. Η ανοχή στις καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα στον αέρα είναι συνάρτηση ειδικών τεχνικών χαρακτηριστικών όπως το βάρος και το μέγεθος των ελίκων, ωστόσο σε γενικές γραμμές είναι μεγαλύτερη από τις προηγούμενες

κατηγορίες. Οι μεγάλες δυνατότητες ανύψωσης φορτίου επιτρέπουν τη μεταφορά μεγάλου όγκου εξοπλισμού, όπως μηχανισμούς σταθεροποίησης, πολυφασματικές κάμερες, μονάδες LiDAR αλλά και πηγές ενέργειας μεγάλης χωρητικότητας. Ωστόσο η πτητική αποδοτικότητά τους είναι μικρή με αποτέλεσμα η ικανότητα τους για μεταφορά μεγάλων πηγών να μην αντισταθμίζει την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Συνέπεια αυτού είναι το περιορισμένο εύρος πτήσης σε σχέση με τις κατηγορίες σταθερής πτέρυγας, με αποτέλεσμα η χρήση τους να μην θεωρείται πρακτική από ένα όριο έκτασης και πάνω.

Type of aircraft	Range	Endurance	Weather and wind dependency	Maneuverability
Balloon	0	++	0	0
Airship	++	++	0	+
Gliders/Kites	+	0	0	0
Fixed wing gliders	++	+	+	+
Propeller & Jet engines	++	++	++	+
Single rotor (helicopter)	+	+	+	++
Multi-copters	+	+	+	++

Υπέρ και κατά των διάφορων τύπων UAV

Από τα παραπάνω είναι φανερό πως στη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου UAV για μια συγκεκριμένη φωτογραμμετρική εφαρμογή θα πρέπει πρώτα να δοθούν απαντήσεις σε ερωτήσεις του τύπου:

- Ποιο είναι το μέγεθος της έκτασης που πρόκειται να αποτυπωθεί;

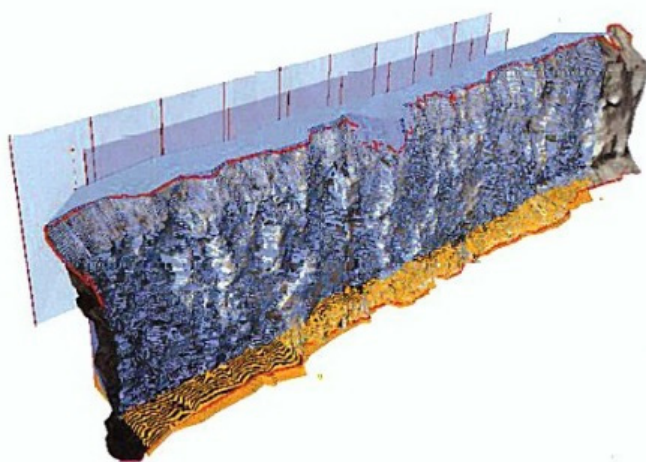
- Ποιο είναι το επιθυμητό ύψος πτήσης;
- Τι είδους φωτογραφική μηχανή θα χρησιμοποιηθεί; Θα χρειαστούν μηχανισμοί για τη σταθεροποίησή της;
- Υπάρχουν φυσικά εμπόδια ή άνθρωποι στον ίδιο χώρο;
- Ποιες οι αναμενόμενες καιρικές συνθήκες;
- Υπάρχει ικανός χώρος απογείωσης / προσγείωσης;

..ώστε να προσδιοριστεί το καταλληλότερο είδος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

3.3 Εφαρμογές στη Μεταλλευτική

Ο συνδυασμός UAV και φωτογραμμετρίας έχει κάνει δυναμική είσοδο τα τελευταία χρόνια στη μεταλλευτική και λατομική βιομηχανία. Βέβαια η αποδοχή της νέας αυτής τεχνολογίας αντιμετωπίζεται ακόμα με αρκετό σκεπτικισμό από τους επαγγελματίες του χώρου, κυρίως λόγω άγνοιας των δυνατοτήτων της και φόβου για το καινούργιο, ή για πιθανή απώλεια θέσεων εργασίας. Ωστόσο οι μέχρι τώρα εφαρμογές, έχουν δείξει πως η υιοθέτηση αυτής της νέας τεχνολογίας στο μεταλλευτικό χώρο αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τη βελτίωση στην αποδοτικότητα και τη λήψη αποφάσεων αλλά και τη βελτίωση στις συνθήκες ασφάλειας της εργασίας μερίδας του προσωπικού.

Οι μέχρι τώρα εφαρμογές αφορούν κυρίως στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις και συγκεκριμένα στους ακόλουθους τομείς:

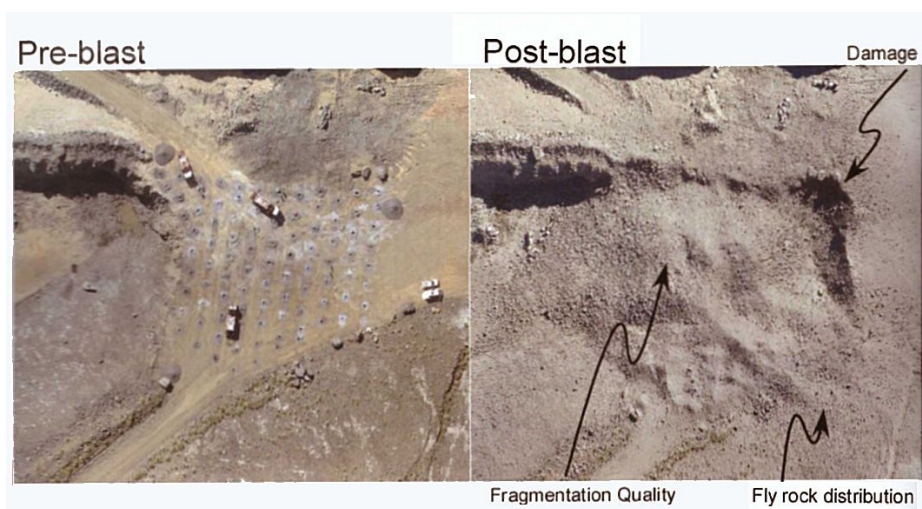


3D απεικόνιση στον υπολογισμό όγκου μετώπου

Σχεδιασμός Ανατινάξεων:

Η δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού ή εποπτείας σε παραμέτρους όπως το προφίλ βαθμίδας, το ελάχιστο φορτίο, η γεωμετρία του block, το back break, οι όγκοι πριν και μετά την ανατίναξη, οι ασυνέχειες και η γεωλογία αλλά και η ποιότητα

θρυμματισμού, επιτρέπουν την αποτίμηση και βελτιστοποίηση του σχεδίου ανατίναξης με καλύτερη κατανομή της θέσης και της ποσότητας των εκρηκτικών υλών. Παράλληλα η δυνατότητα γεωαναφοράς επιτρέπει σε διατρητικά με πλοήγηση GPS την απευθείας εφαρμογή του κανάβου διάτρησης, ελαχιστοποιώντας τις πιθανότητες για προσωπικές παρεμβάσεις ή σφάλματα. Συνέπεια όλων των παραπάνω είναι τόσο το οικονομικό όφελος, όσο και η ελαχιστοποίηση μη επιθυμητών φαινομένων που θα μπορούσαν να προξενήσουν ατυχήματα (π.χ. flyrocks). Αξίζει να αναφερθεί από πραγματική περίπτωση ορυχείου στις ΗΠΑ, πως η ελάχιστη βελτίωση του σχεδίου ανατίναξης, επέφερε μέσα σε ένα χρόνο εξοικονόμηση \$24.000 στο κόστος διάτρησης και \$78.000 στο κόστος των εκρηκτικών υλών.



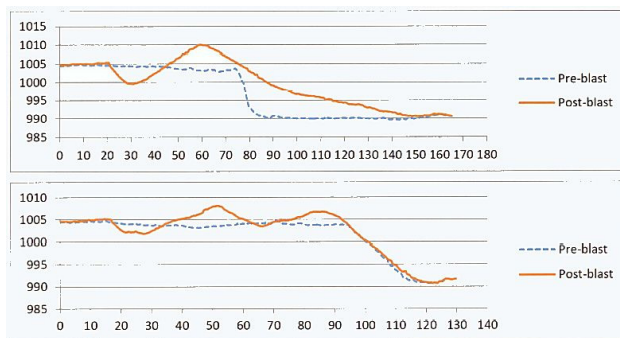
Αποτίμηση αποτελεσμάτων ανατίναξης

Υπολογισμός Αποθεμάτων Προϊόντων: Οι επικίνδυνες και χρονοβόρες αναβάσεις του τοπογραφικού συνεργείου στους σωρούς αποθεμάτων, αντικαθίστανται από εναέρια λήψη φωτογραφιών με UAV, στα πλαίσια μιας σύντομης και συνήθως αυτοματοποιημένης διαδικασίας. Μέσα σε ελάχιστο χρονικό διάστημα η φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων, αποδίδει ακριβείς πληροφορίες για τον όγκο των αποθεμάτων ακόμα και για περιοχές μεγάλης έκτασης χωρίς κίνδυνο για το προσωπικό. Πλέον η διαδικασία δύναται να εκτελείται όσο τακτικά χρειάζεται εφόσον πρακτικά δεν υφίσταται ο παράγοντας του κόστους.



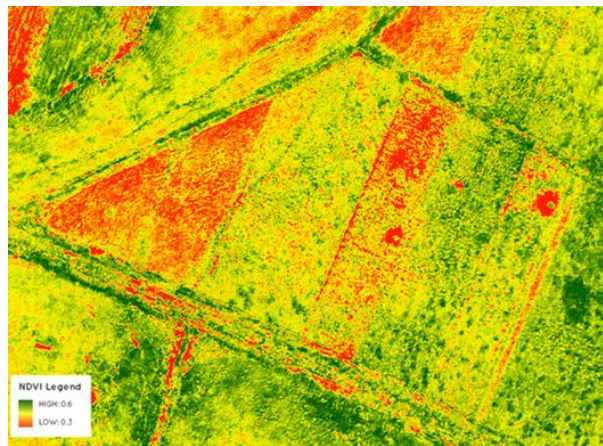
Ογκομέτρηση με φωτογραμμετρικό λογισμικό

Χαρτογράφηση: Οι συμβατικές τοπογραφικές εργασίες προσφέρουν υψηλή απόλυτη ακρίβεια αλλά τα παραγόμενα προϊόντα στερούνται λεπτομέρειας στην απόδοσή τους κάτι πολύ σημαντικό στο μεταλλευτικό χώρο που κυριαρχούν οι έντονες εναλλαγές ανάγλυφου και υφής στις επιφάνειες. Κατά συνέπεια τα πολύ λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα ή οι ορθοφωτοχάρτες που θα προκύψουν μέσω ψηφιακής επεξεργασίας χιλιάδων σημείων, θα είναι πολύ ακριβέστερα και πιο κοντά στην πραγματικότητα από μια συμβατική τοπογραφική αποτύπωση, η οποία ταυτόχρονα στερείται και ποιοτικής πληροφορίας. Η γεωαναφορά των φωτογραμμετρικών προϊόντων επιτρέπει την απ' ευθείας εισαγωγή δεδομένων σε άλλα πακέτα λογισμικού (π.χ. μεταλλευτικής διαχείρισης) επιτρέποντας εποπτεία, αποτίμηση πρακτικών και μελλοντικό σχεδιασμό εργασιών.



Προφίλ τομών CS5 και CS6 πριν και μετά την ανατίναξη

Περιβαλλοντική Αποκατάσταση: Η εγγενής ποιοτική πληροφορία που παρέχει η φωτογραμμετρία παράλληλα με τη μετρητική, βρίσκει πρόσφορο έδαφος και στην επίβλεψη μιας περιβαλλοντικής αποκατάστασης. Πέρα από τα συνηθισμένα πλαίσια ενός συμβατικού χάρτη, με τη χρήση μηχανών εγγύς υπέρυθρου φάσματος (NIR) είναι δυνατή η αποτύπωση της ποιότητας της βλάστησης, επιτρέποντας τη λήψη μέτρων όσο αφορά σε ασθένειες, προβλήματα άρδευσης κ.τ.λ. Ο εντοπισμός των συντεταγμένων των προβληματικών περιοχών επιτρέπει την άμεση και στοχευμένη δράση στην επίλυση του προβλήματος, χωρίς περιττό κόστος.



Ορθοφωτοχάρτης NDVI απόδοσης ποιότητας βλάστησης

Στο πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της χρήσης drone και συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων στον υπολογισμό αποθεμάτων τελικών προϊόντων, σε λατομείο αδρανών στις ΗΠΑ (Whitaker Contracting and Madison Materials). Η μελέτη παρουσιάστηκε το Μάρτιο του 2016 στο ετήσιο συνέδριο AGG1 στο Nashville / Tennessee των ΗΠΑ με τίτλο «Drones and Stockpiles». Τα τελικά συμπεράσματα συνοψίζονται σε 12 φορές ταχύτερους υπολογισμούς, οι οποίοι μπορούν και γίνονται 2 φορές πιο συχνά, στο 1/4 του χρόνου και 22% φθηνότερα σε σχέση με τις συμβατικές τοπογραφικές μεθόδους.

FOR 3 MAIN SITES	EMPLOYEE	3RD PARTY	COMBINED	DRONE	ROI
OVERVIEW	Employee walks over stockpiles	3rd party surveyor via ground or air		Employee flies drone over stockpiles	
TIME PER SITE	36 hours collection + 12 hours analysis	2-3 days by 3rd party with 1-2 weeks notice		3 hours collection + 1 hour analysis	12X faster
MAN HOUR COST	108 hours collection + 36 hours analysis @ \$30 per hour			9 hours collection 3 hour analysis @ \$30/hour	
EQUIPMENT COST	108 hours collection @ \$11 per hour cost of equipment	\$4,800 ground survey \$11,000 air survey		\$25,000 annual cost	
FREQUENCY	4 per year	1 of each per year	6 per year	12 per year	2X more often
ANNUAL COST	576 man hours = \$17,280 + 144 equip hours = \$4,752 = \$22,032	\$4,800 x \$11,000 = \$15,800	\$37,832	144 man hours = \$4,320 + \$25,000 equipment = \$29,320	4X less time 22% less cost

3.4 Το Μέλλον

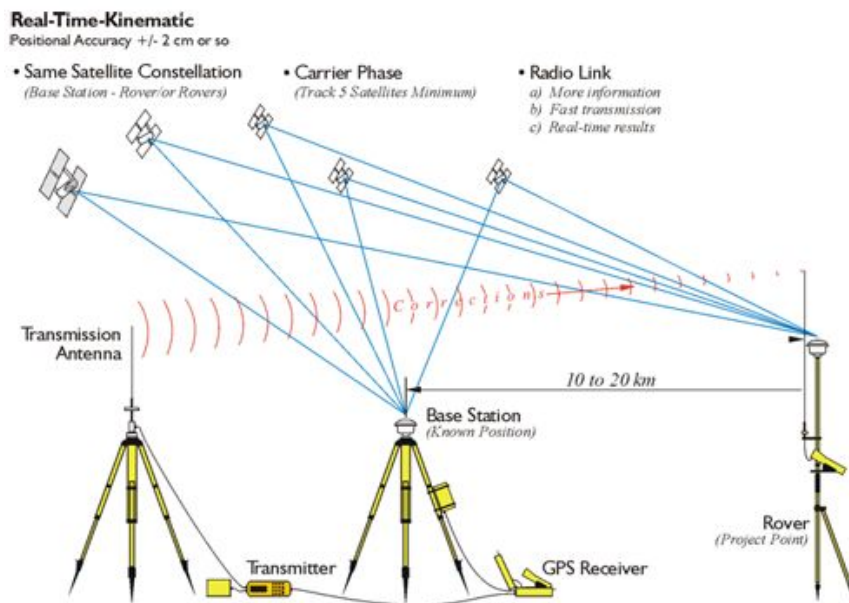
Σημείο αυξημένου ερευνητικού ενδιαφέροντος αποτελεί αυτή τη στιγμή το “Direct Georeferencing” δηλαδή η δυνατότητα για άμεση γεωαναφορά των εικόνων που λαμβάνονται από ένα UAV. Μια γνωστή θέση λήψης εμπλουτισμένη με στοιχεία από την αδρανειακή μονάδα INS του UAV, συνεπάγεται γνωστά στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, με αποτέλεσμα το δραστικό περιορισμό των απαιτούμενων φωτοσταθερών κάτι ιδιαίτερα επιθυμητό σε εφαρμογές που η τοποθέτησή τους είναι δύσκολη ή θεωρείται παράγοντας όχλησης.

Στην πραγματικότητα ωστόσο, ποτέ δεν γίνεται χρήση μόνο των στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων, αλλά εφαρμόζεται συνδυασμένη επίλυση αεροτριγωνισμού με μετρήσεις GPS και συντελεστή βάρους αντιστρόφως ανάλογου της ακρίβειας υπολογισμού τους. Οι λόγοι αφορούν σε πρακτικά προβλήματα ακρίβειας, όπως η αδυναμία χρονικής συνταύτισης της λήψης μιας αεροφωτογραφίας με μια μέτρηση GPS αλλά και τα εγγενή σφάλματα αξιοπιστίας (απώλεια δορυφορικής ορατότητας, στατιστικά σφάλματα κ.τ.λ.) στις μονάδες GPS/INS.

Όλα τα παραπάνω βέβαια αφορούν σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας των οποίων η πιστότητα καθορίζεται βάση συγκεκριμένων και αυστηρών προδιαγραφών. Ωστόσο σε κάποιες εφαρμογές δεν απαιτείται τόσο υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας με αποτέλεσμα η χρήση μη συμβατικών στοιχείων ή μεθόδων να μπορούν να αποφέρουν χρήσιμα αποτελέσματα.

Οι μονάδες GPS που χρησιμοποιούν όλα τα UAV χρησιμεύουν στην εκτέλεση αυτόνομων αποστολών και στη διατήρηση της θέσης τους στο χώρο. Αποτελούν μονάδες οι οποίες στηρίζουν τη λειτουργία τους στη λήψη συντεταγμένων των δορυφόρων και στον υπολογισμό των ψευδοαποστάσεων προς 4 δορυφόρους κατ' ελάχιστο. Η επίλυση με οπισθοτομία στο χώρο, συνεπάγεται τον υπολογισμό των συντεταγμένων του δέκτη και κατά συνέπεια του UAV. Ωστόσο η ακρίβεια που επιτυγχάνεται μέσω ανάλυσης της ψευδοαπόστασης αντιστοιχεί σε μερικά μέτρα στην καλύτερη περίπτωση, δηλαδή χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πλήθος παράγοντες (π.χ. ιονόσφαιρα - τροπόσφαιρα, multipath reflections, σφάλματα συγχρονισμού, κ.τ.λ.) που επηρεάζουν αρνητικά την ορθότητα των υπολογισμών. Συνεπώς η ακρίβεια που επιτυγχάνεται δεν επαρκεί για τοπογραφικές εφαρμογές και εισάγει στα δεδομένα εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων σφάλματα τα οποία μεταδίδονται αυτούσια στην αντίστοιχη γεωδαιτική συντεταγμένη. Η βελτίωση της ακρίβειας γίνεται με χρήση δεκτών RTK GPS (Real Time Kinematic) στα UAV, ή / και με εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων ενοποίησης παρατηρήσεων (Sensor Fusion) όπως η μέθοδος Kalman filtering.

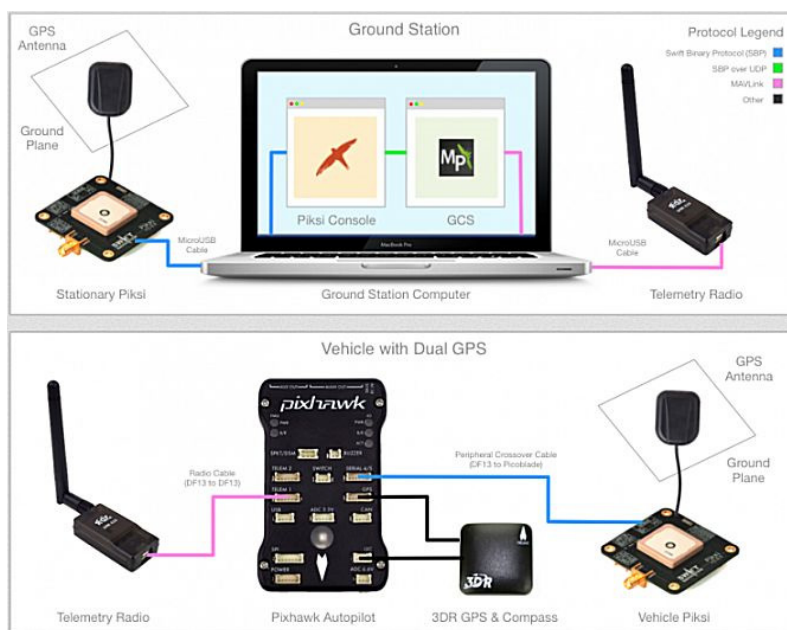
RTK GPS: Η μέθοδος RTK δεν αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου DGPS (Differential GPS) καθώς, πέραν της διατήρησης του στοιχείου της διαφορικότητας, στηρίζεται σε αρχές λειτουργίας που δεν σχετίζονται με αυτές του διαφορικού GPS. Στο διαφορικό GPS συμμετέχουν δυο δέκτες, ο base με γνωστές συντεταγμένες ως προς το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς και ο rover που μεταφέρεται στο σημείο αγνώστων



Διάταξη λειτουργίας RTK GPS

συντεταγμένων. Έχοντας τον δέκτη base σε γνωστό σημείο, είναι δυνατός ο υπολογισμός και η αφαίρεση από τη μέτρηση των ψευδοαποστάσεων συστηματικών σφάλματων που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες όπως π.χ. η ατμόσφαιρα. Με την παραδοχή πως ο δέκτης rover είναι «κοντά» και πως ισχύουν τα ίδια σφάλματα στις ψευδοαποστάσεις, γίνεται διόρθωση στις μετρήσεις του, μέσω λογισμικού και ασύρματης σύζευξης, ενώ εξασφαλίζεται ταυτόχρονα πως οι δυο δέκτες λαμβάνουν σήμα από τους ίδιους δορυφόρους, με την ακρίβεια να κυμαίνεται σε επίπεδα κάτω του μέτρου. Οι ομοιότητες όμως με τη μέθοδο RTK σταματούν εδώ, καθώς στη μέθοδο αυτή δεν γίνεται χρήση του περιεχομένου του σήματος αλλά των ίδιων των χαρακτηριστικών του σήματος, όπως η μέτρηση του φορέα φάσης δηλαδή της απόστασης μεταξύ δέκτη και δορυφόρου εκφρασμένη σε κύκλους της φέρουσας συχνότητας. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει πολύ πιο ακριβείς μετρήσεις που φθάνουν στην τάξη των μερικών cm. Ο δέκτης base μεταδίδει τη μέτρηση του φορέα φάσης που λαμβάνει προς άλλους δέκτες rover οι οποίοι τη συγκρίνουν με τις δικές τους, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή σχετική ακρίβεια μεταξύ τους. Η τοποθέτηση του base σε σημείο γνωστών συντεταγμένων επιτρέπει και την επίτευξη υψηλής απόλυτης ακρίβειας. Η χρήση διατάξεων RTK στα UAV έχει ξεκινήσει πολύ

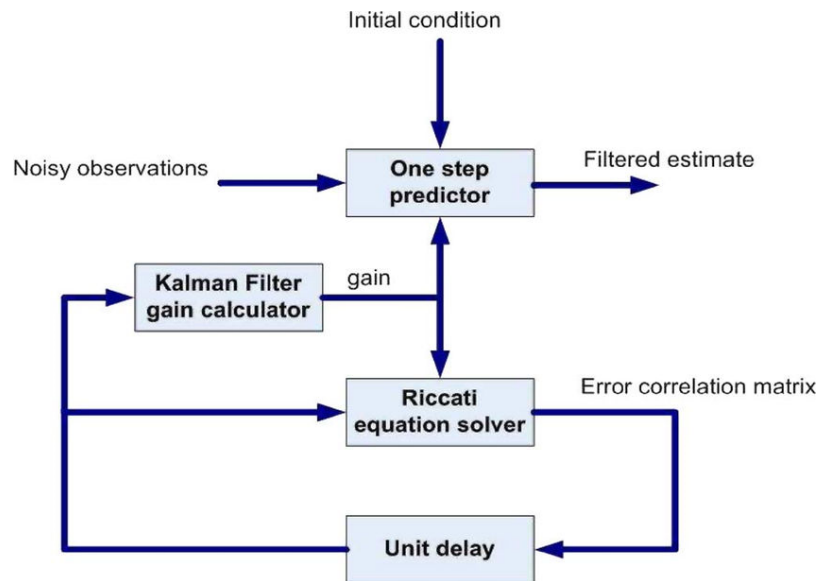
πρόσφατα, κυρίως σε μοντέλα που απευθύνονται σε επαγγελματίες τοπογράφους με αξιόλογα αποτελέσματα. Η δυνατότητα όμως για έλεγχο και προσγειώσεις με ακρίβεια cm αναμένεται πως σύντομα θα δώσει την ώθηση για τη μετάβαση της τεχνολογίας και στα καταναλωτικά drones.



Διάγραμμα Base και Rover του RTK GPS - Pixsi κατάλληλου για ελεγκτές πτήσης Pixhawk

Kalman filtering: Το φίλτρο Kalman αναπτύχθηκε από τον Rudolf E. Kalman το 1960 και αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις του περασμένου αιώνα, δεδομένου πως επέτρεψε την αποβολή της αβεβαιότητάς του θορύβου από οποιαδήποτε διεργασία ή μέτρηση που επηρεάζεται από αυτόν. Ανάμεσα σε όλα τα σημαντικά μαθηματικά εργαλεία που υπάρχουν για την ανάλυση στοχαστικών / δυναμικών συστημάτων, το φίλτρο Kalman είναι από τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα καθώς επιτρέπει ένα είδος πρόβλεψης και διόρθωσης στις τιμές των μεταβλητών της κατάστασης ενός συστήματος ή της εξέλιξης ενός φαινομένου. Χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών από τη δορυφορική πλοήγηση (GPS/INS) και την εξομάλυνση (smoothing) ήχου και εικόνας, μέχρι τα οικονομικά μοντέλα Autoregressive-moving-average-models για τη μελέτη και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς χρονοσειρών και γενικά σε οποιαδήποτε διαδικασία

απαιτείται υψηλή ακρίβεια δεδομένων. Επί της ουσίας αποτελεί έναν επαναλαμβανόμενο μαθηματικό αλγόριθμο, ο οποίος μπορεί να εκτελείται σε πραγματικό χρόνο και να εκτιμά την ορθή τιμή ενός μεγέθους όταν οι μετρούμενες τιμές εμπεριέχουν απρόβλεπτα ή τυχαία σφάλματα, αβεβαιότητα ή διακύμανση. Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός φίλτρου Kalman είναι:



Τα στάδια του φίλτρου Kalman

- Η διακριτότητα, καθώς βασίζεται σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις που γίνονται σε σταθερά χρονικά διαστήματα.
- Η αναδρομικότητα, εφόσον οι μελλοντικές προβλέψεις στηρίζονται στην παρούσα κατάσταση του συστήματος (π.χ. θέση) αλλά και σε εκτιμήσεις για την επίδραση παραγόντων ελέγχου στην αλλαγή της κατάσταση του συστήματος (π.χ. πηδάλιο).
- Η λειτουργία του συνίσταται στην πρόγνωση, στη μέτρηση μιας τιμής εισόδου, στη σύγκριση των δυο, στο μετριάσμο της διαφοράς και τέλος στη ρύθμιση της εκτίμησής του με την προκύπτουσα τιμή.
- Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της μαθηματικής μοντελοποίησης του συστήματος. Αν το μαθηματικό μοντέλο περιγράφει ορθά την πραγματικότητα, τότε η εκτίμηση του φίλτρου θα συγκλίνει σε αυτό που πραγματικά συμβαίνει.

Στα UAV η χρήση του EKF (Extended Kalman Filtering = μη γραμμικής εκδοχής του φίλτρου), ξεκίνησε πρόσφατα με την έλευση των 32bit ελεγκτών πτήσης καθώς οι υπολογισμοί σε πραγματικό χρόνο απαιτούσαν αυξημένη υπολογιστική ισχύ. Κύρια εφαρμογή αποτελεί η συνδυασμένη χρήση διαφορετικών τύπων αισθητήρων για την ορθή εκτίμηση της θέσης, της ταχύτητας και του γωνιακού προσανατολισμού του σκάφους, δεδομένων των αποκλίσεων που εμφανίζουν οι ξεχωριστές μετρήσεις των αντίστοιχων μεγεθών από τον ανάλογο αισθητήρα, σε σχέση με τις επικρατούσες συνθήκες. Αποτέλεσμα της χρήσης EKF στο λογισμικό ελέγχου των ελεγκτών πτήσης, είναι η βελτίωση της πτητικής συμπεριφοράς και αξιοπιστίας των UAV, στοιχεία που εξελίσσονται συνεχώς με την προσθήκη νέων και προηγμένων μαθηματικών εργαλείων (π.χ. computer vision). Ένα από τα αντικείμενα διερεύνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αποτελεί η εκτίμηση σφάλματος μιας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης, όπου αντί φωτοσταθερών σημείων γίνεται χρήση των στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων που προκύπτουν μέσω ενοποίησης παρατηρήσεων από τη μονάδα GPS/INS.

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ
ΑΝΑΤΙΝΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΥΑΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ**

4.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανατίναξης μετώπου παραγωγής σε λατομείο με χρήση UAV και φωτογραμμετρίας. Η εργασία πραγματοποιήθηκε ουσιαστικά σε δυο στάδια:

- στο εργαστήριο, όπου διενεργήθηκε η προετοιμασία του εξοπλισμού, ο προγραμματισμός πτήσης, αλλά και η μετέπειτα ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων
- στο πεδίο και ειδικότερα σε λατομείο ασβεστολίθου στην Βοιωτία, όπου οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πλήρη κλίμακα και υπό συνθήκες παραγωγικής λειτουργίας του λατομείου.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μιας ανατίναξης προϋποθέτει τον προσδιορισμό συγκεκριμένων στοιχείων και μεγεθών. Στην παρούσα περίπτωση ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αποκλίσεις αυτών των μεγεθών κατά τον υπολογισμό τους με τις συμβατικές μεθόδους και τη φωτογραμμετρική μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εξέλιξη της εργασίας πρέπει να πραγματοποιηθούν:

1. Εκτίμηση της μεταβολής του φορτίου της ανατίναξης κατά το ύψος του μετώπου με την βοήθεια των στοιχείων της διάτρησης, πριν την ανατίναξη. Σύγκριση του αποτελέσματος με αυτό που προσδιορίζεται με τη χρήση φωτογραμμετρίας.
2. Υπολογισμός του στερεού (in situ) όγκου που ανατινάχθηκε με φωτογραμμετρική μέθοδο και σύγκριση αυτού με τον όγκο που υπολογίζεται με την συμβατική μέθοδο κυβισμού.
3. Αποτύπωση του σωρού του εξορυγμένου πετρώματος και κατασκευή του προφίλ. Μελέτη του σχήματος αυτού και εκτίμηση της διασποράς. Υπολογισμός του όγκου του σωρού και προσδιορισμός του συντελεστή επιπλήσματος.
4. Εκτίμηση της κατανομής της κοκκομετρίας του εξορυγμένου πετρώματος.
5. Εκτίμηση μεταβολής της γωνίας πρανούς και της μορφής/όγκου τυχόν υβώματος στο πόδι της βαθμίδας καθώς και προσδιορισμός

τυχόν ρωγμών στο άνω δάπεδο της βαθμίδας (back break) και της μορφής/έκτασης αυτών.

Για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων στοιχείων, είναι ευνόητο πως πρέπει να πραγματοποιηθούν τρεις φωτογραμμετρικές αποτυπώσεις: Η πρώτη πριν την ανατίναξη, η δεύτερη αμέσως μετά και η τρίτη μετά την απομάκρυνση του σωρού του εξορυγμένου πετρώματος από το σημείο.

Δυστυχώς, λόγω αστοχίας του εξοπλισμού κατέστη δυνατή η λήψη των απαιτούμενων μετρήσεων μόνο κατά το 1/3 με αποτέλεσμα την αδυναμία προσδιορισμού αρκετών στοιχείων για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ανατίναξης. Ωστόσο, προκειμένου να ολοκληρωθεί η περιγραφή της απαιτούμενης μεθοδολογίας και ιδιαίτερα για την περίπτωση των ογκομετρήσεων, θα γίνει χρήση πλασματικών μοντέλων επιφανείας (DTMs).

Τέλος θα γίνει εκτίμηση της απόκλισης, στην περίπτωση χρήσης στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού απ' ευθείας από τη μονάδα GPS/INS του UAV (sensor fusion), αντί φωτοσταθερών σημείων.

4.2 Εξοπλισμός

Στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Εξόρυξης Πετρωμάτων περιλαμβάνεται υλικό και λογισμικό κατάλληλο για την διενέργεια εναέριων φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων. Συγκεκριμένα περιλαμβάνονται UAV σταθερής πτέρυγας και πολλαπλών στροφείων καθώς και φωτογραφικές μηχανές εναλλάξιμων και μη φακών:

- Το UAV σταθερής πτέρυγας E384 της εταιρείας EVENT38 UAS ανήκει στην κατηγορία των μοτοανεμόπτερων με άνοιγμα πτέρυγας 168cm και ελεγκτή αυτόνομης πτήσης APM 8bit ανοικτής σχεδίασης και λογισμικού, το οποίο μπορεί να φέρει ειδική φωτογραφική μηχανή μη εναλλάξιμων φακών κατηγορίας compact. Το E384 είναι κατάλληλο για φωτογραμμετρικές μετρήσεις για τις οποίες απαιτείται ακτίνα δράσης από 1 έως 4 χιλιόμετρα.

- Το UAV πολλαπλών στροφείων MK-HEXA της εταιρείας Mikrokopter ανήκει στην κατηγορία των ελικοπτέρων με έξι έλικες, μεγέθους 550mm

με ελεγκτή πτήσης ανοικτής σχεδίασης αλλά κλειστού λογισμικού. Φέρει servo gimbal για compact φωτογραφική μηχανή, το οποίο αργότερα αντικαταστάθηκε με carbon ιδιοκατασκευή κατάλληλη για μηχανή



Αριστερά το UAV E384 – δεξιά εικόνα που λήφθηκε από ορυχείο το 2012

μεγέθους DSLR. Το πεδίο εφαρμογής του περιλαμβάνει αποστολές ακτίνας μερικών εκατοντάδων μέτρων, όπου απαιτείται ευελιξία κινήσεων λόγω μορφολογίας του χώρου. Το MK-HEXA αποτέλεσε μια από τις πρώτες αξιόλογες υλοποιήσεις UAV με υψηλό βαθμό πτητικού αυτοματισμού καθώς περιλάμβανε τη δυνατότητα για αυτόνομη πτήση στις 3 διαστάσεις. Μετά από έξι χρόνια παρουσίας, ο κατασκευαστής συνεχίζει να παρέχει σποραδικές ενημερώσεις λογισμικού για το συγκεκριμένο προϊόν, ωστόσο οι δυνατότητες του υλικού έχουν πλέον ξεπεραστεί με αποτέλεσμα η φύση των ενημερώσεων να περιορίζεται αποκλειστικά στη διόρθωση λαθών.



MK-Hexa και Canon EOS Rebel Ti2 (550D)

- Η φωτογραφική μηχανή Canon EOS 550D ανήκει στην κατηγορία των DSLR (Digital Single Lens Reflex) φωτογραφικών μηχανών, που επιτρέπουν την εποπτεία της λήψης μέσω μηχανισμού πρίσματος και καθρέπτη. Αν και μοντέλο του 2010, αποτέλεσε από τα πιο επιτυχημένα μοντέλα καθώς μπόρεσε να συνδυάσει τη χαμηλή τιμή με τις επιδόσεις πολύ ακριβότερων φωτογραφικών μηχανών. Φέρει αισθητήρα τύπου CMOS διαστάσεων 22,3mm x 14,9mm (APS-C) με μέγιστη ανάλυση τα 18Μpixels και μέγιστη εγγενή ευαισθησία ISO στις 6400 μονάδες. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που την καθιστούν κατάλληλη για χρήση σε εφαρμογές εναέριας φωτογραμμετρίας με UAV είναι:

- Η δυνατότητα αλλαγής και χρήσης φακών σταθερής εστιακής απόστασης (prime).
- Ο σχετικά μεγάλος αισθητήρας που αντιστοιχεί στην κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής για δεδομένο φακό και ύψος.
- Η δυνατότητα πλήρως χειροκίνητης λειτουργίας όσο αφορά στην ρύθμιση των παραμέτρων λήψης (ευαισθησία, ταχύτητα, διάφραγμα).
- Οι υψηλές επιδόσεις σε ταχύτητα και χρόνο επαναληψιμότητας.
- Η δυνατότητα ενεργοποίησης της εστίασης και του κλείστρου με εξωτερικό κύκλωμα διακόπτη.

Basic Specifications		18.00 Megapixels	Canon EF/EF-S	APS-C size sensor
Full model name:	Canon EOS Rebel T2i (EOS 550D)			
Resolution:	18.00 Megapixels			
Sensor size:	APS-C (22.3mm x 14.9mm)			
Kit Lens:	3.00x zoom 18-55mm (29-88mm eq.)			
Viewfinder:	Optical / LCD			
Native ISO:	100 - 6400			
Extended ISO:	100 - 12,800			
Shutter:	1/4000 - 30 seconds			
Max Aperture:	3.5 (kit lens)			
Dimensions:	5.1 x 3.8 x 3.0 in. (130 x 97 x 76 mm)			
Weight:	26.0 oz (736 g) includes batteries, kit lens			
MSRP:	\$900			
Availability:	02/2010			
Manufacturer:	Canon			



Σύντομος πίνακας χαρακτηριστικών της Canon 550D

Το εργαστήριο διαθέτει δυο φακούς σταθερής εστιακής απόστασης κατάλληλους γι' αυτή τη μηχανή:

- Το φακό Voigtlander Color Skopar 20mm f/3.5 SL-II ASPHERICAL, ο οποίος αποτελεί ευρυγώνιο φακό prime, εστιακής απόστασης 20mm, με μέγιστη τιμή διαφράγματος f3.5 και διαγώνιο οπτικό πεδίο 94° για αισθητήρα full frame (71° APS-C). Ο συγκεκριμένος φακός είναι χειροκίνητης εστίασης, ιδιαίτερα φωτεινός και γρήγορος, στιβαρής κατασκευής, ενώ περιλαμβάνει οπτικά στοιχεία πολύ υψηλής ποιότητας και ακρίβειας με ελάχιστη σφαιρική εκτροπή. Μειονέκτημά του το αυξημένο βάρος (205 gr) σε σχέση με παρόμοιους φακούς χαμηλού προφίλ (pancake lenses).
- Το φακό Canon EF 50mm F1.8 II, εστιακής απόστασης 50mm, με μέγιστη τιμή διαφράγματος f1.8 και διαγώνιο οπτικό πεδίο 47° για αισθητήρα full frame (31° APS-C). Ο φακός αυτός αποτελεί από τις φθηνότερες επιλογές prime φακών, καθώς τόσο τα οπτικά στοιχεία όσο και το σώμα είναι κατασκευασμένα από πλαστικό υλικό. Παρότι φθηνός, είναι αρκετά γρήγορος και φωτεινός, περιλαμβάνει μοτέρ για την αυτόματη εστίαση ενώ το βάρος του κυμαίνεται στα 130 gr. Οι φακοί 50mm ή «κανονικοί», αποτελούν συχνή επιλογή φακών στην φωτογραφμετρία καθώς συνεπάγονται μικρότερες αποκρύψεις λεπτομερειών, λιγότερο έντονη προοπτική και κατά κανόνα μικρότερη ακτινική διαστρόφη.



Αριστερά Canon EF 50mm F1.8 II – Δεξιά Voigtlander 20mm f/3.5 SL-II ASPHERICAL

- Η φωτογραφική μηχανή Canon PowerShot SX260 HS ανήκει στην κατηγορία των compact φωτογραφικών μηχανών υψηλών επιδόσεων, όσο αφορά στην ταχύτητα λήψης (1/3200 sec) και την ευαισθησία του αισθητήρα (3200 μονάδες ISO) για τη δεδομένη κατηγορία. Ο αισθητήρας είναι διαστάσεων 6,17 x 4,55mm στα 12MPixels ενώ διαθέτει μόνιμο φακό με μέγιστη τιμή διαφράγματος f3.5 και ισοδύναμη με full frame μεταβλητή εστιακή απόσταση 25 - 500mm, που αντιστοιχεί σε διαγώνιο οπτικό πεδίο 82° - 5° για το συγκεκριμένο αισθητήρα. Βασικό προτέρημα για τη χρήση αυτής της μηχανής σε εφαρμογές εναέριας φωτογραμμετρίας με UAV, είναι τόσο το μικρό μέγεθος και βάρος όσο και η υποστήριξη του εναλλακτικού firmware CHDK (Canon Hacker's Development Kit). Το CHDK δεν παρέχεται επίσημα από την κατασκευάστρια εταιρεία, αλλά αποτελεί δημιούργημα χρηστών με στόχο την αναβάθμιση των δυνατοτήτων και της λειτουργικότητας συγκεκριμένων μοντέλων μηχανών, πολύ πέρα από ότι υποστηρίζει το «μητρικό» firmware. Βασικό πλεονέκτημα του CHDK, πέρα από τα έτοιμα εργαλεία ενίσχυσης της λειτουργικότητας που περιλαμβάνει, είναι η δυνατότητα εκτέλεσης προσαρμοσμένων προγραμμάτων (scripts) σε γλώσσα Lua, προσφέροντας απεριόριστες δυνατότητες και πρωτόγνωρα επίπεδα αυτοματισμού στη λήψη φωτογραφιών. Ειδικότερα για εφαρμογές φωτογραμμετρίας με UAV έχει αναπτυχθεί ειδικό script (KAP-UAV) το οποίο υποστηρίζει:

- Το δυναμικό έλεγχο της ταχύτητας, του διαφράγματος, των τιμών ND και ISO ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική έκθεση με τη μικρότερη δυνατή ταχύτητα κλείστρου ώστε να αποφεύγονται προβλήματα ενάργειας λόγω των δονήσεων.
- «Κλείδωμα» της εστιακής απόστασης σε συγκεκριμένη τιμή
- Αυτόματη περιοδική λήψη βάση προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος και επιθυμητού αριθμού φωτογραφιών
- Λήψη βάση παλμών PWM ή τάσης από εξωτερικές πηγές
- Αυτόματη απενεργοποίηση και προφύλαξη του φακού μετά το πέρας των λήψεων ή κατόπιν εφαρμογής παλμού PWM συγκεκριμένου πλάτους.

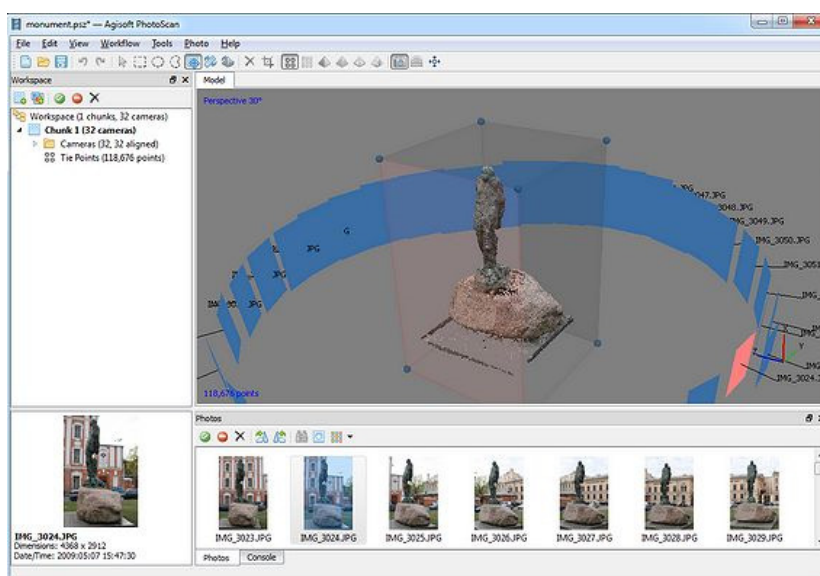


Canon SX260HS - Επιλογή script στον διαχειριστή αρχείων του CHDK

Η συγκεκριμένη μηχανή φέρει δέκτη GPS ο οποίος επιτρέπει την αυτόματη εισαγωγή (geotagging) των συντεταγμένων λήψης στο τμήμα μεταδεδομένων του αρχείου εικόνας. Ωστόσο, λόγω της θέσης της μηχανής κατά τη λήψη σε μια εφαρμογή με UAV και γενικότερα των πολύ περιορισμένων δυνατοτήτων του δέκτη, στερείται σημαντικής ακρίβειας σε σχέση με το δέκτη GPS των UAVs με αποτέλεσμα να είναι προτιμότερο η συγκεκριμένη δυνατότητα να μην χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες εφαρμογές.

- Το φωτογραμμετρικό λογισμικό PhotoScan της Ρωσικής εταιρείας Agisoft που είναι κατάλληλο τόσο για εναέριες όσο και για επίγειες εφαρμογές φωτογραμμετρίας και ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων που βασίζονται σε αλγόριθμους SFM (Structure From Motion) από το χώρο της τεχνητής όρασης, για τον αυτόματο εντοπισμό κοινών σημείων στις εικόνες. Η φωτογραμμετρική επεξεργασία διεξάγεται με κάποιον (ιδιωτικό) αλγόριθμο αεροτριγωνισμού, επιτρέποντας συνδυασμένη επίλυση με την εισαγωγή πρόσθετων παρατηρήσεων GPS ή τοπογραφικών μετρήσεων με κατάλληλο συντελεστή βάρους. Πέρα από το φωτογραμμετρικό σκέλος, περιλαμβάνει βασικά εργαλεία επεξεργασίας επιφανειών και ταξινόμησης των χαρακτηριστικών τους, ενώ υποστηρίζει προσαρμοσμένη ροή επεξεργαστικών εργασιών με την βοήθεια scripts σε γλώσσα Python. Οι απαιτήσεις του λογισμικού σε υπολογιστική ισχύ είναι αρκετά μεγάλες και συνήθως απαιτεί την ύπαρξη ισχυρού

υπολογιστικού συστήματος (Workstation) για ομαλή λειτουργία ιδιαίτερα σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν πολλές εικόνες και απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια απόδοσης στα παραγόμενα τρισδιάστατα μοντέλα. Αξιοσημείωτη είναι η εκμετάλλευση από το PhotoScan των επεξεργασιών από τα υποσυστήματα γραφικών, όχι μόνο για την οπτική απόδοση, αλλά για την επιτάχυνση πολύπλοκων υπολογιστικών διεργασιών (GPU computing).



Το GUI του PhotoScan σε εφαρμογή επίγειας φωτογραμμετρίας

Παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας πολύ μεγάλων φωτογραμμετρικών projects, υποστηρίζοντας κλιμάκωση μέσω δικτύου κατανέμοντας το φορτίο σε περισσότερους από έναν υπολογιστές (cluster computing). Πληρέστερη περιγραφή των φάσεων λειτουργίας του PhotoScan θα πραγματοποιηθεί στο στάδιο επεξεργασίας των μετρήσεων.

Για την πραγματοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικότερα για τη διενέργεια της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης, αποφασίστηκε η κατασκευή ενός δεύτερου drone πολλαπλών στροφείων με γνώμονα τους παρακάτω παράγοντες:

- Τη δυνατότητα ανύψωσης της Canon 550D με ευκολία, ασφάλεια και ικανό χρόνο πτήσης. Η ανύψωση με χρήση του MK-Hexa

αντιστοιχούσε στο 90% της ώσης με πλήρη μπαταρία, αφήνοντας ελάχιστο περιθώριο για διορθώσεις.

- Τη χρήση λογισμικού πτήσης με εγγενή φωτογραμμετρικό προσανατολισμό και ενσωμάτωση εργαλείων προγραμματισμού πτήσης.
- Τη χρήση ελεγκτή πτήσεως τελευταίας γενιάς με ενσωμάτωση προηγμένων αισθητήρων και επεξεργαστή με δυνατότητα υποστήριξης προχωρημένων αλγορίθμων διόρθωσης και πλοήγησης (EKF / Sensor Fusion).
- Τη δυνατότητα χρήσης σε ερευνητικές ή επαγγελματικές εφαρμογές χωρίς άδεια από τον κατασκευαστή, λόγω ανοικτής φύσης του λογισμικού.

Το drone που κατασκευάστηκε, βασίστηκε εξολοκλήρου σε ανοικτά πρότυπα, ακολουθώντας το Ardupilot project, που αποτελεί την πιο δημοφιλή υλοποίηση υλικολογισμικού για ιδιοκατασκευές (DIY) drones από το 2009. Υποστηρίχθηκε αρκετά χρόνια από την εταιρεία 3DRobotics, ενώ από το 2016 και λόγω αλλαγών στις κατευθύνσεις της εταιρείας, αποτελεί καθαρά αυτόνομο project.



Το νέο Drone που κατασκευάστηκε για τους σκοπούς της Διπλωματικής Εργασίας

Η επιλογή των μερών που απαρτίζουν το drone και ο καθορισμός των επί μέρους χαρακτηριστικών τους, έγινε βάση αντίστοιχων υλοποιήσεων και υπολογισμών που βασίστηκαν στη συνδρομητική εφαρμογή MultiCopter Calculator. Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει την αποτίμηση ειδικών ιδιοτήτων του UAV (π.χ. διάρκεια πτήσης, συνολική ώση, κατανάλωση κ.τ.λ.) με

βάση τα σχεδιαστικά του χαρακτηριστικά ή τα ονομαστικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων μερών του, όπως οι κινητήρες ή οι έλικες. Έτσι τα μέρη στα οποία βασίστηκε η κατασκευή είναι τα εξής:

- Πτυσσόμενο σασί (frame) γενικής χρήσεως για έξι ρότορες, μεγέθους 960mm, με πλακέτα διανομής ρεύματος 150A (PDB), αναμονή για στήριξη μηχανισμού σταθεροποίησης φωτογραφικής μηχανής και ανασυρόμενα σκέλη. Η υλικό κατασκευής είναι ανθρακόνημα για μέγιστη δυνατή ακαμψία και μείωση του βάρους. Η επιλογή του μεγέθους έγινε με γνώμονα το μέγιστο υποστηριζόμενο μέγεθος έλικας, ενώ τα ανασυρόμενα σκέλη για την αποφυγή εμφάνισής τους στις φωτογραφίες σε απότομα πλαγιάσματα του σκάφους.
- Τριφασικοί Outrunner κινητήρες 340KV, 700W, κατάλληλοι για οδήγηση έλικας μέχρι 18 ίντσες, μέγιστης ώσης 3,7Kg στα 25V με αντίστοιχη ένταση ρεύματος 28A.
- Έλικες 18x5.5 (διάμετρος x βήμα σε ίντσες) της αμερικανικής εταιρείας APC σειράς MR, κατάλληλες για εφαρμογή σε UAVs πολλαπλών στροφείων. Είναι κατασκευασμένες από νάιλον με ίνες γυαλιού για ενίσχυση, ενώ ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος ώστε το βαρύτερο μέρος να βρίσκεται πλησιέστερα στον κινητήρα για περιορισμό των απαιτούμενων ροπών στις αυξομειώσεις των στροφών.
- ESCs συνεχούς λειτουργίας 40A με ειδικό λογισμικό οδήγησης και ελέγχου των κινητήρων τα οποία μπορούν να δέχονται ρυθμούς ανανέωσης του σήματος ελέγχου μέχρι και 600Hz, βελτιώνοντας το χρόνο απόκρισης στις εντολές του ελεγκτή πτήσης.
- Κεντρικό ελεγκτή πτήσης Pixhawk, με κεντρικό επεξεργαστή τον ARM Cortex M4 32bit 168Mhz, με μονάδα κινητής υποδιαστολής, μνήμη 256KB RAM/2MB Flash και συνεπεξεργαστή 32 bit / 72Mhz. Περιλαμβάνει αισθητήρες: Invensense MPU 6000 τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο / γυροσκόπιο, ST Micro LSM303D 14 bit τριαξονικό μαγνητόμετρο / επιταχυνσιόμετρο, ST Micro L3GD20H 16 bit τριαξονικό γυροσκόπιο και MEAS MS5611 βαρόμετρο. Παρέχει 14 εξόδους PWM και πλήθος θυρών για περιφερειακές

συσκευές όπως πομποδέκτη τηλεμετρίας, μονάδα GPS, μονάδα LiDAR κ.τ.λ.




Ο ελεγκτής πτήσης Pixhawk

- Μονάδα GPS βασισμένη στον ελεγκτή NEO-M8N που επιτρέπει τη λήψη σήματος από δορυφόρους GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou με ρυθμό ανανέωσης 10Hz
- Μονάδα σταθεροποίησης φωτογραφικής μηχανής 2 αξόνων (Tilt - Roll), με direct drive τριφασικούς κινητήρες (brushless gimbal) βασισμένη στον 32bit ελεγκτή STORM ανοικτής σχεδίασης και λογισμικού. Η προσθήκη του gimbal έγινε για περιορισμό των γωνιών κατά την κατακόρυφη λήψη αλλά κυρίως για τη δυνατότητα ελέγχου της κλίσης της μηχανής και την κάλυψη αντίστοιχων λήψεων (oblique).
- Μπαταρίες πολυμερών λιθίου (LiPo) 6 κελιών (22,2V) ονομαστικής χωρητικότητας 16Ah και μέγιστης συνεχούς εκφόρτισης 10C (160A).

Με βάση την παραπάνω σύνθεση και συνολικό βάρος 7500gr μαζί με την φωτογραφική μηχανή και την μπαταρία, τα στοιχεία που προκύπτουν από την εφαρμογή του MultiCopter Calculator, με απόκλιση $\pm 15\%$, συνοψίζονται στα εξής:

- Αναμενόμενος μεικτός χρόνος πτήσης 14.3 λεπτά με βαθμό εκφόρτισης της μπαταρίας 85%


- Αιώρηση στο 53% της συνολικής ώσης
- Λόγος ώσης προς βάρος 2,3:1
- Αποδοτικότητα (παραγόμενο έργο) 73.1%
- Ένταση ρεύματος στην αιώρηση 45,52A
- Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα 35Km/h και μέγιστος ρυθμός ανόδου 6.3m/sec
- Ένταση ρεύματος στη μέγιστη ώση 174,66A με πιθανό κίνδυνο υπερθέρμανσης των κινητήρων (αναμενόμενη θερμοκρασία 87°C)


54R 


all data without guarantee - Accuracy: +/-15% News | Help | Tutorial | Language: english


XcopterCalc - Multicopter Calculator


General	Motor Cooling: good	# of Rotors: 6	Model Weight: 7500 g	Incl. Drive: flat	Frame Size: 960 mm / 37.8 inch	FCU Tilt Limit: no limit	Field Elevation: 500 m ASL / 1640 ft ASL	Air Temperature: 25 °C / 77 °F	Pressure (QNH): 1013 hPa / 29.91 inHg
Battery Cell	Type (Cont. / max. C) - charge state: LiPo 16000mAh - 15/25C - full	Configuration: 6 S 1 P	Cell Capacity: 16000 mAh	max. discharge: 85%	Resistance: 0.0015 Ohm	Voltage: 3.7 V	C-Rate: 15 C cont. / 25 C max	Weight: 346 g / 12.2 oz	
Controller	Type: max 40A	Current: 40 A cont. / 40 A max	Resistance: 0.006 Ohm	Weight: 50 g / 1.8 oz	Accessories		Current drain: 0 A	Weight: 0 g	
Motor	Manufacturer - Type (KV): Turnigy Multistar 5008-340 (340)	KV (w/o torque): 340 rpm/V	no-load Current: 0.7 A @ 10 V	Limit (up to 15s): 700 W	Resistance: 0.13 Ohm	Case Length: 28 mm / 1.1 inch	# mag. Poles: 12	Weight: 163 g / 5.7 oz	
Propeller	Type - yoke twist: APC MultiRotor MR - 0°	Diameter: 18 inch / 457.2 mm	Pitch: 5.5 inch / 139.7 mm	# Blades: 2	PConst / TConst: 1.09 / 1.0	Gear Ratio: 1 : 1	calculate		



 Load: 10.92 C

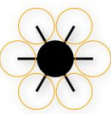

 Hover Flight Time: 17.9 min


 electric Power: 634.3 W


 est. Temperature: 87 °C

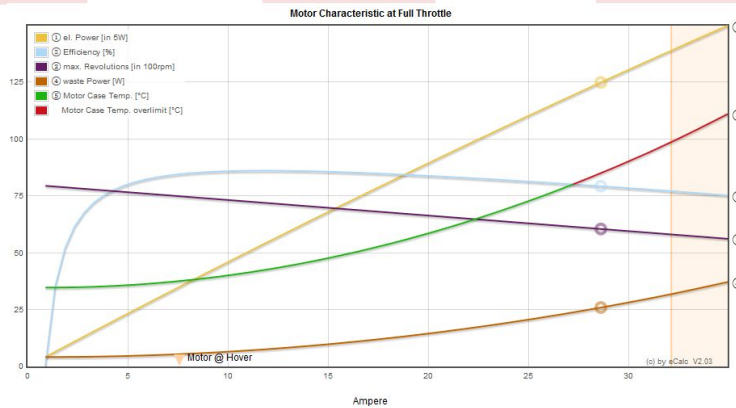

 Thrust-Weight: 2.3


 specific Thrust: 7.14 g/W


 Configuration

Remarks: • the prediction of the motor case temperature is critical (>80°C/175°F). Risk of overhear, please check!

Battery	Motor @ Optimum Efficiency	Motor @ Maximum	Motor @ Hover	Total Drive	Multicopter
Load: 10.92 C	Current: 11.74 A	Current: 29.11 A	Current: 7.59 A	Drive Weight: 3689 g	All-up Weight: 7500 g
Voltage: 21.96 V	Voltage: 22.83 V	Voltage: 21.79 V	Voltage: 23.08 V	Drive Weight: 130.1 oz	264.6 oz
Rated Voltage: 22.20 V	Revolutions*: 7198 rpm	Revolutions*: 6009 rpm	Revolutions*: 3497 rpm	Thrust-Weight: 2.3 : 1	add. Payload: 7564 g
Energy: 355.2 Wh	electric Power: 267.9 W	electric Power: 634.3 W	Throttle (log): 40 %	Current @ Hover: 45.52 A	296.8 oz
Total Capacity: 16000 mAh	mech. Power: 230.5 W	mech. Power: 500.7 W	Throttle (linear): 53 %	P(in) @ Hover: 1071.2 W	max Tilt: 60 °
Used Capacity: 19600 mAh	Efficiency: 86.1 %	Power-Weight: 507.4 W/kg	electric Power: 175.1 W	P(out) @ Hover: 835.4 W	max Speed: 35 km/h
min. Flight Time: 4.7 min		230.2 W/lb	mech. Power: 139.2 W	Efficiency @ Hover: 78.0 %	21.7 mph
Mixed Flight Time: 14.3 min		Efficiency: 79.9 %	Power-Weight: 142.8 W/kg	Current @ max: 174.69 A	est rate of climb: 6.3 m/s
Hover Flight Time: 17.9 min		est. Temperature: 87 °C	64.8 W/lb	P(in) @ max: 4110.7 W	1240 ft/min
Weight: 2076 g		189 °F	Efficiency: 79.5 %	P(out) @ max: 3004.3 W	Total Disc Area: 98.50 dm²
73.2 oz			est. Temperature: 42 °C	Efficiency @ max: 73.1 %	1526.75 in²
			108 °F		with Rotor fail: ✔
			specific Thrust: 7.14 g/W		
			0.25 oz/W		



Τα αποτελέσματα της εφαρμογής MultiCopter Calculator

Πέρα από τα βασικά μέρη, έγιναν προσθήκες υποσυστημάτων και διατάξεων για τη βελτίωση των δυνατοτήτων και της λειτουργικότητας του drone σε μια φωτογραμμετρική αποστολή. Συγκεκριμένα προστέθηκαν:

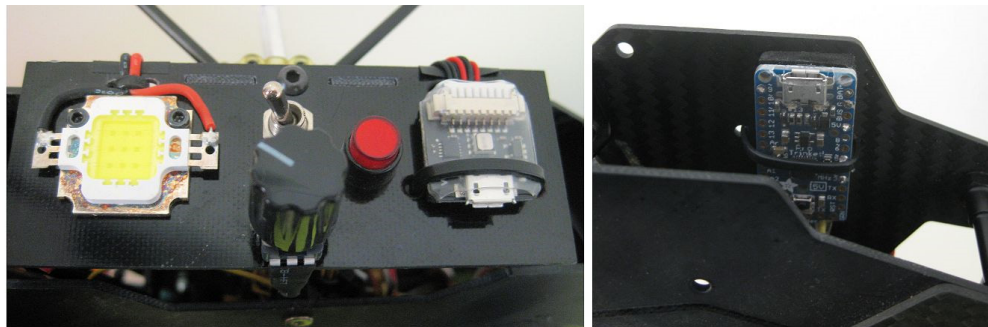
- Υποσύστημα μετάδοσης εικόνας σε πραγματικό χρόνο με κύριο σκοπό τη δυνατότητα εποπτείας στη στόχευση και στην ορθή λειτουργία της φωτογραφικής μηχανής. Το υποσύστημα αποτελείται από πομπό video 5.8Ghz / 400mW με κεραία κυκλικής πόλωσης και μεταγωγέα σήματος για την ασύρματη επιλογή της εικόνας μετάδοσης μεταξύ της



Οθόνη προβολής real time video με δέκτες Diversity

- φωτογραφικής μηχανής και της κάμερας πορείας CCD. Η κάμερα πορείας προστέθηκε ούτως ώστε να είναι δυνατή η εποπτεία της πτήσης κατά τη χειροκίνητη επιστροφή του drone από μεγάλες αποστάσεις σε περίπτωση δυσλειτουργίας της αυτόματης πλοήγησης. Το υποσύστημα συμπληρώνεται από μονάδα OSD για την αναγραφή σημαντικών στοιχείων της πτήσης στην εικόνα και μονάδα εδάφους που περιλαμβάνει οθόνη και διπλούς δέκτες με αυτόματη επιλογή της βέλτιστης ποιότητας σήματος (Rx Diversity).
- Διάταξη για την αυτόματη περιοδική λήψη φωτογραφιών με την Canon 550D ή οποιαδήποτε φωτογραφική μηχανή που δεν περιλαμβάνει πρόγραμμα περιοδικής λήψης. Αν και σχεδόν όλες οι φωτογραφικές μηχανές περιλαμβάνουν κάποιο πρόγραμμα "continuous mode", η λήψη στο mode αυτό γίνεται στον ταχύτερο δυνατό χρόνο με αποτέλεσμα την γρήγορη εξάντληση της μπαταρίας ή του αποθηκευτικού χώρου στα πλαίσια μιας φωτογραμμετρικής αποστολής. Σκοπός της διάταξης είναι η δυνατότητα επιλογής της περιόδου λήψης των φωτογραφιών στο διάστημα 1 - 10 sec. Η κατασκευή της διάταξης στηρίχθηκε στον

μικροελεγκτή Adafruit Pro Trinket με ένα απλό πρόγραμμα αντιστοίχισης της τρέχουσας τιμής της αντίστασης ενός



Αριστερά - πάνελ με το ποτενσιόμετρο και το διακόπτη αυτόματων λήψεων.
Δεξιά – το Adafruit Pro Trinket δεμένο στο σασί.

ποτενσιόμετρο, με τιμές στο διάστημα 1 - 10 sec για την παραγωγή PWM παλμών οδήγησης του ρελέ ενεργοποίησης του κλειστρου της φωτογραφικής μηχανής. Η λήψη φωτογραφιών με εντολές του ελεγκτή πτήσης ή ανεξάρτητα μέσω αυτής της διάταξης, καθορίζεται με διακόπτη επιλογής που τοποθετήθηκε στο πίσω μέρος του drone.

```
/*  
Camera shutter intervalometer  
for EOS 550D  
Manos Tsiavos 2016  
*/  
  
#include <Servo.h>  
  
Servo myservo;           // Hobbyking Relay Works like a servo - create servo object  
int potpin = 6;          // analog pin connected to potentiometer's middle pin  
int servopin = 9;        // servo signal connected on pin 9  
int tpressed = 1000;     // time the shutter must remain pressed (ms)  
int ltime;               // loop time  
  
void setup() {  
  myservo.attach(servopin); // attach servo object with pin  
}  
  
void loop() {  
  ltime = map(analogRead(potpin), 0, 1023, 1000, 10000); // scale ltime according to pot value (value between 1 and 10 sec)  
  myservo.write(180); // set servo to highest position (shutter press)  
  delay(tpressed); // remain pressed  
  myservo.write(0); // set servo to lowest position (shutter release)  
  delay (ltime); // loop time delay  
}
```

Το πρόγραμμα του ελεγκτή για την υλοποίηση της αυτόματης περιοδικής λήψης

- Δίπολα 433MHz για την αντικατάσταση των κεραιών χαμηλών επιδόσεων στους πομποδέκτες τηλεμετρίας. Η κατασκευή του σώματος έγινε με χρήση μηχανής CNC, ενώ τα ενεργά στοιχεία κατασκευάστηκαν από χάλκινο μονωμένο σύρμα περιέλιξης με μήκος βασισμένο στη σχέση 6985/f για διατομές 12 - 14 AWG και velocity factor 95%. Ενδεικτικά αναφέρεται πως κατά τη διάρκεια δοκιμής στα 100m ο δείκτης RSSI της ποιότητας σήματος είχε συνεχώς τιμή 99%, σε αντίθεση με την έως και παντελή απώλεια σήματος κατά τη χρήση των παλιών κεραιών.

Μετά την κατασκευή του drone ακολούθησε η ρύθμιση του λογισμικού του ελεγκτή πτήσης και των επιμέρους υποσυστημάτων για τη σωστή και αρμονική μεταξύ τους συνεργασία. Σε αυτή τη φάση έγινε και ο προσδιορισμός τόσο των PID παραμέτρων του gimbal με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά (κέντρο βάρους, μέγεθος) των δυο φωτογραφικών μηχανών όσο και των PID παραμέτρων πτήσης του drone μέσω της διαδικασίας Autotune. Κατά τη διαδικασία αυτή γίνεται ειδική πτήση κατά την οποία προσδιορίζονται οι σταθερές του ελεγκτή ανάδρασης (βλέπε 1ο κεφάλαιο) στους 3 άξονες, με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, βάρος, ώση) του drone. Σύμφωνα με την τεκμηρίωση του Ardupilot project οι προκύπτουσες τιμές τείνουν να προσεγγίζουν τις σωστές ωστόσο για βέλτιστο αποτέλεσμα προτείνεται ο περαιτέρω πειραματικός προσδιορισμός τους.

4.3 Σχεδίαση και Προετοιμασία Αποστολής

Η πραγματοποίηση της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης ήταν αδύνατο να γίνει σε προκαθορισμένο χρόνο και χώρο, για λόγους που οφείλονται στην διαδικασία προγραμματισμού των ανατινάξεων από την επιχείρηση και την ευχέρεια πρόσβασης στο χώρο του λατομείου. Συνεπώς ήταν αδύνατη η αποτίμηση του χώρου και η διενέργεια του προγραμματισμού πτήσης, με αποτέλεσμα να θεωρηθεί σκόπιμη η εκ των προτέρων προσομοίωση της φωτογραμμετρικής αποστολής με στόχο τόσο τον έλεγχο των ρυθμίσεων υλικού και λογισμικού, όσο και τον προσδιορισμό τυχών αστάθμητων παραγόντων.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 3 πτήσεις σε περιοχή 50m X 100m πάνω από το Αθλητικό κέντρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Η επιλογή των διαστάσεων της περιοχής έγινε με γνώμονα την αποτύπωση βαθμίδας μετά την ανατίναξη με τέτοιες ανοχές, ώστε αφενός μεν να περιλαμβάνεται ο σωρός και οι πιθανές μη επιθυμητές εκτοξεύσεις τεμαχίων βραχομάζας (flyrocks), αφετέρου δε, το «block ενδιαφέροντος» να βρίσκεται εσωτερικά της περιμέτρου με επάρκεια επικαλύψεων στις εικόνες. Η περιοχή αυτή στο ΕΜΠ παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις ανάγλυφου και υψής, με ψηλά δέντρα, επίπεδες επιφάνειες και κερκίδες θεατών σε 3 διακριτά υψομετρικά επίπεδα, που βοηθούν στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων βάθους πεδίου ή συνταύτισης των εικόνων από το λογισμικό. Πριν πραγματοποιηθούν οι 3 αυτές πτήσεις, ήταν απαραίτητη η επιλογή παραμέτρων για τη διενέργεια του προγραμματισμού πτήσης. Όπως είναι γνωστό, η επιλογή των βασικών παραμέτρων του προγραμματισμού πτήσης (κλίμακα, επικαλύψεις, ύψος, βάση, λόγος Β/Η και φακός της μηχανής) δεν είναι μονοσήμαντη καθώς μπορεί να επιτευχθεί το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα με διάφορους συνδυασμούς τους. Ωστόσο κάποιες από αυτές τις παραμέτρους υπαγορεύονται από σχετικά κριτήρια επιλογής, όπως η κλίμακα, η απαιτούμενη ακρίβεια, το είδος και η διαθεσιμότητα του φωτογραφικού εξοπλισμού αλλά και η επιλογή του με βάση τις δυνατότητες του UAV και τις προδιαγραφές του τελικού προϊόντος.

Για το σκοπό της Διπλωματικής Εργασίας, έγινε επιλογή της Canon 550D και του φακού Canon EF 50mm F1.8 II εστιακής απόστασης 50mm. Η επιλογή της μηχανής έγινε για λόγους αξιοπιστίας και επιδόσεων ενώ του φακού για το μικρό βάρος και την θεωρητικά ουδέτερη συμπεριφορά σε θέματα αποκλίσεων και διαστροφών.

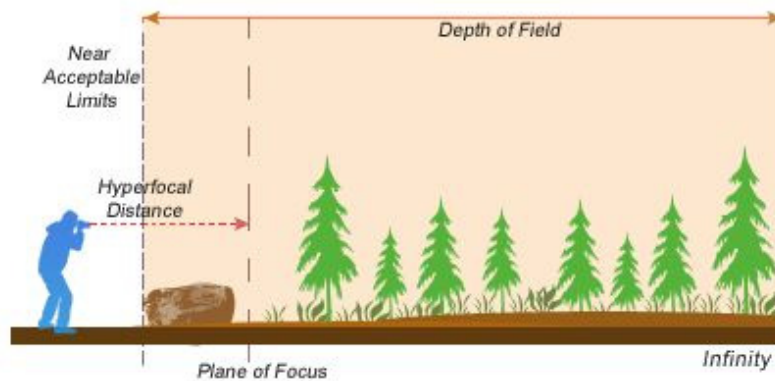
Το πρόγραμμα επιλογής κατά τη λήψη φωτογραφιών με UAV, είναι συνήθως η λήψη με προτεραιότητα κλείστρου (shutter priority) που συνεπάγεται την επίτευξη ικανής έκθεσης με αποκλειστική μεταβολή της τιμής διαφράγματος (f-stop). Σκοπός είναι η δυνατότητα γρήγορων και φωτεινών λήψεων χωρίς προβλήματα ενάργειας από την κίνηση ή τις δονήσεις του drone. Η επιλογή της ταχύτητας κλείστρου πρέπει να είναι τέτοια ώστε η μετακίνηση της μηχανής κατά τη διάρκεια της έκθεσης και

για δεδομένη ταχύτητα του UAV, να αντιστοιχεί σε απόσταση μικρότερη από μισό pixel στο έδαφος, προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική ενέργεια. Για παράδειγμα, αν η ταχύτητα κλείστρου έχει καθοριστεί στα 1/500 sec, τότε κατά τη διάρκεια πτήσης με ταχύτητα 5m/sec, η μηχανή έχει μετακινηθεί 1cm, συνεπώς θα υπάρχει ικανοποιητική ενέργεια σε εφαρμογές με κλίμακα 2cm/pixel ή περισσότερο. Η τελική ωστόσο επιλογή της ταχύτητας κλείστρου, καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη και το βαθμό των δονήσεων υψηλής συχνότητας από τους κινητήρες, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση της τιμής της σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από αυτά που προκύπτουν με εφαρμογή του προηγούμενου κανόνα. Στην συγκεκριμένη αποστολή έγινε επιλογή ταχύτητας κλείστρου στα 1/1250 sec.

Η υπερεστιακή απόσταση του φακού ή αλλιώς, η απόσταση πέρα από την οποία όλα τα αντικείμενα απεικονίζονται με επαρκή ενέργεια (Βάθος Πεδίου) όταν αυτός ο φακός είναι εστιασμένος στο άπειρο, αποτελεί έναν έμμεσο παράγοντα καθορισμού του ύψους πτήσης. Η υπερεστιακή απόσταση *HFD* προκύπτει από τη σχέση:

$$HFD = \frac{f^2}{Nc} + f$$

όπου f το εστιακό μήκος του φακού, N το διάφραγμα εκφρασμένο σε τιμές f-stop και c η τιμή του “circle of confusion” που για αισθητήρες Canon APS-C διαμορφώνεται στις 0,018 μονάδες. Κατά συνέπεια, για τιμή διαφράγματος $f/1.8$ που αποτελεί την πιο φωτεινή τιμή του φακού επιλογής, η υπερεστιακή απόσταση υπολογίζεται στα 78.5m διαμορφώνοντας την ελάχιστη απόσταση μεταξύ φωτογραφικής μηχανής και υψηλότερου αντικειμένου. Ωστόσο, με κατάλληλες δοκιμές και δεδομένης της εποχής του έτους που έγιναν οι πτήσεις (καλοκαίρι 2016), διαπιστώθηκε πως η ποσότητα του φωτός ήταν τέτοια που με χρήση του προγράμματος “shutter priority” ακόμη και με πολύ μεγάλες ταχύτητες λήψης και την μικρότερη δυνατή ευαισθησία, η τιμή διαφράγματος δεν έπεφτε χαμηλότερα από την τιμή $f/4$. Συνεπώς η ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ μηχανής και υψηλότερου αντικειμένου ήταν δυνατό να περιοριστεί με ασφάλεια στα 35m.



Υπερεστιακή Απόσταση

Μια επίσης πολύ σημαντική παράμετρος είναι η εκτίμηση του χρόνου επαναληψιμότητας στη λήψη φωτογραφιών, καθώς καθορίζει τον ελάχιστο χρόνο αντίδρασης της μηχανής στις εντολές λήψης. Είναι προφανές ότι εντολές που λαμβάνονται σε χρόνο μικρότερο του χρόνου επαναληψιμότητας δεν εκτελούνται με συνέπεια την καταστροφή της απαιτούμενης αλληλουχίας στην λήψη των εικόνων. Για την εκτίμηση αυτής της παραμέτρου, βραχυκυκλώθηκε το κύκλωμα εξωτερικής ενεργοποίησης του κλείστρου της μηχανής και έγινε λήψη 300 περίπου φωτογραφιών στο πρόγραμμα “shutter priority” με χειροκίνητη εστίαση και αποθήκευση με χαμηλό βαθμό συμπίεσης JPEG. Στη συνέχεια προσδιορίστηκε ο συνολικός χρόνος λήψης των φωτογραφιών με βάση τις σχετικές εγγραφές στην κάρτα μνήμης και διαιρέθηκε με τον αριθμό τους για να προσδιοριστεί η επαναληψιμότητα.

Συνεπώς, οι μέχρι τώρα παράμετροι και τα κριτήρια επιλογής τους για τη διενέργεια του προγραμματισμού πτήσης, συνοψίζονται στα παρακάτω δεδομένα και περιορισμούς:

1. Η απαιτούμενη από το φωτογραμμετρικό λογισμικό επικάλυψη να είναι 80% κατά μήκος και 60% κατά πλάτος.
2. Η επιλογή φακού εστιακής απόστασης 50mm
3. Η επαναληψιμότητα της φωτογραφικής μηχανής στα 0.5 sec
4. Η ταχύτητα κλείστρου στα 1/1250 sec
5. Το ύψος πτήσης στο εύρος 60-120m. Το άνω όριο διαμορφώνεται σύμφωνα με τα επιτρεπόμενα όρια (ΦΕΚ Β3152 – 30/09/2016),

ενώ το κάτω λαμβάνοντας υπόψη ύψος βαθμίδας λατομείου 20m και σημείο αναφοράς το επίπεδο στο πόδι της βαθμίδας.

6. Η υποστηριζόμενη ταχύτητα του drone στο εύρος 1-10m/sec με προτεινόμενες τιμές μικρότερες από 6m/sec.
7. Η δυνατότητα διενέργειας 2 όμοιων αποστολών / μπαταρία για επάρκεια ενέργειας σε ενδεχόμενη ανάγκη επανάληψης της διαδικασίας.

Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό πως το ύψος και τη ταχύτητα του drone αποτελούν μεταβλητούς παράγοντες στον προγραμματισμό πτήσης. Τα σχετικά δεδομένα και οι περιορισμοί εισάγονται σε κατάλληλο λογισμικό, στην προκειμένη περίπτωση στο “Mission Planner” που αποτελεί το λογισμικό του σταθμού βάσης του Arducopter project και διενεργείται ο προγραμματισμός πτήσης, ο υπολογισμός δηλαδή της ακριβούς πορείας του drone για την φωτογραμμετρική αποτύπωση της περιοχής. Οι επιδράσεις δοκιμαστικών μεταβολών σε παραμέτρους και περιορισμούς, υπολογίζονται και παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο, με αποτέλεσμα την άμεση αποτίμηση εναλλακτικών τιμών και σεναρίων.

Simple Grid Options Camera Config

Simple Options

Camera EOS-550D-50mm

Altitude (m) 70

Angle [deg] 88

Camera top facing forward

Flying Speed (est) (m/s) 5

Use speed for this mission

Add Takeoff and Land WP's

Use RTL

Split into x segments 1

Display

Boundary

Markers

Grid

Internals

Footprints

Advanced Options

Control-S to save to file
Control-Q to load from file

Accept

Stats

Area:	6709 m ²	Pictures:	137	Flight Time (est):	2:61 Minutes
Distance:	0,59 km	No of Strips:	5	Photo every (est):	1,03 Seconds
Distance between images:	3 m	Footprint:	31,2 x 20,9 m	Turn Dia (at 45d):	7 m
Ground Resolution:	0,60 cm	Dist between lines:	10,93 m	Ground Elevation:	193-211 m

Ο προγραμματισμός πτήσης στο Αθλητικό Κέντρο ΕΜΠ στο Mission Planner. Οι βούλες αναπαριστούν το ποσοστό επικάλυψης ανάλογα με το χρώμα

Οι υπολογισμοί βασίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

- Κλίμακα: $\frac{1}{k} = \frac{c}{H}$ όπου c η σταθερά της μηχανής και H το ύψος
- Κατακόρυφη κάλυψη: $FOVVer = bk$ όπου b η κατακόρυφη διάσταση του αισθητήρα της μηχανής
- Οριζόντια κάλυψη: $FOVHor = sk$ όπου s η οριζόντια διάσταση του αισθητήρα της μηχανής
- Βάση λήψης: $B = FOVVer(1 - \frac{p}{100})$ όπου p η επικάλυψη κατά μήκος
- Απόσταση Λωρίδων: $A = FOVHor(1 - \frac{q}{100})$ όπου q η επικάλυψη κατά πλάτος
- Αριθμός Λωρίδων: $N_\lambda = \frac{Q}{A} + 1$ όπου Q το πλάτος της περιοχής
- Λήψεις ανά Λωρίδα: $N_{\varphi/\lambda} = \frac{L}{B} + 2$ όπου L το μήκος της περιοχής
- Συνολικός Αριθμός Λήψεων: $N_\varphi = N_{\varphi/\lambda}N_\lambda$
- Χρόνος μεταξύ λήψεων: $t = \frac{B}{V}$ όπου V η ταχύτητα του σκάφους

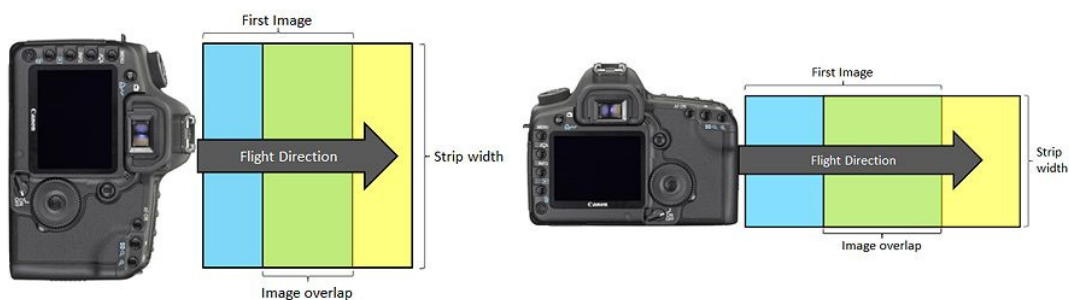
Θεωρώντας σταθερή ταχύτητα 5m/sec και μεταβάλλοντας το ύψος στο εύρος 60m – 120m οι παράμετροι του προγραμματισμού πτήσης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

H (m)	k	cm/px	FOVVert (m)	FOVHor (m)	B (m)	A (m)	Rep (sec)	Strips	Photo / Strip	Total Photos	Mission Time (min)
60	1200	0,52	17,88	26,76	3,58	10,70	0,89	6	30	170	2,72
70	1400	0,60	20,86	31,22	4,17	12,49	1,04	5	26	130	2,61
80	1600	0,69	23,84	35,68	4,77	14,27	1,19	5	23	103	2,56
90	1800	0,77	26,82	40,14	5,36	16,06	1,34	4	21	85	2,54
100	2000	0,86	29,8	44,6	5,96	17,84	1,49	4	19	71	2,55
110	2200	0,95	32,78	49,06	6,56	19,62	1,64	4	17	61	2,57
120	2400	1,03	35,76	53,52	7,15	21,41	1,79	3	16	53	2,61

Οι ολικοί χρόνοι αποστολής υπολογίζονται σε συνθήκες άπνοιας και χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις μεταβολές της ταχύτητας στις στροφές μεταξύ των λωρίδων πτήσης και την απόσταση μετάβασης και επιστροφής του drone. Στην πράξη οι χρόνοι πτήσης ήταν αυξημένοι

κατά ένα συντελεστή $\sim 1,5$ ωστόσο οι υπολογιζόμενες τιμές αποδίδουν την τάση του απαιτούμενου χρόνου ανάλογα με το ύψος. Δεδομένου του ότι για λόγους ασφάλειας και καλής οπτικής επαφής ήταν επιθυμητό το μικρότερο δυνατό ύψος, επιλέχθηκε το ύψος πτήσης στα 70m που αντιστοιχεί και σε διπλάσια περίπου ανοχή (1,04sec) στο χρόνο επαναληψιμότητας της μηχανής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν με την φωτογραφική μηχανή προσανατολισμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην ταυτίζεται η μεγάλη διάσταση του αισθητήρα με την μεγάλη διάσταση της περιοχής προς αποτύπωση. Η επιλογή αυτή έγινε για τεχνικούς λόγους που σχετίζονται με τη διατήρηση της συμβατότητας με λειτουργίες όπως η αυτόματη στόχευση σε σημεία ενδιαφέροντος. Ο εναλλακτικός προσανατολισμός κατά βάση συνεπάγεται λιγότερες συνολικές λήψεις αλλά κυρίως πλεονεκτικότερο λόγο B/H όσο αφορά στο υψομετρικό σφάλμα. Στην πρώτη περίπτωση ο λόγος B/H ήταν 1:16,7 ενώ στην δεύτερη με τη μηχανή στραμμένη κατά 90° στη διεύθυνση πτήσης 1:11,2 επιφέροντας βελτίωση στο υψομετρικό σφάλμα σύμφωνα με τη σχέση $\sigma_H = \frac{HH}{Bc} \sigma_p$.



Οι διαφορετικοί προσανατολισμοί της μηχανής κατά τη διεύθυνση πτήσης

Για τους σκοπούς της Διπλωματικής Εργασίας κατασκευάστηκαν 16 στόχοι φωτοσταθερών από hardboard οι οποίοι βάρθηκαν κατάλληλα για τη δημιουργία επιφανειών με έντονη εναλλαγή αντίθεσης. Οι διαστάσεις τους δεν ακολούθησαν τις σχέσεις που τις συνδέουν με την επιθυμητή κλίμακα καθώς αφενός μεν οι αρχικές διαστάσεις

επαρκούσαν κατά πολύ για τη δεδομένη εφαρμογή, αφετέρου δεν υπήρχε χρόνος για περαιτέρω επεξεργασία. Στο κέντρο κάθε φωτοσταθερού στόχου ανοίχτηκε οπή μέσω της οποίας μπορεί να πακτώνεται με καρφί στο έδαφος.



Ένας από τους φωτοσταθερούς στόχους που κατασκευάστηκαν

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρειάστηκε να γίνουν 3 δοκιμαστικές πτήσεις μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα και να θεωρηθεί πως το επίπεδο ετοιμότητας ήταν αποδεκτό:

- Στην πρώτη πτήση όλες οι φωτογραφίες που ελήφθησαν ήταν ανετάριστες και ο αριθμός τους μικρότερος από τον αναμενόμενο. Το πρώτο πρόβλημα οφείλονταν στις δονήσεις από τους κινητήρες του drone που όπως διαπιστώθηκε μετακίνησαν το δακτύλιο εστίασης του φακού και αντιμετωπίστηκε ασφαρίζοντάς τον με μονωτική ταινία. Το δεύτερο πρόβλημα ήταν αποτέλεσμα άστοχης ρύθμισης στο λογισμικό του ελεγκτή πτήσης, σχετικής με τη διάρκεια ενεργοποίησης του κλείστρου.
- Στη δεύτερη πτήση διαπιστώθηκε πως παρόλο που διορθώθηκε το πρόβλημα με το χρονισμό του κλείστρου, ο συνολικός αριθμός και οι επικαλύψεις των φωτογραφιών ήταν εκτός των ορίων που είχαν

υπολογιστεί. Διαπιστώθηκε πως το πρόβλημα οφείλονταν σε σφάλμα (bug) του λογισμικού “Mission Planner” το οποίο διορθώθηκε σε επόμενη έκδοσή του.

- Στην τρίτη πτήση επιχειρήθηκε διαφορετική προσέγγιση στο θέμα ενεργοποίησης του κλείστρου της μηχανής από τον ελεγκτή πτήσης, χρησιμοποιώντας εντολή ενεργοποίησης με βάση την απόσταση και όχι ρητή εντολή. Το αποτέλεσμα ήταν να ληφθεί ο σωστός αριθμός φωτογραφιών με τις αναμενόμενες επικαλύψεις.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις φωτοσταθεροί στόχοι και ένα χαρακτηριστικό σημείο ως σημεία γνωστών συντεταγμένων για την επίτευξη του απόλυτου προσανατολισμού κατά την επεξεργασία των στοιχείων. Η μέτρηση των συντεταγμένων έγινε με φορητή συσκευή GPS για λόγους δοκιμών και ολοκλήρωσης των σταδίων επεξεργασίας με το φωτογραμμετρικό λογισμικό PhotoScan.

Σε δεύτερο χρόνο, έγιναν μετρήσεις με γεωδαιτικό GPS χαρακτηριστικών σημείων της περιοχής, που περιλάμβαναν και τα παραπάνω σημεία. Ελήφθησαν συνολικά 36 σημεία εκ των οποίων τα 5 αφαιρέθηκαν από τη διαδικασία της συνόρθωσης λόγω αμφιβολιών στη στόχευση κατά την επεξεργασία. Από τα εναπομείναντα 31 σημεία, τα 12 χρησιμοποιήθηκαν σαν σημεία γνωστών συντεταγμένων και τα υπόλοιπα ως σημεία ελέγχου. Η εκτίμηση του σφάλματος για την φωτογραμμετρική αποτύπωση ήταν 5cm οριζοντιογραφικό σφάλμα και 14 cm υψομετρικό, που αξιολογήθηκαν θετικά, δεδομένου του αστικού περιβάλλοντος και της εγγενούς ακρίβειας της ίδιας της συσκευής.

Ακολουθεί η αναλυτική έκθεση που δίνει το του φωτογραμμετρικό λογισμικό PhotoScan για την εφαρμογή στην περιοχή του Αθλητικού Κέντρου ΕΜΠ

Agisoft PhotoScan

Processing Report

17 October 2016



Survey Data

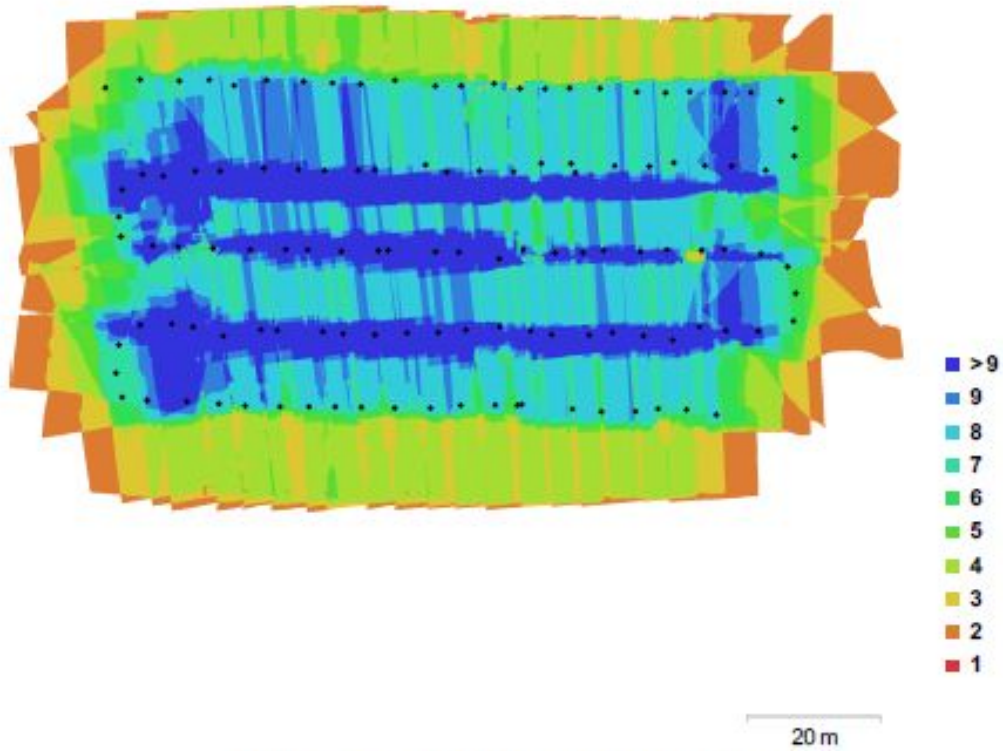


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	119	Camera stations:	119
Flying altitude:	64.4 m	Tie points:	117,428
Ground resolution:	5.25 mm/pix	Projections:	406,167
Coverage area:	8.86e+03 sq m	Reprojection error:	3.3 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 550D (50 mm)	5184 x 3456	50 mm	4.4 x 4.4 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

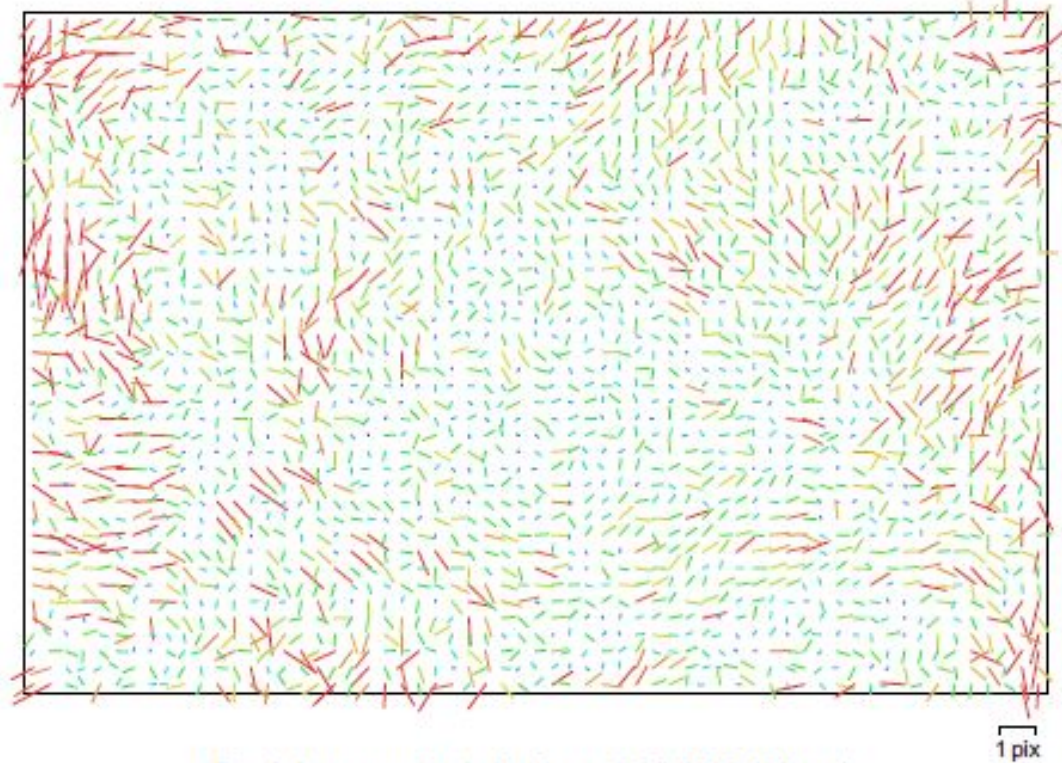


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 550D (50 mm).

Canon EOS 550D (50 mm)

119 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
5184 x 3456	50 mm	4.4 x 4.4 um	No
Type:	Frame	F:	12061.1
Cx:	-138.894	B1:	10.8694
Cy:	24.386	B2:	-12.1344
K1:	-0.0496932	P1:	-0.00294428
K2:	-2.00594	P2:	0.000492672
K3:	45.5107	P3:	0
K4:	-315.501	P4:	0

Ground Control Points



20 m

Fig. 3. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
04	0.0353838	0.040939	0.0541111	11	2.736
11	0.0673833	-0.239985	0.249265	9	1.963
09	0.05332	0.074275	0.0914319	8	2.558
06	0.0487664	-0.031388	0.0579945	8	2.029
14	0.0465644	0.013654	0.048525	9	3.347
16	0.0661684	-0.0286761	0.072115	3	0.837
18	0.0390615	-0.0180496	0.0430301	4	0.756
23	0.0274248	-0.0079302	0.0285484	8	2.086
27	0.0451378	-0.00405812	0.0453199	9	1.780

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
29	0.0497737	-0.0122153	0.0512507	8	0.936
31	0.0227032	0.0734227	0.0768526	5	1.732
33	0.0724029	0.129389	0.148269	9	3.769
Total	0.0500921	0.0863454	0.0998235		2.392

Table 2. Control points.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
26	0.0112063	0.0669535	0.0678849	9	0.924
36	0.0832508	-0.0526071	0.0984794	7	1.856
03	0.00928731	0.140503	0.14081	11	0.938
10	0.0127257	-0.0384899	0.0405391	8	1.116
07	0.0128575	-0.0849074	0.0858754	10	2.533
12	0.0554214	0.142049	0.152478	9	2.292
08	0.0569168	0.0866959	0.10371	8	1.748
05	0.0423619	-0.10027	0.108851	10	1.907
13	0.0724491	0.122099	0.141975	10	2.965
15	0.0380876	-0.0265502	0.0464282	4	0.963
17	0.0566218	-0.00984798	0.0574718	4	1.218
19	0.0305578	-0.269706	0.271432	3	0.291
21	0.0379638	-0.180633	0.184579	7	1.644
22	0.0247312	-0.0304764	0.0392485	8	1.932
24	0.030746	0.122881	0.12667	8	1.959
30	0.0599349	-0.265954	0.272624	5	2.820
34	0.0869098	-0.138649	0.163637	7	2.119
35	0.0894159	-0.203378	0.222166	8	2.306
28	0.0528942	-0.0687079	0.0867097	5	2.117
Total	0.0519876	0.135059	0.144719		1.952

Table 3. Check points.

Digital Elevation Model

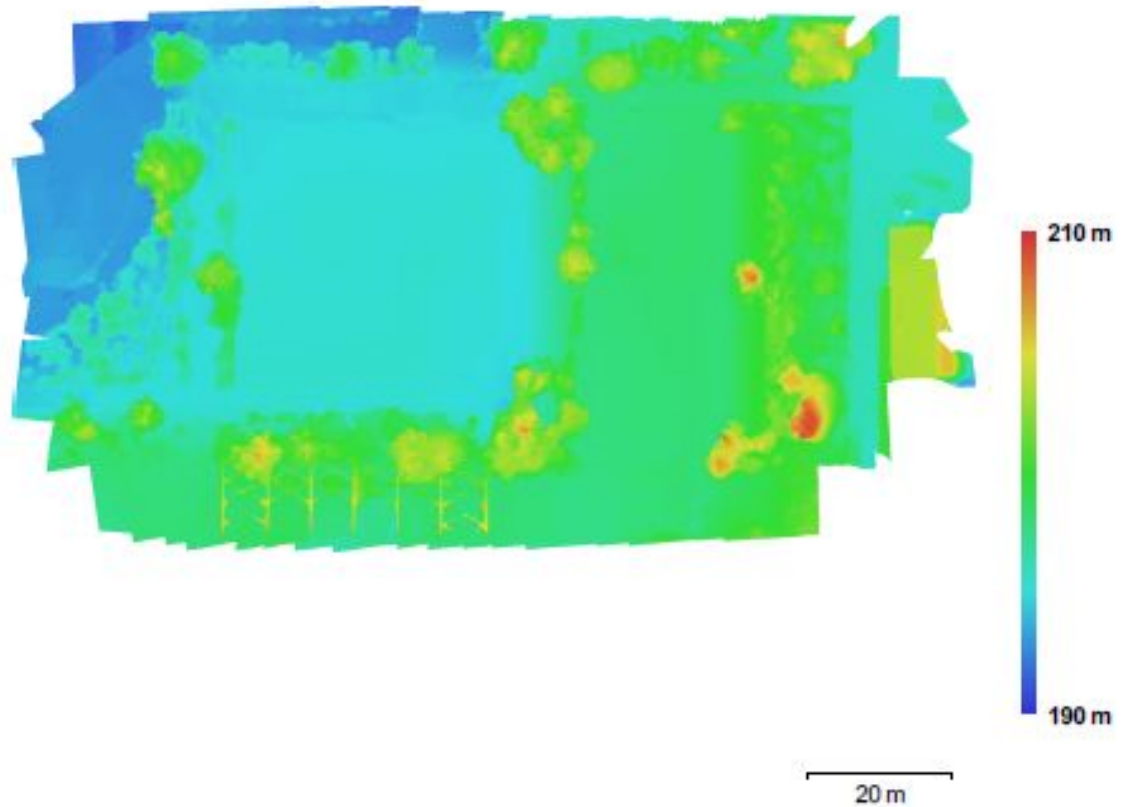


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.1 cm/pix
Point density: 2268.32 points per sq m

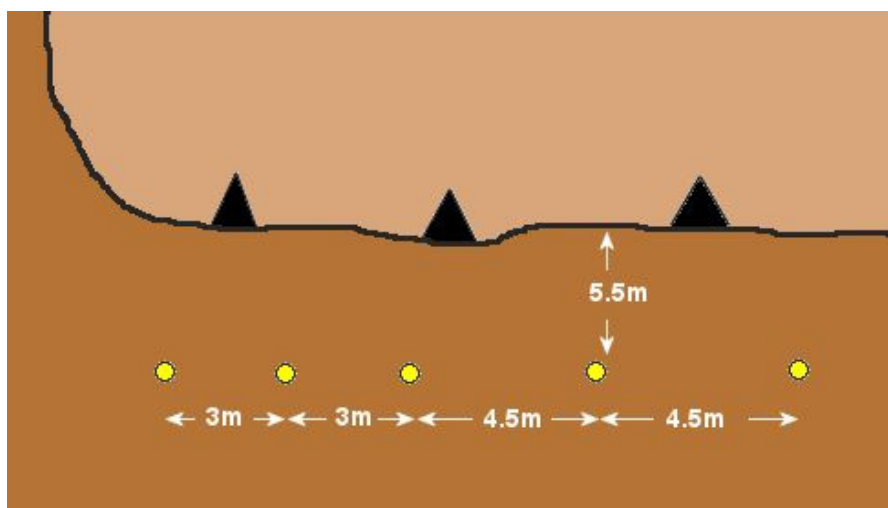
Processing Parameters

General	
Cameras	119
Aligned cameras	119
Markers	31
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG:2100)
Point Cloud	
Points	117,428 of 135,570
RMS reprojection error	0.719067 (3.30415 pix)
Max reprojection error	20.0419 (75.5659 pix)
Mean key point size	5.3409 pix
Effective overlap	3.61851
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Reference
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	No
Matching time	9 minutes 38 seconds
Alignment time	2 minutes 4 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Optimization time	5 seconds
Dense Point Cloud	
Points	23,685,229
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Processing time	4 minutes 22 seconds
Model	
Faces	4,685,031
Vertices	2,345,746
Texture	4,096 x 4,096, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	4,737,045
Processing time	2 minutes 53 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
UV mapping time	1 minutes 57 seconds
Blending time	1 minutes 15 seconds

4.4 Μετρήσεις στο Λατομείο

Το λατομείο ασβεστολίθου που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ανήκει στη Α.Ε. Τιμέντων ΤΙΤΑΝ και βρίσκεται στη θέση Καμάρι του νομού Βοιωτίας. Το μέτωπο που επρόκειτο να πραγματοποιηθεί η ανατίναξη βρισκόταν στη βορειοδυτική πλευρά του λατομείου και ανήκε στην προτελευταία βαθμίδα από τα όρια της εκμετάλλευσης, ενώ λόγω της μορφολογίας του σημείου η επικοινωνία μεταξύ της οροφής και δαπέδου της βαθμίδας ήταν ιδιαίτερα εύκολη μέσω πλευρικού δρόμου.

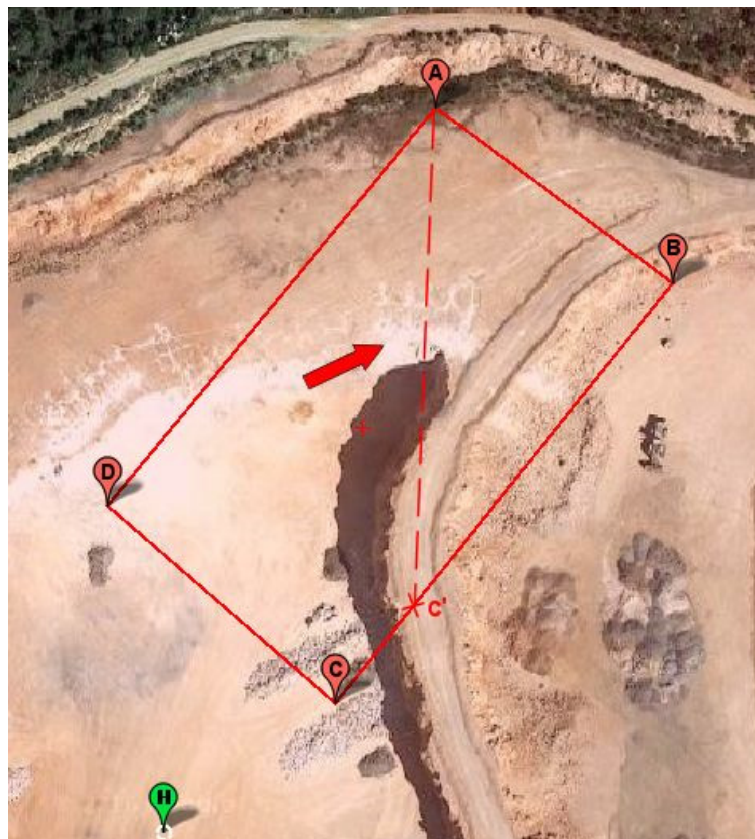
Τα στοιχεία του σχεδίου ανατίναξης όριζαν ύψος βαθμίδας 20m με κλίση πρανούς 70°, 5 διατρήματα Φ165mm με φορτίο 5,5m και μεταξύ τους αποστάσεις 3 ή 4,5 μέτρων με υποδιάτρηση 1m και επιγύμωση 6m από τρίματα του ασβεστόλιθου που διατρήθηκε. Η γόμωση των διατρημάτων έγινε με πετραμμωνίτη (ANFO) για την έναυση του οποίου χρησιμοποιήθηκε ζελατινοδυναμίτιδα και ακαριαία θρυαλλίδα ενώ η πυροδότηση έγινε με ηλεκτρικά καψύλλια επιβράδυνσης 25ms. Οι μετρήσεις του ύψους και της κλίσης της βαθμίδας πιστοποιήθηκαν με χρήση της συσκευής LaserAce 3D Burden Finder, που διαθέτει το Εργαστήριο.



Κάτοψη του σχεδίου ανατίναξης. Αποστάσεις διατρημάτων και φορτίο.

Το λογισμικό σταθμού βάσης “Mission Planner” του UAV έχει τη δυνατότητα προβολής δορυφορικών χαρτών για διευκόλυνση στο σχεδιασμό μιας αποστολής ή την παρακολούθηση του στίγματος του

UAV στο χάρτη σε πραγματικό χρόνο. Στην προκειμένη περίπτωση, δεν υπήρχε ταύτιση της πραγματικότητας με τη δορυφορική απεικόνιση της περιοχής, λόγω της γρήγορης χρονικής εξέλιξης της εκμετάλλευσης. Συνεπώς ήταν αναγκαία η «χειροκίνητη» οριοθέτηση της περιοχής και η μετέπειτα προβολή και επεξεργασία των συντεταγμένων στο λογισμικό βάσης για τη διενέργεια του προγραμματισμού πτήσης. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκαν 3 σημεία (A,B,C') στο έδαφος, με τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστάσεις AB και BC' να αποτελούν τις πλευρές νοητού ορθογωνίου παραλληλογράμμου, που θα περιλάμβανε με αρκετές ανοχές το σωρό και τις πιθανές εκτοξεύσεις πετρωμάτων μετά την ανατίναξη αλλά θα τοποθετούσε και το block ενδιαφέροντος όσο το δυνατόν προς το κέντρο του. Το σημείο C' αποτελούσε κυρίως σημείο ελέγχου της διεύθυνσης AC καθώς η τελική του τοποθέτηση (στο C), απαιτούσε τη μετάβαση στο χαμηλότερο επίπεδο του δαπέδου της βαθμίδας, όπου δεν υπήρχε οπτική επαφή με την επιφάνεια της οροφής της βαθμίδας για να μπορεί να αποτιμηθεί η οριοθέτηση.



Η οριοθέτηση της πτήσης. Με βέλος σημειώνεται η περιοχή ανατίναξης



Το μέτωπο της βαθμίδας. Τα βέλη οριοθετούν την οροφή

Τα σημεία σημειώθηκαν στο έδαφος με σπρέι έντονου χρώματος και ελήφθησαν οι συντεταγμένες τους με συμβατική συσκευή GPS στο σύστημα WGS84. Οι συντεταγμένες των σημείων μετατράπηκαν σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος μέσω της απλής σχέσης

Decimal Degrees = Degrees +minutes/60+seconds/60

και δημιουργήθηκε αρχείο πολυγωνικής οριοθέτησης για το λογισμικό προγραμματισμού πτήσης, με βάση την παρακάτω δομή

```
# 1st Photogrammetric Mission
ALat[space]ALon[\n]
BLat[space]BLon[\n]
C' Lat[space]C' Lon[\n]
ALat[space]ALon[\n]
```

όπου π.χ. ALat και ALon το γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα του σημείου A, εκφρασμένο σε δεκαδική μορφή. Κατά την εισαγωγή του αρχείου στο λογισμικό σχηματίστηκε το τρίγωνο ABC' που με σχετικές διορθώσεις μετατράπηκε στο τελικό παραλληλόγραμμο οριοθέτησης ABCD με διαστάσεις 80m x 140m. Με ύψος πτήσης στα 70m, ταχύτητα 4-5m/sec και ποσοστό επικαλύψεων ελαφρά αυξημένο προκειμένου να αντισταθμιστούν πιθανές παρεκκλίσεις λόγω ισχυρών ανέμων (85% και 65%), τα στοιχεία του προγραμματισμού πτήσης ήταν:

H (m)	V (m/sec)	k	cm/px	FOV (m)	B (m)	A (m)	Rep (sec)	Strips	Total Photos	Mission Time (min)
70	5	1400	0,60	20,9 x 31,22	3	10,7	0,63	7	202	4,17
70	4	1400	0,60	20,9 x 31,22	3	10,7	0,78	7	202	5,21

Από τα παραπάνω σενάρια επιλέχθηκε το δεύτερο, καθώς στην πρώτη περίπτωση το διάστημα λήψεων ήταν πολύ κοντά στο χρόνο εναναληψιμότητας της μηχανής. Παράλληλα ο προσδιοριζόμενος χρόνος για τη συγκεκριμένη αποστολή κυμαινόταν στα (5,21 x 1.5) min, δηλαδή εντός των ορίων για πιθανή επανάληψη της πτήσης με την ίδια μπαταρία δεδομένου πως η συνολική διάρκειά της, επαρκούσε για ασφαλή πτήση 16 λεπτών.

Το σχέδιο πτήσης λίγο πριν το «ανέβασμά» του στο Drone

Στο χώρο της οροφής της βαθμίδας πακτώθηκαν με καρφιά 5 φωτοσταθεροί στόχοι, ένας εκ των οποίων τοποθετήθηκε στο άκρο της βαθμίδας και οι υπόλοιποι περιμετρικά, έχοντας υπόψη να μην



Ο σταθμός βάσης

καταστραφούν από την ανατίναξη ώστε να μην χρειαστεί να τοποθετηθούν εκ νέου. Δίπλα σε κάθε στόχο αναγράφηκε αριθμός με σπρέι έντονου χρώματος για την διευκόλυνση της αναγνώρισής του από τις φωτογραφίες και την απόδοση του ανάλογου σετ συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες των 9 φωτοσταθερών ελήφθησαν

με χρήση γεωδαιτικού GPS με ακρίβειες που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα, σύμφωνα με το λογισμικό του οργάνου.

Φ/Σ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ακρίβεια XY (cm)	1	1	1,3	1	0,9	1,1	1,1	1,2	1,1
Ακρίβεια Z (cm)	1,5	2	1,7	1,6	1,4	1,8	2	1,7	1,7

Για την πραγματοποίηση της αποτύπωσης, αποφασίστηκε η μετάβαση στο επίπεδο του δαπέδου της βαθμίδας και ο ορισμός του ως σημείο μηδενικού ύψους για λόγους συμβατότητας με το λογισμικό βάσης του UAV. Στο επίπεδο αυτό τοποθετήθηκαν άλλοι 4 φωτοσταθεροί στόχοι και αναπτύχθηκαν τα περιφερειακά συστήματα του σταθμού βάσης (τρίποδα, σκίαστρα, κεραία τηλεμετρίας, οθόνη λήψης video κ.τ.λ.). Πριν την έναρξη της πτήσης πραγματοποιήθηκε έλεγχος με λίστα ελέγχου (checklist) ώστε να αποφευχθούν λάθη και παραλήψεις.

Η πρώτη πτήση διήρκεσε 7:06min και πραγματοποιήθηκε με επιτυχία λαμβάνοντας τον αναμενόμενο αριθμό φωτογραφιών. Η δεύτερη πτήση πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά την ανατίναξη με όμοιο σχέδιο πτήσης αλλά διήρκεσε μόνο για 3:10min καθώς λόγω πτώσης του UAV δεν κατάφερε να ολοκληρωθεί.



To Drone κατά την πρώτη επιτυχή πτήση

Οι καιρικές συνθήκες την ημέρα που διενεργήθηκαν οι πτήσεις δεν ήταν ιδανικές επειδή έπνεαν ισχυροί άνεμοι στην περιοχή. Ωστόσο, αφενός λόγω χρονικών περιορισμών έπρεπε να γίνει εκμετάλλευση της πραγματοποιηθείσας ανατίναξης, αφετέρου θεωρήθηκε πως το UAV λόγω μεγέθους και δυνατοτήτων θα μπορούσε να ανταπεξέλθει στις δυσμενείς συνθήκες. Πράγματι κατά την πρώτη πτήση μετρήθηκαν στο δάπεδο της βαθμίδας με χρήση φορητού ανεμόμετρου, άνεμοι ταχύτητας 8,5m/sec (5Bf). Η δεύτερη όμως πτήση πραγματοποιήθηκε 1 - 1,5 ώρα αργότερα όταν πλέον είχαν ενισχυθεί οι άνεμοι, σύμφωνα με τις μετεωρολογικές προβλέψεις εκείνης της ημέρας. Στο αρχείο καταγραφής (log file) του ελεγκτή πτήσης καταγράφηκε η ακόλουθη καταχώρηση:

```
IMU Mismatch = FAIL - Check vibration or accelerometer calibration. (Mismatch: 1.93, WARN: 0.75, FAIL: 1.50)
```

που καταδεικνύει επίπεδο δονήσεων πολύ πάνω από το επιτρεπτό όριο με πιθανό αποτέλεσμα την απώλεια ευστάθειας λόγω αδυναμίας του επιταχυνσιόμετρου να αποτιμήσει σωστά την επιτάχυνση τη βαρύτητας (βλέπε κεφάλαιο 1).

Το επίπεδο των ζημιών που υπέστηκε ο εξοπλισμός δεν επέτρεπε την επιδιόρθωσή του και επανάληψη της διαδικασίας σε εύλογο χρονικό διάστημα με συνέπεια την αδυναμία προσδιορισμού αρκετών στοιχείων για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ανατίναξης, όπως εξάλλου

αναφέρθηκε και στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου. Στα επόμενα θα γίνει χρήση πλασματικών μοντέλων επιφανείας (DTMs), όπου είναι απαραίτητο, για να αποδοθεί η μεθοδολογία υπολογισμού των ογκομετρήσεων.



Το αποτέλεσμα της πτώσης

4.5 Επεξεργασία των Μετρήσεων

Η φωτογραμμετρική επεξεργασία στο PhotoScan, διενεργείται μέσω των ακόλουθων σταδίων:

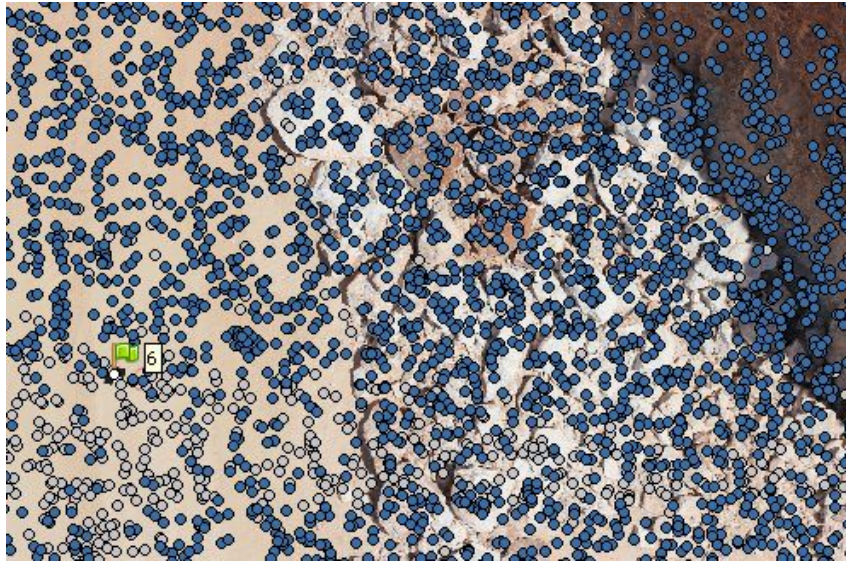
1. Εισαγωγή των φωτογραφιών - αξιολόγηση καταλληλότητας
2. Παραγωγή αραιού νέφους σημείων (Sparse point cloud)
3. Παραγωγή πυκνού νέφους σημείων (Dense point cloud)
4. Παραγωγή μοντέλου επιφάνειας (Mesh)
5. Παραγωγή Υφής (Texture)
6. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Κατά το δεύτερο και τρίτο από τα παραπάνω στάδια, διενεργείται η αμιγώς φωτογραμμετρική επεξεργασία, ενώ το τέταρτο και ιδιαίτερα το

πέμπτο στάδιο μπορούν να παραληφθούν εάν δεν απαιτείται υψηλή πιστότητα και υψηλή οπτική ποιότητα αντίστοιχα, στο παραγόμενο τρισδιάστατο μοντέλο.

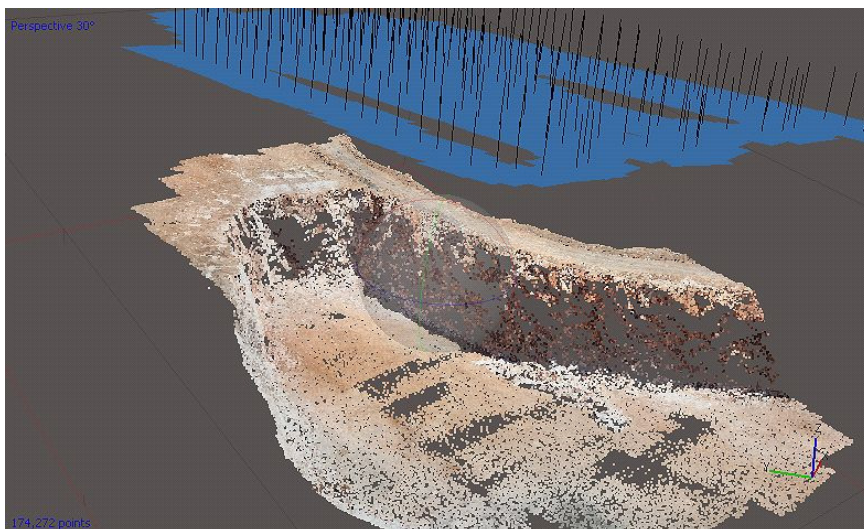
Εισαγωγή των φωτογραφιών - αξιολόγηση καταλληλότητας: Η εισαγωγή των εικόνων στο πρόγραμμα, μπορεί να γίνει συνολικά ή τμηματικά, επιτρέποντας σε ένα συνολικό project την τμηματική επεξεργασία, ανάλογα με το διαθέσιμο χρόνο ή σκοπό. Κατά την τμηματική εισαγωγή, οι εικόνες εισάγονται σε υποσύνολα (chunks) τα μέλη οποίων πρέπει να έχουν την απαραίτητη χωρική συσχέτιση, ώστε να είναι δυνατή η φωτογραμμετρική επεξεργασία. Σε δεύτερο χρόνο, τα chunks μπορούν να ενοποιηθούν βάση κοινών σημείων, απαρτίζοντας το ευρύτερο project. Κατά την εισαγωγή των εικόνων, αν αυτές περιλαμβάνουν γεωδαιτικές συντεταγμένες (π.χ. geotagging) στα μεταδεδομένα EXIF, τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της ταχύτητας εντοπισμού ομόλογων σημείων. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει μια λειτουργία αξιολόγησης της ποιότητας των φωτογραφιών, κυρίως από άποψη επαρκούς ενάργεια και θορύβου. Από την τεκμηρίωση του προγράμματος, προτείνεται η διενέργεια της εν λόγω λειτουργίας και ο αποκλεισμός όσων φωτογραφιών λάβουν αξιολόγηση μικρότερη από την τιμή 0.5. Η εισαγωγή των φωτογραφιών έγινε μαζικά (202 φωτογραφίες), ενώ κατά την διαδικασία αξιολόγησης η ελάχιστη τιμή του δείκτη καταλληλότητας ήταν 0.61 με αποτέλεσμα να μην αποκλειστεί κάποια φωτογραφία από την μετέπειτα φωτογραμμετρική επεξεργασία.

Παραγωγή Αραιού Νέφους Σημείων: Στο στάδιο αυτό συντελείται η αμιγώς φωτογραμμετρική επεξεργασία, καθώς κατά τη διάρκειά του εκτελείται ο αλγόριθμος του αεροτριγωνισμού που συνεπάγεται την ανάπλαση του σχήματος του μοντέλου, την αποκατάσταση του μεγέθους και της θέσης του στο χώρο και την διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων σε ένα βήμα. Σε πρώτη φάση σαρώνονται όλες οι εικόνες όπου με χρήση αλγορίθμου SFM εντοπίζονται τα ομόλογα σημεία τα οποία χρησιμοποιούνται ως σημεία σύνδεσης στον αεροτριγωνισμό, που αρχικά συντελείται σε αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων.

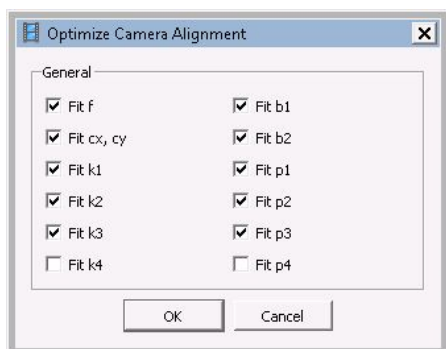


Ομόλογα σημείων σε φωτογραφία

Προϊόν αυτής της αρχικής φάσης είναι η ανάπλαση του σχήματος του μοντέλου μέσω ενός αραιού νέφους ομόλογων σημείων στο χώρο και ο εντοπισμός των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων σε αυθαίρετο σύστημα. Στη συνέχεια μέσω της εισαγωγής των συντεταγμένων των φωτοσταθερών σημείων αλλά και της στόχευσης αυτών σε όλες τις σχετικές εικόνες, πραγματοποιείται η μετάβαση στο γεωδαιτικό σύστημα που αποτελεί έναν μετασχηματισμό ομοιότητας κατά τον οποίο δεν μπορούν να αντισταθμιστούν μη γραμμικές παραμορφώσεις που πιθανότατα προέρχονται από σφάλματα κατά τη διαδικασία του σχετικού προσανατολισμού.



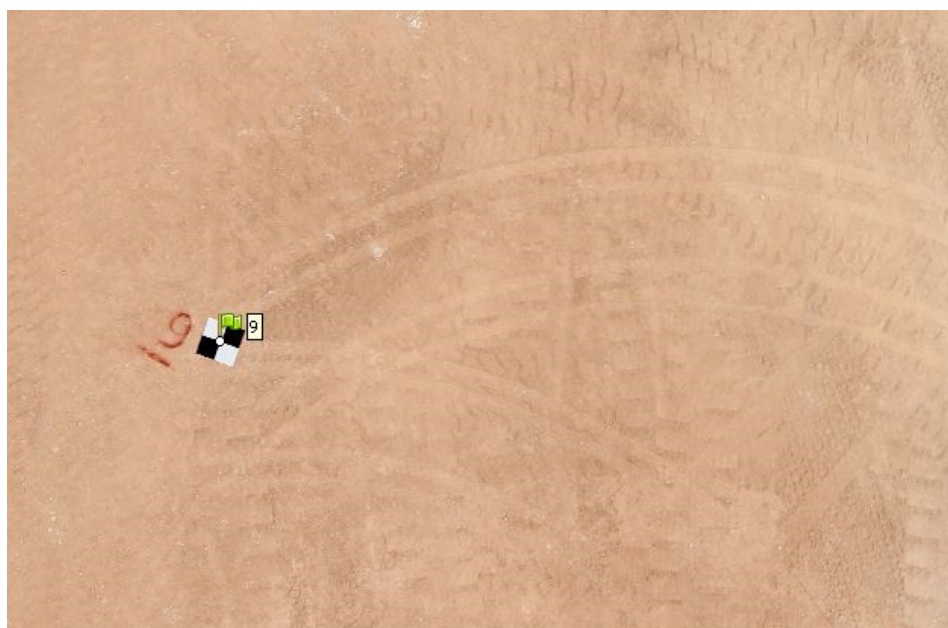
Αραιό νέφος ομόλογων σημείων και επίπεδα λήψης



Το παράθυρο διαλόγου κατά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης

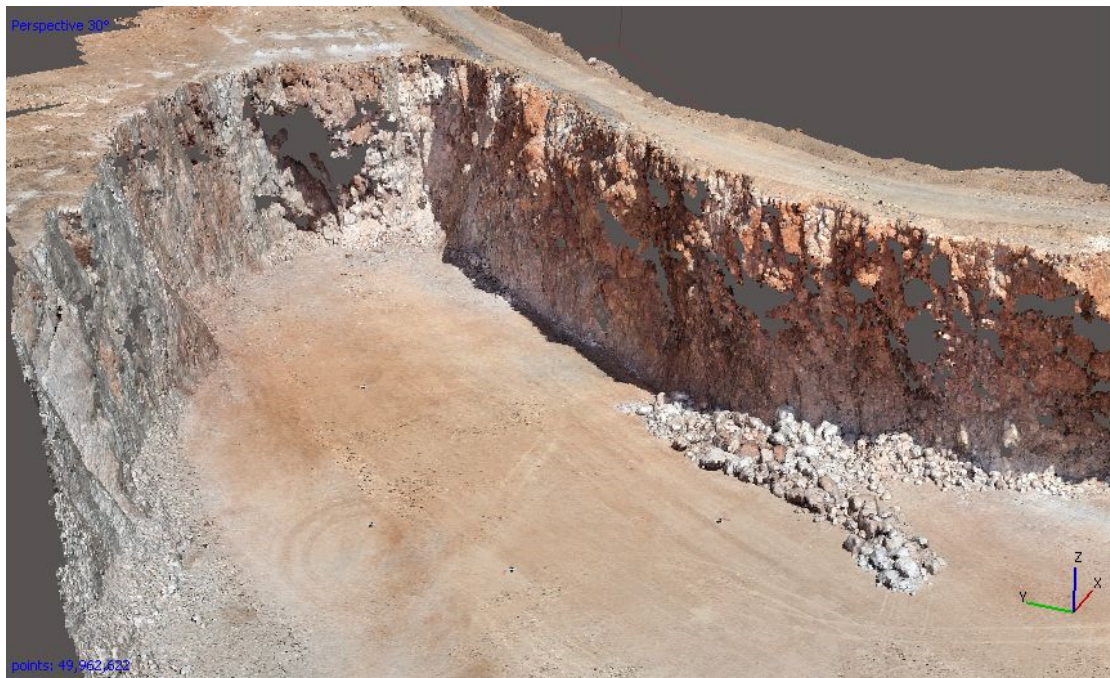
Με τη διαδικασία βελτιστοποίησης που προσφέρει το πρόγραμμα αφαιρούνται οι πιθανές μη γραμμικές παραμορφώσεις, βελτιστοποιώντας το νέφος των ομόλογων σημείων και τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, με βάση γνωστές συντεταγμένες. Εν ολίγοις εφαρμόζεται η μέθοδος αυτορρύθμισης (*self-calibration*), καθώς η εξάλειψη των συστηματικών παραμορφώσεων των

δεδομένων βασίζεται σε πληροφορίες που προκύπτουν από τα ίδια τα δεδομένα. Σε περίπτωση που δεν κρίνεται αναγκαία η ένταξη στο γεωδαιτικό σύστημα, η αποκατάσταση της κλίμακας και μόνο, μπορεί να γίνει με χρήση γνωστής απόστασης η οποία θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική των διαστάσεων του μοντέλου προκειμένου να περιοριστούν τα σφάλματα. Οι παράμετροι ρύθμισης του σταδίου αυτού, αφορούν στο επίπεδο ακρίβειας στην εκτίμηση των θέσεων λήψης, τη χρήση ή όχι δεδομένων GPS για τη βελτίωση της ταχύτητας εντοπισμού ομόλογων σημείων καθώς και στα ανώτατα όρια εντοπισμού ομόλογων σημείων σε κάθε εικόνα.



Σήμανση φωτοσταθερού σε εικόνα

Παραγωγή Πυκνού Νέφους Σημείων: Βασιζόμενο στις εκτιμώμενες θέσεις λήψης, το πρόγραμμα είναι σε θέση να επεκτείνει τον εντοπισμό ομόλογων σημείων σε ολόκληρες τις εικόνες, τα οποία συνδυάζει σε ένα ενιαίο πυκνό νέφος σημείων. Οι παράμετροι ρύθμισης της διαδικασίας δημιουργίας πυκνού νέφους σημείων, αφορούν στην ποιότητα του παραγόμενου νέφους ανάλογα με την εφαρμογή των αλγορίθμων SFM στις αρχικές εικόνες ή σε υποκλίμακά τους, καθώς και σε φίλτρα αντιμετώπισης αποκλίσεων που προσαρμόζονται ανάλογα με την λεπτομέρεια της γεωμετρίας του μοντέλου. Για τη βελτίωση του χρόνου παραγωγής του πυκνού νέφους σημείων, η διαδικασία μπορεί να περιοριστεί σε συγκεκριμένη περιοχή του μοντέλου, με χρήση συγκεκριμένου εργαλείου οριοθέτησης.

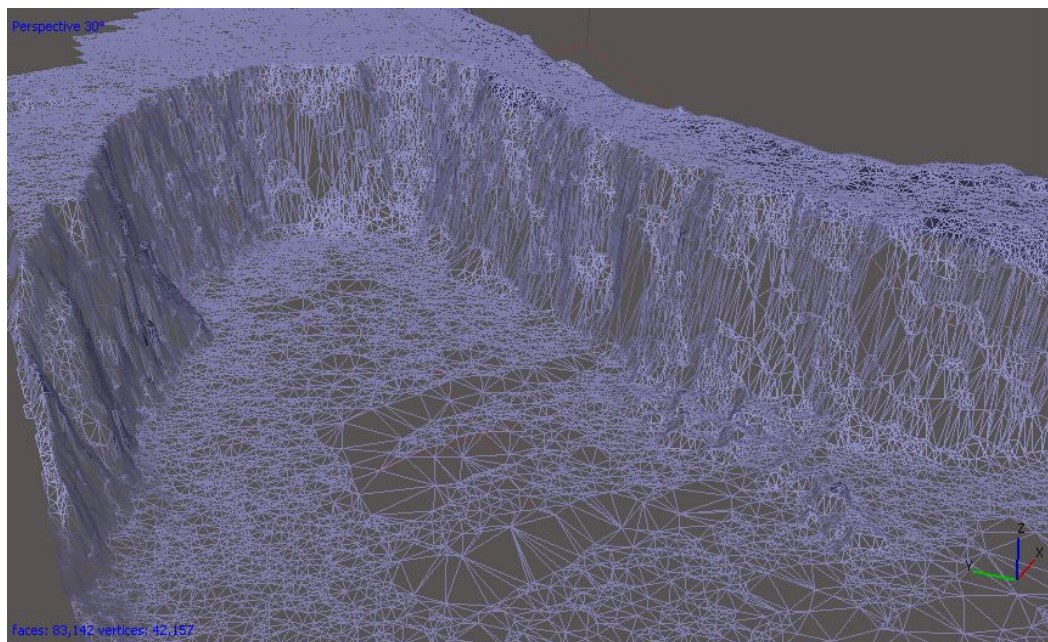


Το αποτέλεσμα της παραγωγής πυκνού νέφους σημείων

Παραγωγή μοντέλου επιφάνειας: Το PhotoScan μπορεί να αποδώσει την μορφολογία της επιφάνειας του μοντέλου κατασκευάζοντας ένα πολυγωνικό πλέγμα βασιζόμενο στην ένωση των σημείων του πυκνού ή του αραιού νέφους, ακολουθώντας τις αρχές κάποιου ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, όπως π.χ. το TIN (Triangulated Irregular Network). Οι παράμετροι ρύθμισης της δημιουργίας της επιφάνειας αφορούν:

- Στον τύπο αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί για τη δόμηση του πλέγματος. Υποστηρίζονται δυο τύποι αλγορίθμων που αφορούν σε μοντέλα επίπεδων ή κλειστών επιφανειών.
- Στην επιλογή των σημείων πυκνού ή του αραιού νέφους ως βάση για την κατασκευή του πλέγματος.
- Στον μέγιστο παραγόμενο αριθμό πολυγώνων στο πλέγμα.
- Στο επίπεδο επιφανειακής παρεμβολής γύρω από κάθε σημείο του νέφους, ώστε το τελικό πλέγμα να είναι συνεχές χωρίς οπές.

Το πρόγραμμα υποστηρίζει βασικά εργαλεία επεξεργασίας επιφανειών, όπως το κλείσιμο οπών, την απλοποίηση του πλέγματος και την αφαίρεση τμημάτων, τα οποία όμως είναι αρκετά περιορισμένων δυνατοτήτων με αποτέλεσμα, ακόμη και για σχετικά απλές περιπτώσεις, να απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων επεξεργασίας επιφανειών.



Μοντελοποίηση της επιφάνειας με πλέγμα

Παραγωγή Υφής: Κατά τη διενέργεια αυτού του σταδίου προσαρμόζεται η raster δομή των εικόνων στο πλέγμα - επιφάνεια του μοντέλου, που έχει προκύψει από το προηγούμενο βήμα. Η διαδικασία είναι προαιρετική καθώς σχετίζεται αποκλειστικά με την βελτίωση της οπτικής

πιστότητας του μοντέλου. Οι παράμετροι ρύθμισης της διαδικασίας σχετίζονται με τον τρόπο προσαρμογής της υφής ανάλογα με τη μορφολογία της επιφάνειας του μοντέλου και του είδους του παραγόμενου προϊόντος (π.χ. ορθοφωτοχάρτης) καθώς και με την ποιότητα (ανάλυση - μέγεθος) της υφής για την ρύθμιση της οπτικής πιστότητας του μοντέλου.



Προσθήκη υφής στο μοντέλο

Εξαγωγή αποτελεσμάτων: Το PhotoScan υποστηρίζει την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε διάφορες μορφές ανάλογα με το τρέχον στάδιο της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Συγκεκριμένα μπορούν να εξαχθούν αραιά ή πυκνά νέφη σημείων, ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας με ή χωρίς υφή, ορθοφωτοχάρτες, χάρτες ισοϋψών καμπυλών και άλλες μορφές αρχείων, κατάλληλες για εισαγωγή σε εξειδικευμένα προγράμματα σχεδιασμού και επεξεργασίας επιφανειών (MeshLab, CloudCompare), τρισδιάστατης μοντελοποίησης (GeoMagic, SolidWorks), GIS (ArcGIS, GlobalMapper) κ.τ.λ.

Η έκθεση (report) που εξάγει το λογισμικό περιλαμβάνει στοιχεία για τον εσωτερικό προσανατολισμό, την κλίμακα και τις επικαλύψεις, στοιχεία προσδιορισμού σφαλμάτων αλλά και την πλήρη σειρά παραμέτρων της

φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή 5 φωτοσταθερά σημεία έλαβαν μέρος στη συνόρθωση ως σημεία γνωστών συντεταγμένων και τα υπόλοιπα 4 ως σημεία ελέγχου. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμάνθηκε στα 6,7cm, με το μέσο οριζοντιογραφικό στα 2,2cm και το μέσο υψομετρικό στα 6,3cm. Οι απόλυτα θετικές αυτές τιμές σφάλματος οφείλονται τόσο στην αυξημένη ακρίβεια του γεωδαιτικού GPS λόγω της λειτουργίας του σε μη αστικό περιβάλλον όσο και στη μη βέλτιστη τοποθέτηση των φωτοσταθερών σημείων. Πράγματι η τοποθέτηση των φωτοσταθερών έγινε με περιορισμένη διασπορά ειδικά στο επίπεδο του δαπέδου της βαθμίδας, λόγω αδυναμίας προσέγγισης σε σημεία πλησίον των πρανών λόγω μικροκατολισθήσεων που λάμβαναν χώρα. Κατά συνέπεια, τα σημεία ελέγχου και τα σημεία γνωστών συντεταγμένων βρίσκονται αρκετά κοντά με αποτέλεσμα τα πρώτα να δέχονται ισχυρό βαθμό επίδρασης (biased) από τα δεύτερα. Έτσι η εξαιρετική εκτίμηση σφάλματος από το πρόγραμμα καταδεικνύει περισσότερο ένα αποτέλεσμα καλής ακρίβειας (precision) παρά ορθότητας (accuracy), χωρίς αυτό βέβαια να σημαίνει πως το μοντέλο παρουσιάζει ιδιαίτερες αποκλίσεις.

Agisoft PhotoScan

Processing Report

20 October 2016



Survey Data

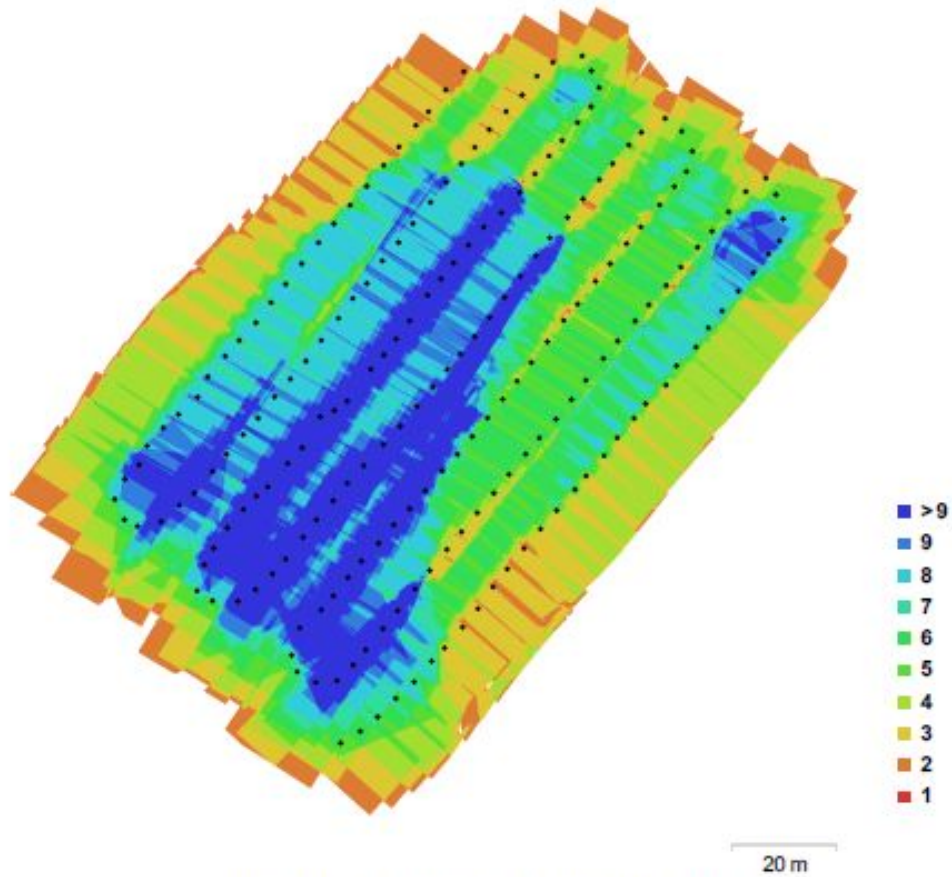


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	202	Camera stations:	202
Flying altitude:	58.6 m	Tie points:	174,272
Ground resolution:	4.85 mm/pix	Projections:	742,539
Coverage area:	1.39e+04 sq m	Reprojection error:	1.86 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 550D (50 mm)	5184 x 3456	50 mm	4.4 x 4.4 um	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

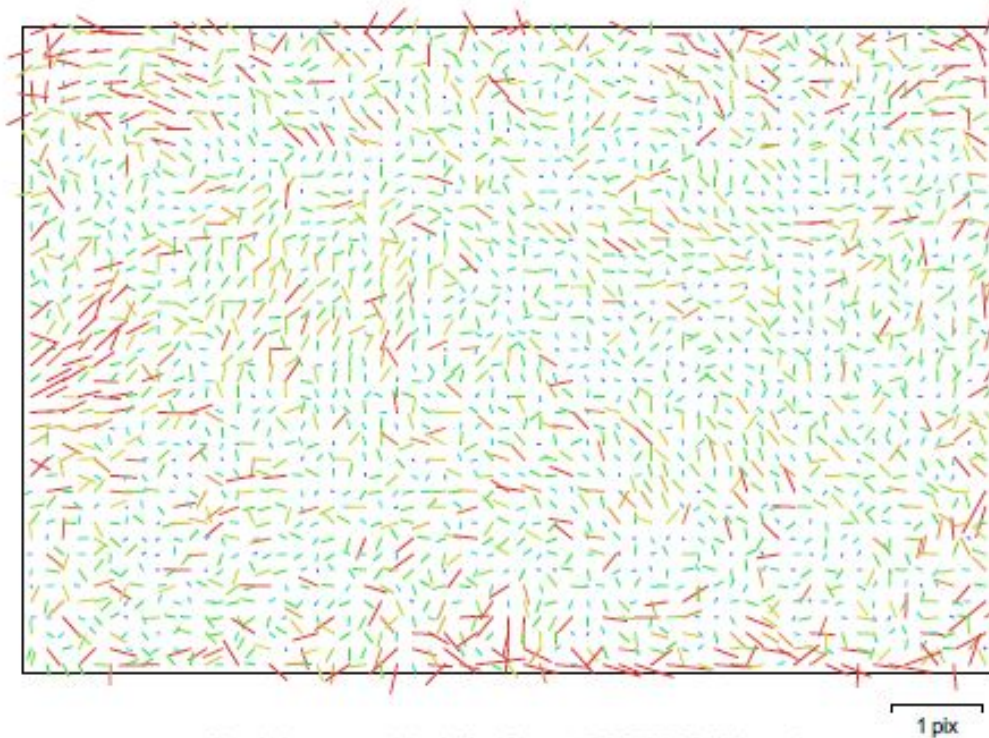


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 550D (50 mm).

Canon EOS 550D (50 mm)

202 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
5184 x 3456	50 mm	4.4 x 4.4 um	No
Type:	Frame	F:	12013.8
Cx:	2.88533	B1:	4.13174
Cy:	20.4638	B2:	-6.71032
K1:	-0.0744445	P1:	-0.00101269
K2:	-0.136153	P2:	-6.51767e-05
K3:	-0.226091	P3:	2.43164
K4:	0	P4:	0

Ground Control Points

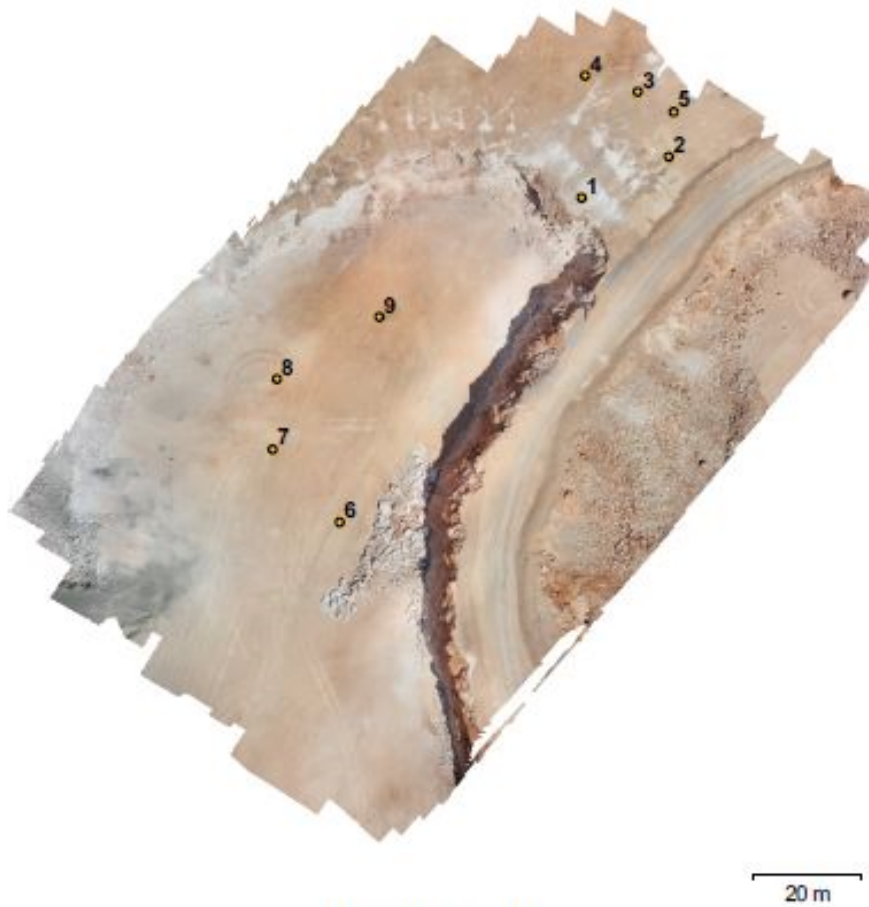


Fig. 3. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
9	0.0145098	-0.00574209	0.0156047	8	0.723
4	0.0237852	0.0118516	0.0265743	6	0.377
5	0.00923447	-0.011127	0.0144598	3	1.670
7	0.00423084	0.00518713	0.00669375	8	0.555
1	0.0210071	-0.00259028	0.0211662	5	0.427
Total	0.0162527	0.0081346	0.0181747		0.748

Table 2. Control points.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
6	0.031785	-0.0715364	0.0782799	13	0.780
3	0.0145764	-0.0663503	0.0679326	5	0.899
2	0.0164897	-0.0680087	0.0699792	4	1.076
8	0.0238971	-0.045623	0.0515027	7	0.530
Total	0.0227252	0.0636916	0.0676243		0.800

Table 3. Check points.

Digital Elevation Model

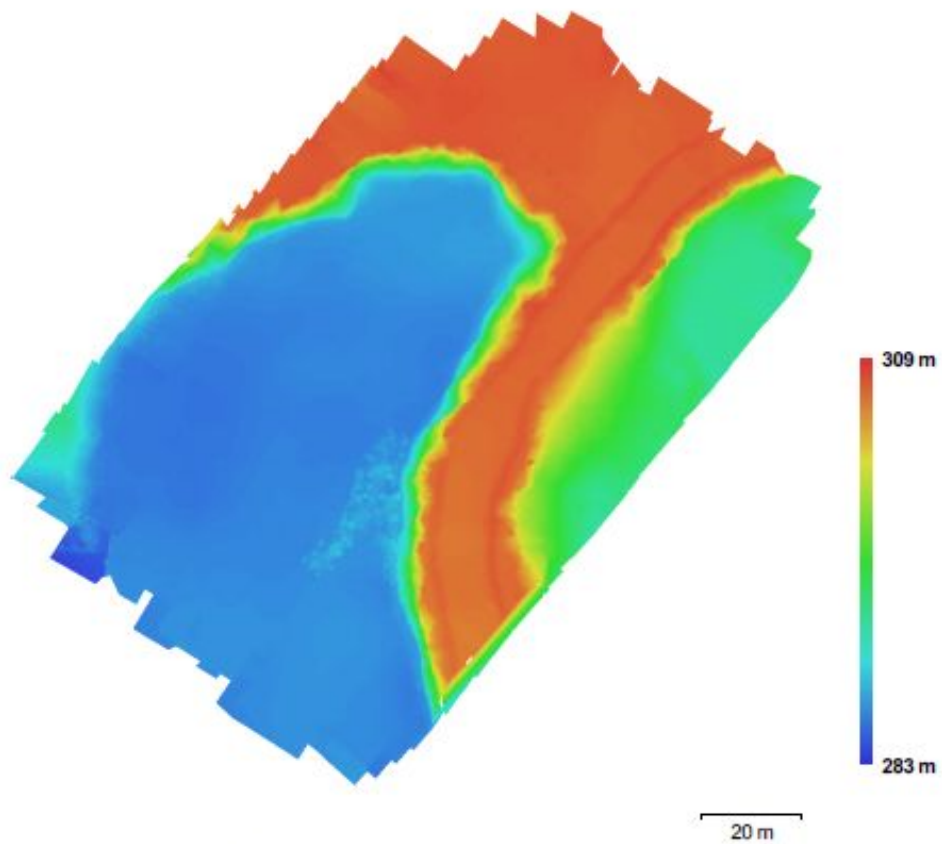


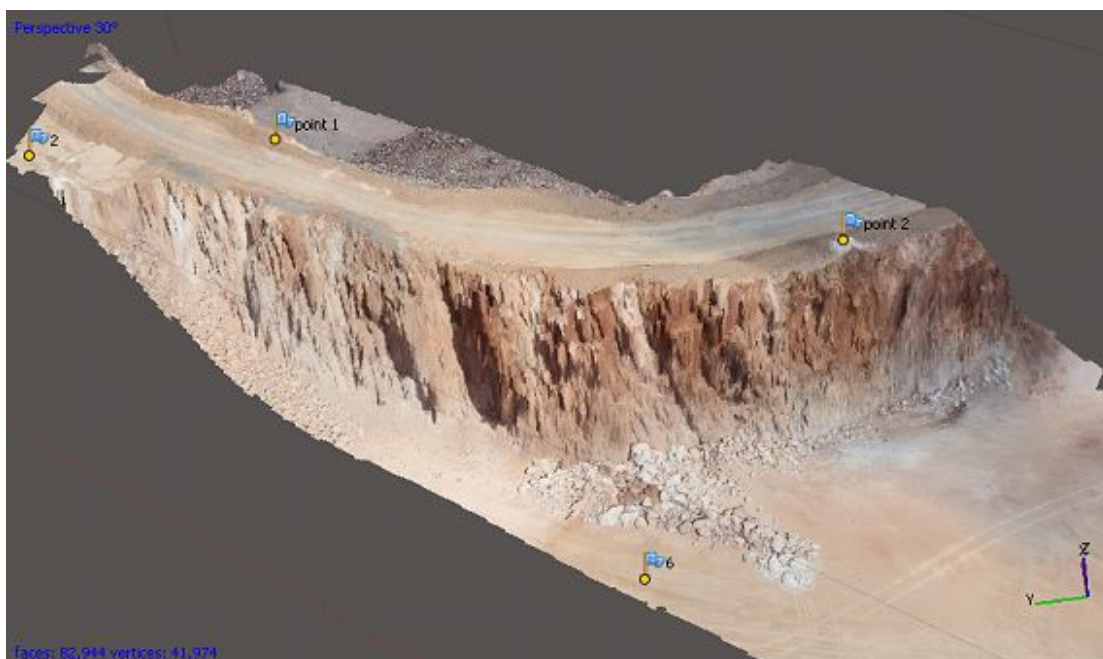
Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 1.94 cm/pix
Point density: 2654.51 points per sq m

Processing Parameters

General	
Cameras	202
Aligned cameras	202
Markers	9
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG:2100)
Point Cloud	
Points	174,272 of 189,193
RMS reprojection error	0.373007 (1.86159 pix)
Max reprojection error	2.32174 (30.0259 pix)
Mean key point size	5.34948 pix
Effective overlap	4.48649
Alignment parameters	
Accuracy	Medium
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	No
Matching time	12 minutes 41 seconds
Alignment time	3 minutes 43 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	7 seconds
Dense Point Cloud	
Points	49,949,189
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Processing time	9 minutes 15 seconds
Model	
Faces	9,839,885
Vertices	4,925,503
Texture	4,096 x 4,096, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	9,989,837
Processing time	3 minutes 29 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
UV mapping time	3 minutes 50 seconds
Blending time	2 minutes 11 seconds
Orthomosaic	
Size	33,404 x 31,975
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG:2100)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
Reconstruction parameters	
Surface	Mesh
Enable color correction	No

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την επεξεργασία του σετ φωτογραφιών από την πτήση μετά την ανατίναξη. Συνέπεια της ημιτελούς αποτύπωσης ήταν η απεικόνιση μόνο 2 φωτοσταθερών, με αποτέλεσμα την αδυναμία απόλυτου προσανατολισμού του μοντέλου. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκαν οι συντεταγμένες 2 σημείων από το πρώτο μοντέλο για να συμπληρώσουν τον απαιτούμενο αριθμό φωτοσταθερών.



Το μοντέλο από τη δεύτερη ημιτελή πτήση. Point1-Point2 τα επιπλέον σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωαναφορά.

4.6 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της Ανατίναξης

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του ειδικού μέρους, η αξιολόγηση της ανατίναξης συνδέεται με την αποτίμηση στοιχείων και μεγεθών των οποίων ο προσδιορισμός γίνεται είτε με εμπειρικές μεθόδους που στερούνται ακρίβειας είτε με συμβατικές τοπογραφικές που στερούνται λεπτομέρειας και ποιοτικής πληροφορίας. Η φωτογραμμετρική μέθοδος πλεονεκτεί σε εφαρμογές για τις οποίες η λεπτομερής απόδοση είναι καθοριστικής σημασίας, όπως ο μεταλλευτικός χώρος με τις έντονες και συνεχής εναλλαγές ανάγλυφου. Η ψηφιακή επεξεργασία χιλιάδων σημείων, επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων πολύ κοντά στην

πραγματικότητα, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα προσδιορισμού μεγεθών με πολύ μεγάλη ακρίβεια:

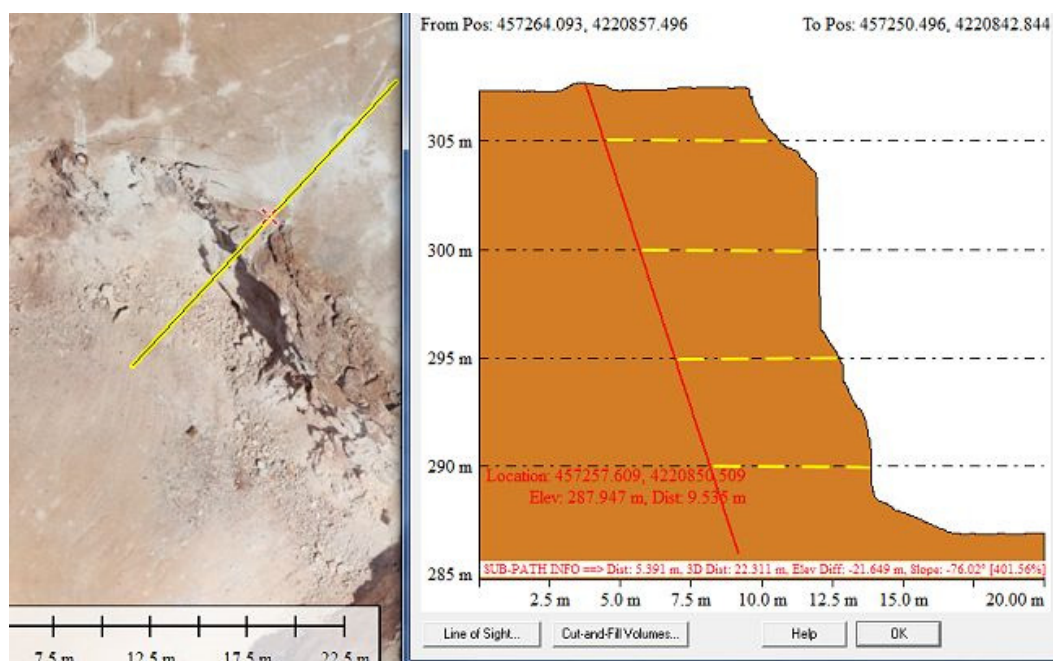
Φορτίο καθ' ύψος της βαθμίδας: Με την συμβατική μέθοδο υπολογισμού της γεωμετρίας του μετώπου ανατίναξης, θεωρείται πως το φορτίο της ανατίναξης παραμένει σταθερό κατά το κεκλιμένο ύψος της βαθμίδας και ίσο με την απόσταση από το πρώτο διάτρημα (σε περίπτωση που υπάρχει μόνο μια σειρά διατρημάτων) μέχρι το άκρο (φρύδι) αυτής. Ωστόσο με βάση αυτή τη θεώρηση, το σχέδιο ανατίναξης δεν είναι βέλτιστο καθώς υλοποιείται βασιζόμενο σε παραμέτρους εκτός πραγματικότητας, με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος και την εμφάνιση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως η εκτόξευση τεμαχίων ή η δημιουργία δονήσεων. Με τη βοήθεια φορητών οργάνων όπως το LaserAce 3D Burden Finder που διαθέτει το Εργαστήριο, είναι δυνατή η λεπτομερέστερη αποτύπωση της κεκλιμένης επιφάνειας του μετώπου με την μέτρηση ενός αριθμού σημείων καθ' ύψος, ανάλογου με το επιθυμητό επίπεδο πιστότητας.



Το LaserAce 3D Burden Finder και η εκτίμηση του φορτίου με το συνοδευτικό λογισμικό

Με τη φωτογραμμετρική μέθοδο, η απόδοση της κεκλιμένης επιφάνειας είναι συνάρτηση της κλίμακας που για την συγκεκριμένη περίπτωση ανέρχεται στα 1.94cm/rix με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αντικατασταθεί ρεαλιστικά από οποιαδήποτε χειροκίνητη μέθοδο. Για την ακριβή εκτίμηση της μεταβολής του φορτίου, γίνεται εξαγωγή του μοντέλου από το PhotoScan σε μορφή DEM (Digital Elevation Model) και

εισαγωγή στο GIS λογισμικό Global Mapper, το οποίο περιλαμβάνει εργαλείο για την απόδοση προφίλ από τομές (Cross Section Profile Tool). Δημιουργώντας μια τομή που διέρχεται από το κέντρο κάθε διατρήματος, προκύπτει το προφίλ της τομής που επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της μεταβολής του φορτίου.

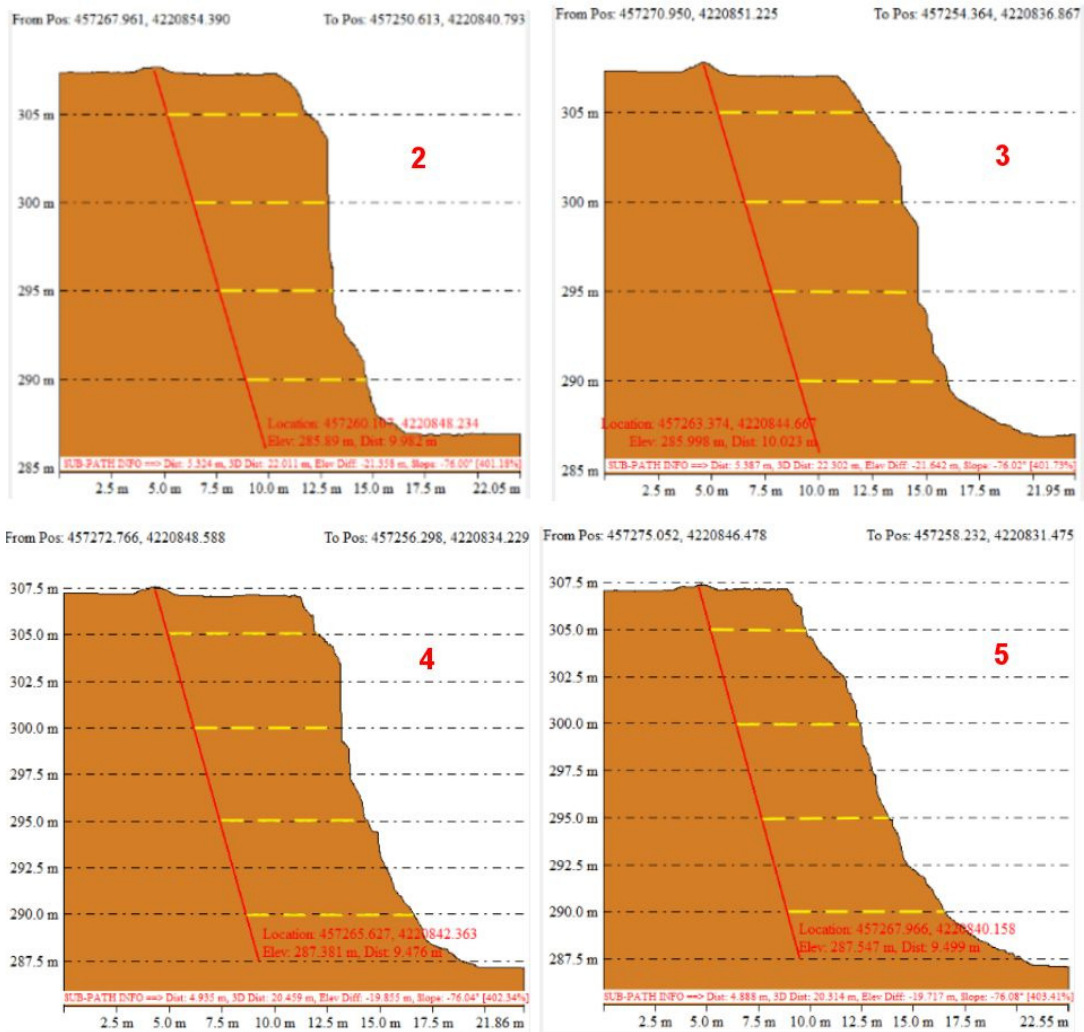


Ακριβής προσδιορισμός της μεταβολής του φορτίου καθ' ύψος της βαθμίδας (1ο διάτρημα)



Cabled BoreTrak του οίκου MDL

Η συσκευή Cabled Boretrak που διαθέτει το Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων επιτρέπει τον έλεγχο των διατρημάτων αποδίδοντας σε κατάλληλο λογισμικό τις αποκλίσεις της διάτρησης κατά τη διέλευση μέσα από αυτά. Συνεπώς είναι δυνατή η ακριβής αποτύπωση της όδευσης του διατρήματος στο παραπάνω προφίλ, η οποία σε συνδυασμό με την λεπτομερή απόδοση της κεκλιμένης επιφάνειας του μετώπου, επιτρέπει την ακριβή οριοθέτηση του φορτίου καθ' όλο το ύψος της βαθμίδας.



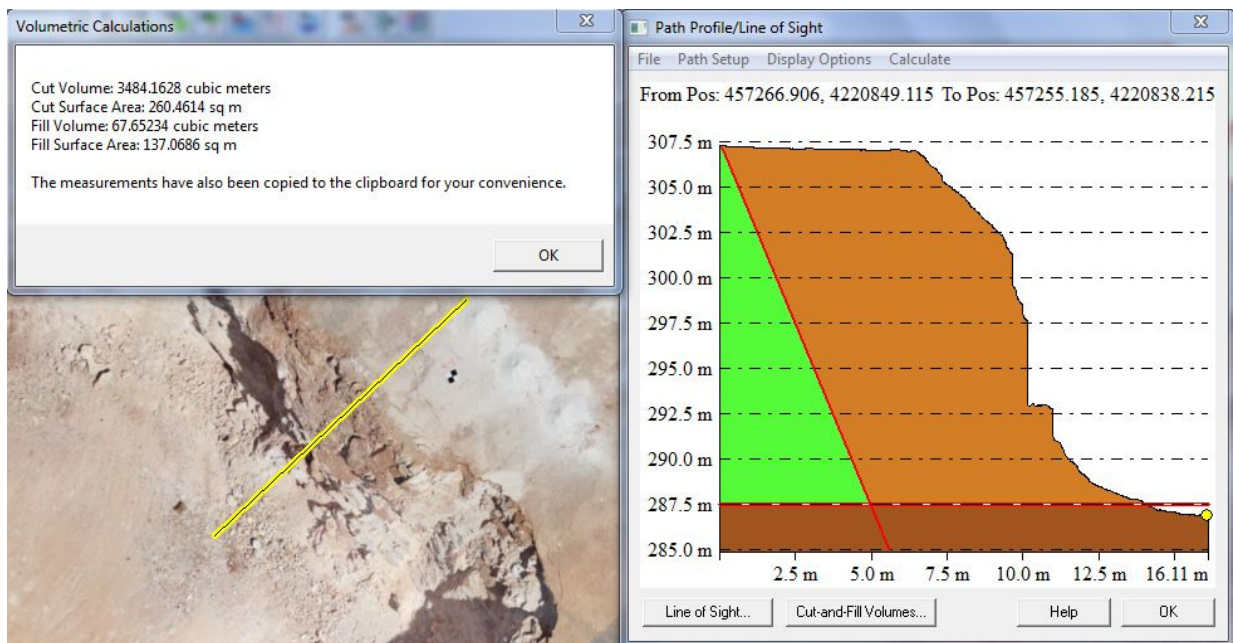
Η μεταβολή του φορτίου καθ' ύψος της βαθμίδας για τα διατρήματα 2-5

Ογκομετρήσεις: Ο όγκος των εξορυχθέντων υλικών διακρίνεται στον όγκο που καταλαμβάνει ο σωρός τους μετά την ανατίναξη, καθώς και στον αρχικό όγκο (in situ) που αυτά είχαν πριν αποχωριστούν από το μητρικό πέτρωμα. Προφανώς ο όγκος του σωρού εμφανίζεται πάντα αυξημένος λόγω της διόγκωσης από την τυχαία τοποθέτηση των τεμαχίων πετρώματος. Η διόγκωση αυτή ποσοτικοποιείται με το συντελεστή επιπλήσματος που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου μετά την ανατίναξη προς τον in situ όγκο. Με τη συμβατική μέθοδο υπολογισμού, ο προσδιορισμός του in situ όγκου που πρόκειται να εξορυχθεί προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$Vis = (s \cdot b \cdot H) \cdot n$$

Όπου s η απόσταση των διατρημάτων μεταξύ τους, b το φορτίο, H το ύψος της βαθμίδας και n ο αριθμός των διατρημάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η απόσταση μεταξύ των διατρημάτων δεν είναι σταθερή καθώς τα διατρήματα 1-2-3 απέχουν 3m μεταξύ τους ενώ τα διατρήματα 3-4-5 απέχουν 4,5m. Συνεπώς αν θεωρηθεί μέση απόσταση 3,75m ο όγκος που θα εξορυχθεί θα είναι 2062,5m³.

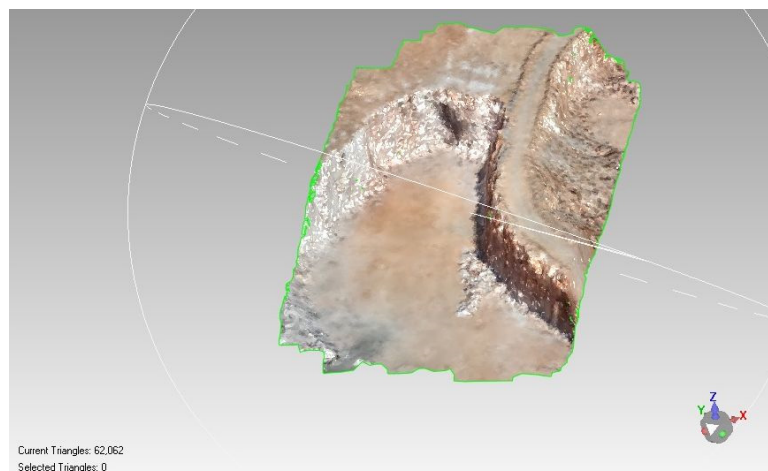
Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση και το φωτογραμμετρικό μοντέλο της πρώτης αποτύπωσης, μπορεί να υπολογιστεί ο in situ όγκος με μεγαλύτερη ακρίβεια, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές αποκλίσεις τις επιφάνειες του μετώπου. Για το σκοπό αυτό, γίνεται χρήση του προγράμματος Global Mapper και διενεργείται τομή που διέρχεται από το κέντρο της σειράς των διατρημάτων (θεωρείται μήκος σειράς 18,75m). Στη συνέχεια με το εργαλείο “Cut-and-Fill Volumes” γίνεται αυτόματη σάρωση της επιφάνειας εκατέρωθεν της τομής για απόσταση 9,375m, κατά την οποία θεωρούνται τομές πολύ μικρού πάχους των οποίων ο όγκος προκύπτει ως το γινόμενο αυτού του πάχους με το εμβαδό του προφίλ της τρέχουσας τομής.



Ο όγκος υπολογίζεται πάνω από την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή του προφίλ. Ο όγκος που αντιστοιχεί στο πράσινο εμβαδό πρέπει να αφαιρεθεί

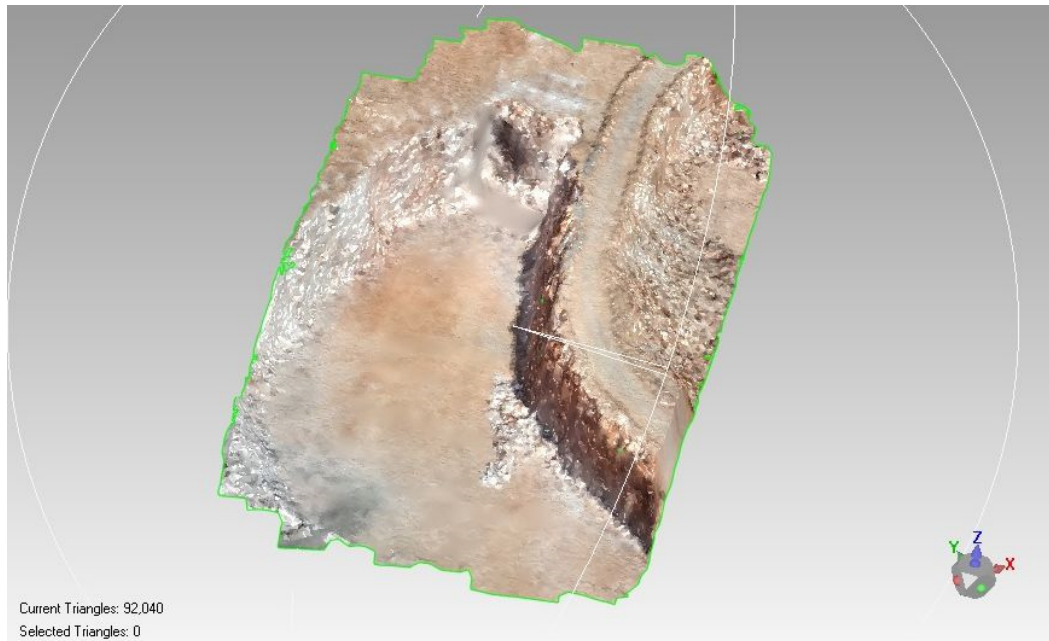
Το εμβαδό αυτό προσδιορίζεται από το γινόμενο του μήκους της τομής που αντιστοιχεί σε επιφάνεια στερεού με το ύψος που οριοθετείται από το δάπεδο της βαθμίδας μέχρι την οροφή της. Ο συνολικός όγκος που υπολογίζεται δεν είναι ο τελικός καθώς κατά την παραπάνω σάρωση λαμβάνεται υπόψη και ο όγκος πίσω από κάθε διάτρημα, που πρέπει να αφαιρεθεί. Με μια καλή προσέγγιση ο όγκος αυτός θεωρείται σταθερός και υπολογίζεται εύκολα, καθώς η μόνη μεταβολή που υπεισέρχεται αφορά στη μεταβολή του ύψους της βαθμίδας κατά το μήκος της σειράς των διατρημάτων. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο υπολογιζόμενος από το πρόγραμμα όγκος είναι 3484m^3 ενώ ο όγκος που πρέπει να αφαιρεθεί 1181m^3 με αποτέλεσμα ο in situ όγκος να αποτιμάται με τη χρήση αυτής της μεθόδου στα 2303m^3 (Διαφορά $2303 - 2062,5 = 240,5\text{m}^3$ ή 11.66%)

Η αμιγώς φωτογραμμετρική μέθοδος υπολογισμού των όγκων είναι απλούστερη και ακριβέστερη, καθώς βασίζεται στη σύγκριση των επιφανειών πριν και μετά τη μεταβολή. Στην προκειμένη περίπτωση η επιφάνεια μετά τη μεταβολή αντιστοιχεί στο μοντέλο που θα προέκυπτε με τη φωτογραμμετρική αποτύπωση της περιοχής μετά την ανατίναξη και μετά την απομάκρυνση του σωρού του εξορυχθέντος πετρώματος. Η εισαγωγή των δυο επιφανειών σε κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας, γίνεται με πλήρη στοιχεία απόλυτου προσανατολισμού (κλίμακα, θέση, στροφή στο χώρο), με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαίο το χειροκίνητο συνταίριασμα τους.

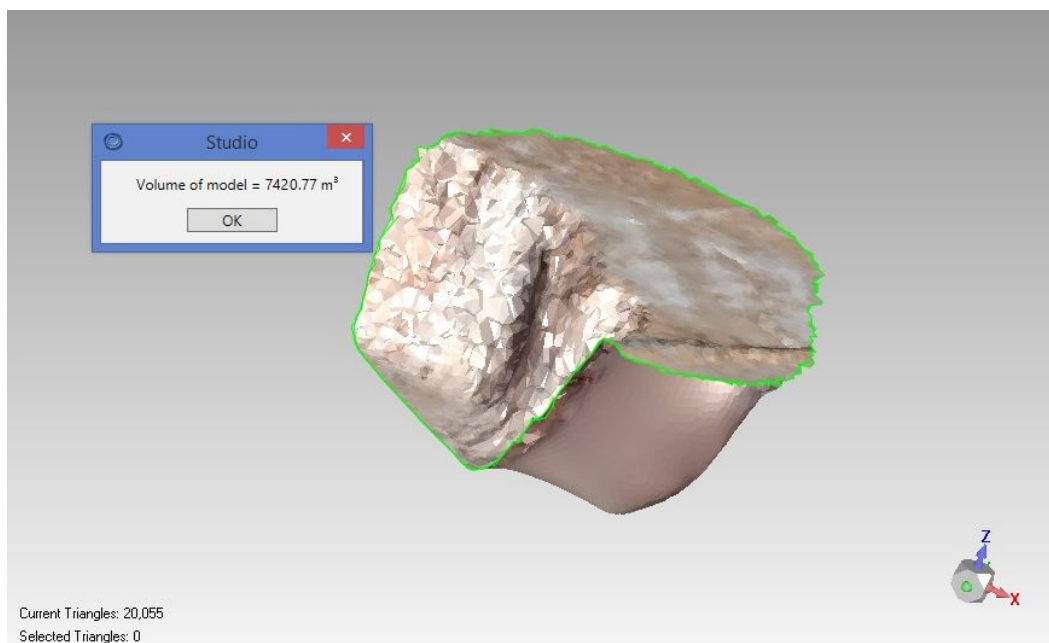


Εισαγωγή της επιφάνειας πριν την ανατίναξη στο πρόγραμμα GeoMagic Studio

Με χρήση κατάλληλων εργαλείων σύγκρισης (boolean intersection), αφαιρούνται τα κοινά στοιχεία των δυο επιφανειών, αφήνοντας ουσιαστικά ένα στερεό που οριοθετείται από τις επιφάνειες πριν και μετά την ανατίναξη του οποίου ο όγκος αντιστοιχεί στον in situ όγκο του εξορυχθέντος υλικού.



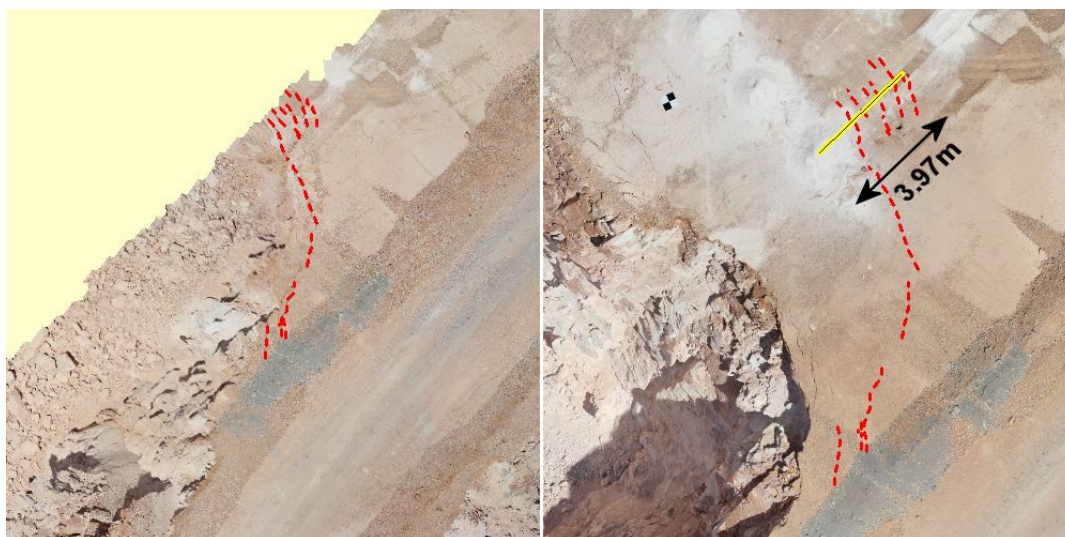
Εισαγωγή πλασματικού DTM μετά την ανατίναξη και απομάκρυνση του σωρού



Αφαίρεση των κοινών στοιχείων και υπολογισμός του όγκου του στερεού

Με όμοιο τρόπο, θα μπορούσε να προσδιοριστεί ο όγκος του σωρού και κατ' επέκταση ο συντελεστής επιπλήσματος σε περίπτωση που ήταν πλήρης η φωτογραμμετρική αποτύπωση από τη δεύτερη πτήση.

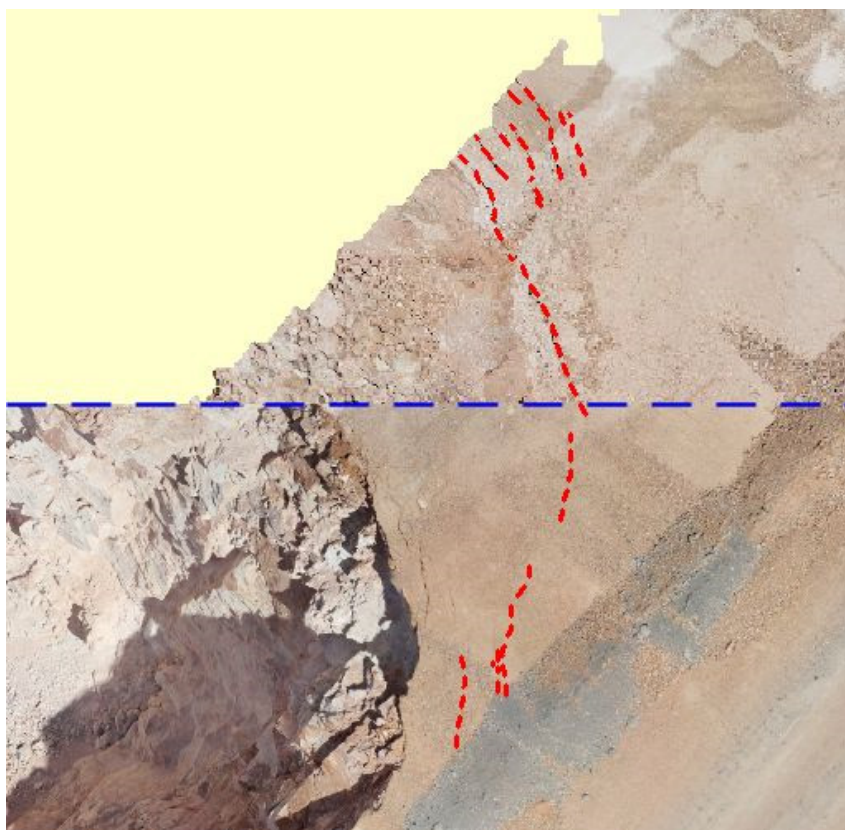
Γεωμετρικές Μεταβολές: Η εκτίμηση οποιωνδήποτε γεωμετρικών μεταβολών μετά την ανατίναξη, όπως η μεταβολή της κλίσης του μετώπου ή η εμφάνιση υβώματος στο πόδι της βαθμίδας, θα ήταν απόλυτα εφικτές με την εξέταση του μοντέλου που θα προέκυπτε από την τρίτη πτήση, δηλαδή την αποτύπωση της περιοχής μετά την ανατίναξη και την απομάκρυνση του σωρού του εξορυχθέντος πετρώματος. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λόγω της ενσωμάτωσης δεδομένων γεωαναφοράς στα μοντέλα, είναι εφικτή η διενέργεια μετρήσεων και συγκρίσεων σε αυτά με τη βοήθεια των κατάλληλων εργαλείων που ενσωματώνουν τα προγράμματα επεξεργασίας. Στην προκειμένη περίπτωση, το ημιτελές μοντέλο που προέκυψε από τη διενέργεια της δεύτερης πτήσης, επιτρέπει σε πολύ περιορισμένη έκταση τον εντοπισμό backbreaks στην οροφή της βαθμίδας και προσδιορισμό της έκτασής τους.



Αριστερά σήμανση των backbrakes στο 2ο μοντέλο. Δεξιά μέτρηση της απόστασής τους από το διάτρημα στο 1ο μοντέλο

Για το σκοπό αυτό εισάγονται ταυτόχρονα τα DEM των δυο μοντέλων στο πρόγραμμα Global Mapper που λόγω της γεωαναφοράς τοποθετούνται

το ένα πάνω στο άλλο σε επίπεδα (layers) με τη σωστή σχετική θέση. Αρχικά επιλέγοντας την προβολή της επιφάνειας μετά την ανατίναξη, σημαίνονται σε αυτήν οι εμφανίσεις των backbreaks. Οι σημάνσεις ομαδοποιούνται σε τρίτο ανεξάρτητο επίπεδο το οποίο προβάλλεται πάνω από τις δυο επιφάνειες, οπότε πλέον είναι δυνατή η εμφάνιση των backbreaks στην πρώτη επιφάνεια και η μέτρηση της απόστασης τους από το διάτρημα.



Η εναλλαγή προβολής των επιφανειών των μοντέλων

Κατανομή της κοκκομετρίας: Βασικό μειονέκτημα των υπαρχόντων λογισμικών υπολογισμού της κοκκομετρίας είναι ότι η αποτύπωση και η εκτίμηση της κοκκομετρικής κατανομής του τρισδιάστατου σωρού που δημιουργούν τα τεμάχια του θραυσμένου πετρώματος, γίνεται μέσω δισδιάστατων φωτογραφιών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ουσιαστική κατάργηση της έννοιας της προοπτικής, καθώς η ταξινόμηση των τεμαχίων γίνεται βάση ενιαίας κλίμακας στις εικόνες ή στην καλύτερη περίπτωση με χρήση τεχνασμάτων για τη μερική διόρθωση αυτής της

θεώρησης σε εικόνες με έντονη προοπτική. Επίσης η απουσία αλγορίθμων συνταύτισης οδηγεί στη λήψη σημαντικών αποκλίσεων στα αποτελέσματα της ταξινόμησης ανάλογα με τις συνθήκες λήψης, καθώς το τεμάχιο ταξινομείται με βάση την κατάτμηση στις δυο διαστάσεις και όχι σαν οντότητα στον τρισδιάστατο χώρο. Είναι επομένως φανερό πως για να γίνει ουσιαστική χρήση των πλεονεκτημάτων που μπορεί να επιφέρει η χρήση της φωτογραμμετρίας στην κοκκομετρική κατανομή, απαιτείται και διαφορετική προσέγγιση από το λογισμικό υπολογισμού (τρειςδιάστατη κατάτμηση, τεχνικές SFM στον τρισδιάστατο χώρο). Στην παρούσα φάση, η χρήση της φωτογραμμετρίας μπορεί να συνδράμει στην βελτίωση της συμβατικής δυσδιάστατης διαδικασίας εκτίμησης της κοκκομετρίας:

- με την δυνατότητα αποκατάστασης της κλίμακας σε κάθε σημείο του πλάνου
- με τη δυνατότητα λήψης και επιλογής «με μία κίνηση» εκείνων των πλάνων που διαθέτουν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε η ανάλυσή τους να δώσει αξιόπιστες μετρήσεις.

4.7 Συμπεράσματα

Παρόλο που ο προσδιορισμός των ζητούμενων στοιχείων δεν ήταν εφικτός στο σύνολό του λόγω τεχνικών προβλημάτων (πτώση του UAV κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πτήσης), το όλο εγχείρημα καταδεικνύει πως η εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων με χρήση UAV στο μεταλλευτικό χώρο μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο αποτίμησης και σχεδιασμού με πολύ μικρό κόστος. Μέχρι πριν λίγα χρόνια η εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων στη μεταλλευτική βιομηχανία, περιοριζόταν στις συμβατικές εναέριες αποτυπώσεις, αποκλειστικά σε περιπτώσεις που το οικονομικό μέγεθος των εκμεταλλεύσεων επέτρεπε κάτι τέτοιο. Ακόμη και έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων φάνταζε σαν περιττή πολυτέλεια καθώς ο λόγος ανταποδοτικότητας προς το κόστος ήταν πολύ μικρός με αποτέλεσμα την αποκλειστική υιοθέτηση συμβατικών τοπογραφικών μεθόδων με τα γνωστά μειονεκτήματα: Επικίνδυνες και χρονοβόρες εργασίες πεδίου με

σημαντικές αποκλίσεις. Με την έλευση της ψηφιακής φωτογραμμετρίας, μέθοδοι όπως το Dense Image Mapping επέτρεψαν την αντικατάσταση ακριβών μετρητικών μηχανών εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού, με φθηνές ερασιτεχνικές φωτογραφικές μηχανές και λογισμικό με αυτοματοποιημένα στάδια επεξεργασίας, κάνοντας τη φωτογραμμετρία προσιτή για πλήθος εφαρμογών. Τα UAV αποτέλεσαν ουσιαστικά το εργαλείο εφαρμογής ψηφιακών φωτογραμμετρικών μεθόδων σε περιπτώσεις που λόγω ειδικών συνθηκών ή χαρακτηριστικών (επικινδυνότητα, αποδοτικότητα, κόστος) η επίγεια εφαρμογή τους θα ήταν ανέφικτη. Μια από αυτές τις περιπτώσεις είναι η μεταλλευτική βιομηχανία που τόσο η ιδιαιτερότητα των επιφανειών (ανάγλυφο, υφή, έκταση), όσο και η ανάγκη συχνής διενέργειας αποτυπώσεων σε μεγάλο εύρος κλιμάκων (πτήσεις χαμηλού υψομέτρου και κοντινού πτητικού προφίλ), αποτελούν παράγοντες που καλύπτονται ιδανικά από την εναέρια ψηφιακή φωτογραμμετρία με χρήση UAV. Οι μέχρι τώρα εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες, απέδειξαν πως η ενσωμάτωση του νέου αυτού εργαλείου στην παραγωγική διαδικασία βελτίωσε το κόστος και την αποδοτικότητα των εργασιών αλλά και τις συνθήκες εργασίας μερίδας του προσωπικού. Είναι λοιπόν προφανές πως ειδικά για τη μεταλλευτική βιομηχανία, η φωτογραμμετρία με UAV «ήρθε για να μείνει».

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

5.1 Εκτίμηση Σφάλματος χωρίς τη χρήση Φωτοσταθερών

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, τρέχον αντικείμενο έρευνας στο χώρο του “UAV Photogrammetry”, αποτελεί η χρήση στοιχείων εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων κατευθείαν από τις μονάδες GPS/IMU, περιορίζοντας ή εξαλείφοντας εντελώς την ανάγκη τοποθέτησης φωτοσταθερών σημείων στο έδαφος. Η χρήση φωτοσταθερών μπορεί να αποτελέσει αποτρεπτικό παράγοντα σε περιπτώσεις όπως η μεταλλευτική βιομηχανία, που η τοποθέτηση και μέτρησή τους ιδιαίτερα σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, ενδέχεται να δημιουργήσει σοβαρή όχληση στην παραγωγική διαδικασία. Γι’ αυτό το λόγο η τεχνολογία των τοπογραφικών UAV προσανατολίζεται στη χρήση μονάδων δορυφορικού εντοπισμού υψηλής ακρίβειας (RTK) με στόχο τον περιορισμό των απαιτούμενων φωτοσταθερών. Πρέπει να σημειωθεί πως η παντελής εξάλειψη των φωτοσταθερών σημείων ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται συσκευές περιορισμένης αξιοπιστίας, εμπεριέχει κινδύνους αδυναμίας εξάλειψης συστηματικών παραμορφώσεων, των οποίων η αποτελεσματική διόρθωση κρίνεται από τη πιστότητα των δεδομένων που μετρούνται από αυτές τις συσκευές. Ωστόσο για πρόχειρες εφαρμογές αποτίμησης που δεν απαιτούνται υψηλά επίπεδα ακρίβειας και ιδιαίτερα όταν η χαμηλή πιστότητα πληροφορίας ενισχύεται με εξελιγμένες μαθηματικές τεχνικές, ενδέχεται η χρήση μη συμβατικών μεθόδων να μπορεί να αποφέρει χρήσιμα αποτελέσματα.

Το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου της δέσμης που βρίσκει εφαρμογή στον αεροτριγωνισμό είναι η συνθήκη συγγραμμικότητας η οποία αν γενικευτεί με διάκριση των ομάδων παραμέτρων, προκύπτει η σχέση:

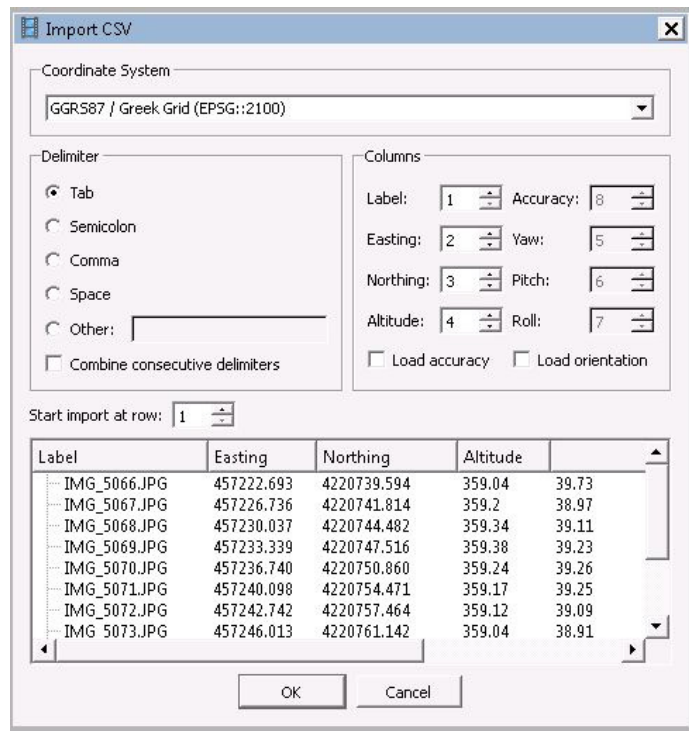
$$\begin{array}{ccc}
 x' = F_x(\{x_0, y_0, c\}, \{X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \varphi', \kappa'\}, \{X, Y, Z\}_{\text{ΑΓΝ}}) & & \\
 y' = F_y(\{x_0, y_0, c\}, \{X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \varphi', \kappa'\}, \{X, Y, Z\}_{\text{ΑΓΝ}}) & & \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 \mathbf{1} & \mathbf{2'} & \mathbf{3} \\
 \\
 x'' = F_x(\{x_0, y_0, c\}, \{X''_0, Y''_0, Z''_0, \omega'', \varphi'', \kappa''\}, \{X, Y, Z\}_{\text{ΑΓΝ}}) & & \\
 y'' = F_y(\{x_0, y_0, c\}, \{X''_0, Y''_0, Z''_0, \omega'', \varphi'', \kappa''\}, \{X, Y, Z\}_{\text{ΑΓΝ}}) & & \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 \mathbf{1} & \mathbf{2''} & \mathbf{3}
 \end{array}$$

..όπου 1 → τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού (θεωρούνται εικόνες με το ίδιο εσωτερικό προσανατολισμό, όπως άλλωστε συμβαίνει και στην πράξη), 2' και 2'' → τα στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων που λαμβάνονται από το UAV και 3 → τα σημεία στο έδαφος με άγνωστες γεωδαιτικές συντεταγμένες (X,Y,Z). Για m σημεία κοινά στις δυο εικόνες, προκύπτουν $4m$ εξισώσεις με $3m$ αγνώστους, συνεπώς οι βαθμοί ελευθερίας είναι m με αποτέλεσμα να υπάρχει λύση με περίσσεια παρατηρήσεων. Στην περίπτωση που τα στοιχεία στροφών είναι άγνωστα, τότε απαιτούνται τουλάχιστον 6 ομόλογα σημεία, καθώς οι βαθμοί ελευθερίας θα είναι $m-6$.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται χρήση των συντεταγμένων των σημείων λήψης όπως καταγράφηκαν από τον ελεγκτή πτήσης του UAV, οι οποίες όμως δεν αποτελούν τιμές συντεταγμένων που προέκυψαν αποκλειστικά από το δέκτη GPS, αλλά ενοποιημένες κατά Kalman τιμές, βασισμένες στις εκτιμήσεις και άλλων αισθητήρων όπως το επιταχυνσιόμετρο και το βαρόμετρο (sensor fusion). Ο ελεγκτής πτήσης καταγράφει μόνο τις διορθωμένες τιμές κατά τη στιγμή της λήψης και έτσι δεν μπορεί να γίνει σύγκριση αποτελέσματος με τις μη διορθωμένες τιμές, ωστόσο σε παρόμοια εφαρμογή στο παρελθόν με χρήση της Canon SX260HS και τον ενσωματωμένο σε αυτήν δέκτη GPS, η απόκλιση που καταγράφηκε κυμάνθηκε σε πολλές δεκάδες μέτρα.

Για την εκτίμηση του σφάλματος, εισάγεται στο PhotoScan αρχείο CSV όπου κάθε σειρά, περιλαμβάνει το όνομα του αρχείου εικόνας μαζί με τη θέση λήψης και προαιρετικά τα στοιχεία του IMU για τις στρόφες. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί πως η διόρθωση που κάνει ο ελεγκτής πτήσης για το υψόμετρο, αφορά σχετικές και όχι απόλυτες τιμές, οπότε στις συντεταγμένες υψομέτρου που εισάγονται, υπολογίζεται σαν αρχικό υψόμετρο το απόλυτο που προέκυψε από τις μετρήσεις του γεωδαιτικού GPS στο σημείο απογείωσης και όχι αυτό του δέκτη του UAV.

Για τη μετατροπή των συντεταγμένων από το WGS84 στο Ελληνικό Γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ87, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή cs2cs που περιλαμβάνεται στο πακέτο της χαρτογραφικής βιβλιοθήκης proj κατάλληλης για λειτουργικά συστήματα Linux.



Εισαγωγή των θέσεων λήψης στο PhotoScan μετά τις απαραίτητες μετατροπές

Cameras	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	-0.138532	-0.130241	-0.841241
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.079768	0.039207	-0.777949
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.326790	0.420670	-0.741405
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.201003	0.299990	-0.546900
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.349507	0.602639	-0.498810
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.223894	0.131256	-0.328426
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.287923	0.569914	-0.415675
<input checked="" type="checkbox"/> IMG_52...	0.454360	0.485525	-0.639609
Total Error	0.686837	0.764886	0.912248

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)
<input type="checkbox"/> 1	-0.337452	1.899159	5.876881
<input type="checkbox"/> 2	-0.139081	1.997846	5.850938
<input type="checkbox"/> 3	-0.185439	2.137952	6.398076
<input type="checkbox"/> 4	-0.296201	2.171843	6.785932
<input type="checkbox"/> 5	-0.129537	2.107708	6.154106
<input type="checkbox"/> 6	-1.577774	1.470279	5.009636
<input type="checkbox"/> 7	-1.789439	1.745612	5.760538
<input type="checkbox"/> 8	-1.784799	1.985777	5.918880
<input type="checkbox"/> 9	-1.391615	2.193017	5.604905
Total Error			

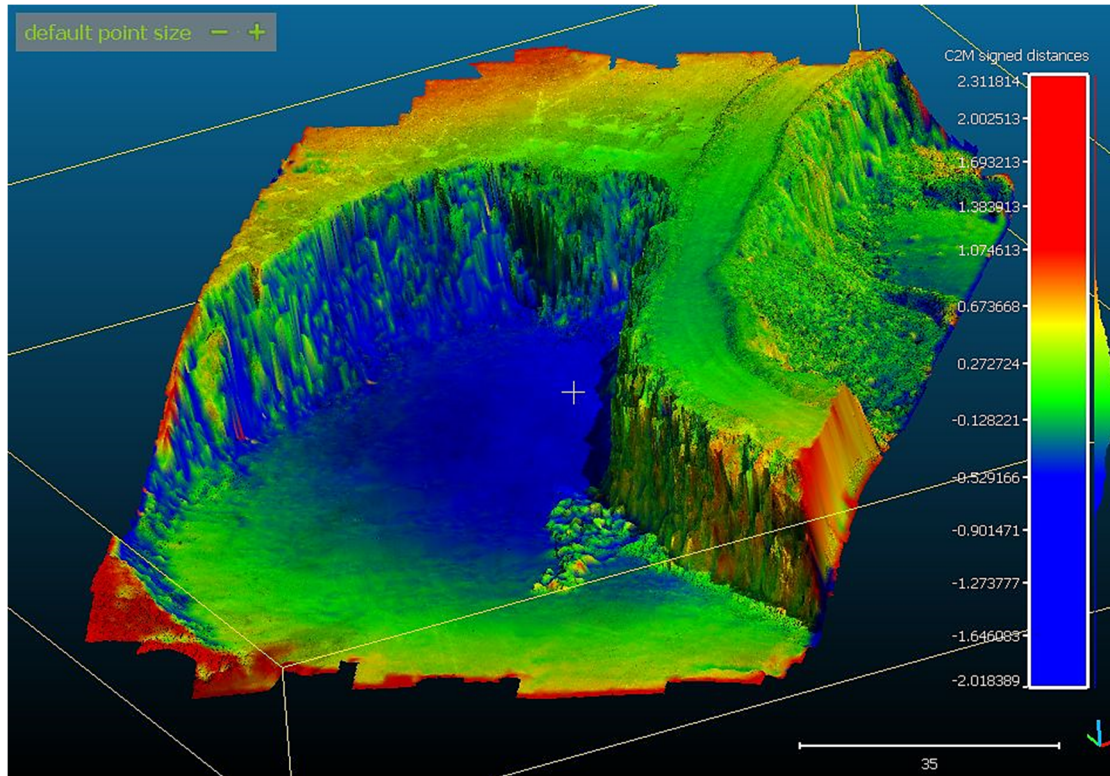
Scale Bars	Distance err (m)	Accuracy (m)	Error (m)

Χρήση των φωτοσταθερών ως σημεία ελέγχου

Μετά τη διαδικασία παραγωγής του αραιού νέφους σημείων, σημαίνονται τα φωτοσταθερά σημεία σε όλες τις εικόνες, τα οποία επειδή θα αποτελέσουν σημεία ελέγχου για την εκτίμηση του σφάλματος και όχι σημεία γνωστών συντεταγμένων, επιλέγεται να εξαιρεθούν από στη συνόρθωση. Απεναντίας σημαίνονται όλα τα σημεία λήψης καθώς αποτελούν τα μόνα γνωστά σημεία σύνδεσης με το γεωδαιτικό σύστημα. Μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης,

εξάγεται η έκθεση του προγράμματος που αναφέρει την εκτίμηση του σφάλματος, βασισμένη στις αποκλίσεις από τις συντεταγμένες των φωτοσταθερών σημείων. Συγκεκριμένα το μέσο τετραγωνικό σφάλμα κυμάνθηκε στα 6,3m με το μέσο οριζοντιογραφικό στα 2,26m και το μέσο

υψομετρικό στα 5,94cm. Αν και οι τιμές αυτές θεωρούνται ακατάλληλες για οποιαδήποτε τοπογραφική εφαρμογή, μπορούν να φανούν χρήσιμες για μια εκτίμηση όγκου αποθεμάτων στην οποία θεωρείται αποδεκτό σφάλμα της τάξης των 250m³.



Οπτικοποίηση απόκλισης των παραγόμενων DEMs σε χρωματική κλίμακα (m) με χρήση του λογισμικού CloudCompare

Agisoft PhotoScan

Processing Report
23 October 2016



Survey Data

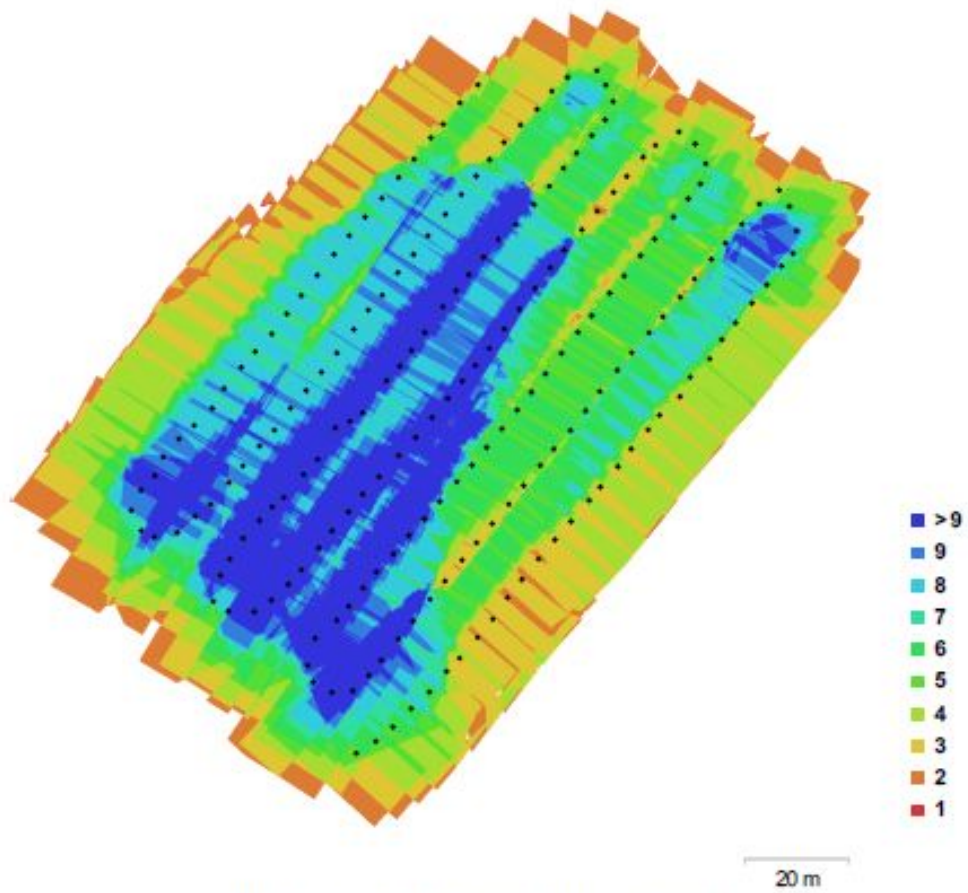


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	202	Camera stations:	202
Flying altitude:	59.1 m	Tie points:	174,237
Ground resolution:	4.93 mm/pix	Projections:	742,168
Coverage area:	1.43e+04 sq m	Reprojection error:	1.86 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon EOS 550D (50 mm)	5184 x 3456	50 mm	4.4 x 4.4 um	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

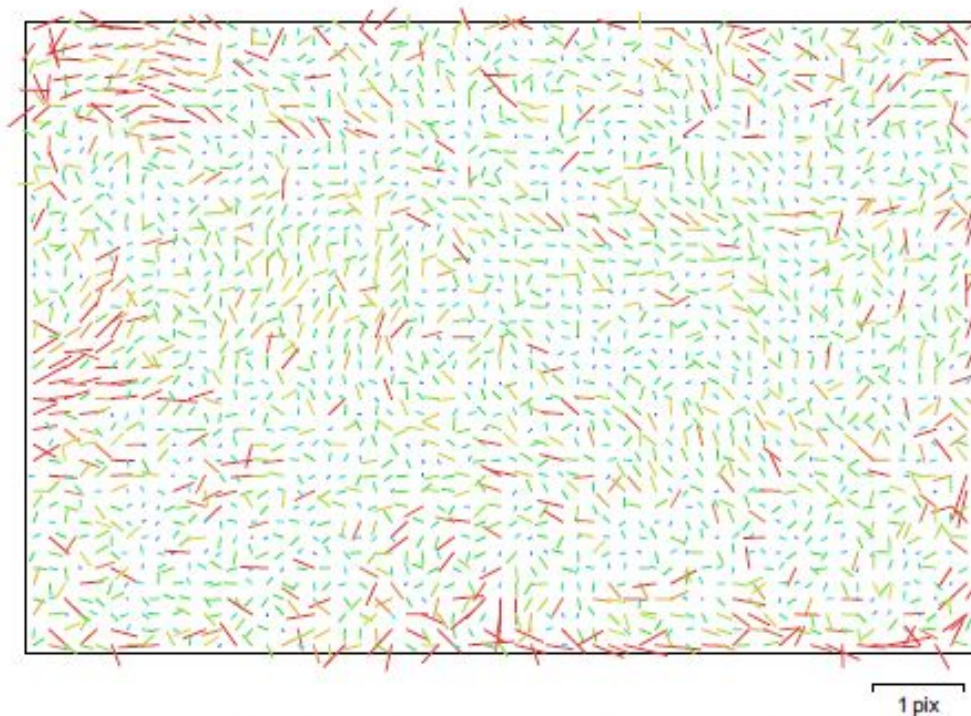


Fig. 2. Image residuals for Canon EOS 550D (50 mm).

Canon EOS 550D (50 mm)

202 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
5184 x 3456	50 mm	4.4 x 4.4 um	No
Type:	Frame	F:	11931.4
Cx:	4.70827	B1:	4.67365
Cy:	15.2767	B2:	-7.02547
K1:	-0.0797114	P1:	-0.00111089
K2:	-0.467169	P2:	-0.000307764
K3:	9.62513	P3:	0
K4:	-86.0596	P4:	0

Camera Locations

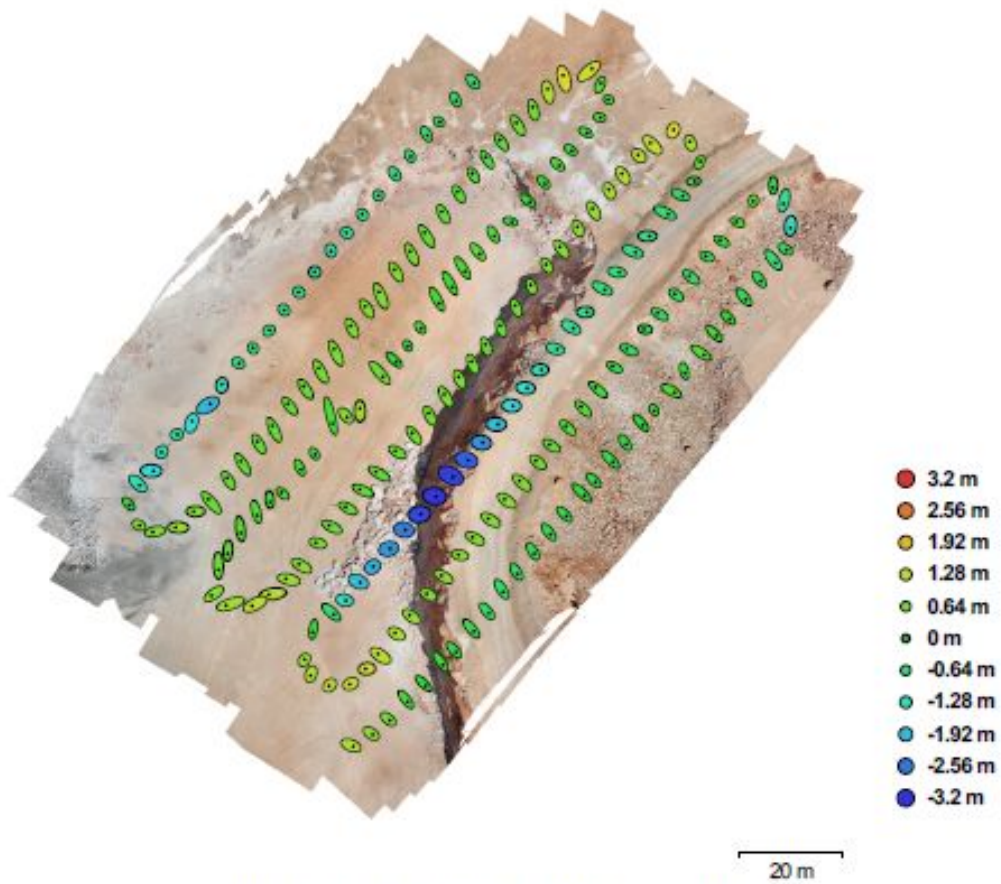


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
0.686837	0.764886	1.02801	0.912248	1.37441

Table 2. Average camera location error.

Ground Control Points

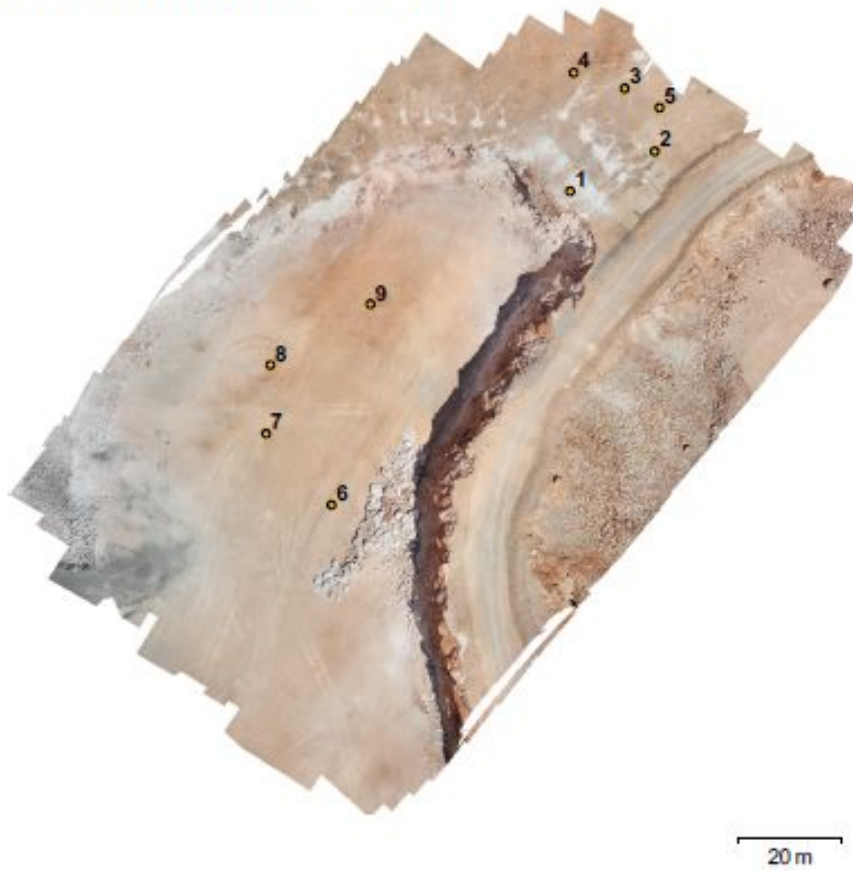


Fig. 4. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
6	2.15664	5.00964	5.45413	13	0.782
7	2.49985	5.76054	6.27957	8	0.554
3	2.14598	6.39808	6.74838	5	0.979
8	2.66998	5.91888	6.49322	7	0.513
9	2.59729	5.60491	6.17745	8	0.741
1	1.92891	5.87688	6.18534	5	0.444
4	2.19195	6.78593	7.13116	6	0.328
2	2.00268	5.85094	6.18419	4	0.861
5	2.11168	6.15411	6.50632	3	1.512
Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
Total	2.26999	5.94752	6.36599		0.747

Table 3. Check points.

Digital Elevation Model

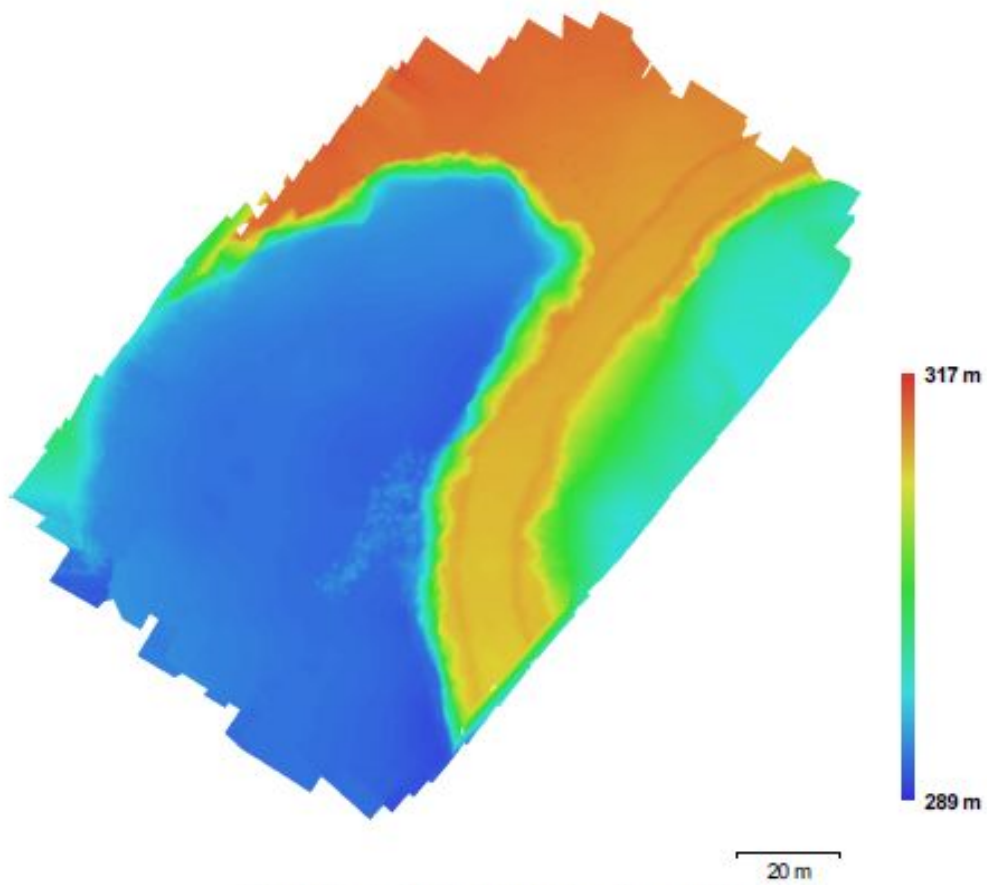


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 3.94 cm/pix
Point density: 643.181 points per sq m

Processing Parameters

General	
Cameras	202
Aligned cameras	202
Markers	9
Coordinate system	GGRS87 / Greek Grid (EPSG:2100)
Point Cloud	
Points	174,237 of 189,206
RMS reprojection error	0.372527 (1.85903 pix)
Max reprojection error	2.58883 (25.5159 pix)
Mean key point size	5.34704 pix
Effective overlap	4.48587
Alignment parameters	
Accuracy	Medium
Pair preselection	Generic
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	No
Matching time	12 minutes 29 seconds
Alignment time	3 minutes 23 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Optimization time	13 seconds
Dense Point Cloud	
Points	12,296,206
Reconstruction parameters	
Quality	Low
Depth filtering	Aggressive
Processing time	1 minutes 58 seconds
Model	
Faces	2,398,530
Vertices	1,202,491
Texture	4,096 x 4,096, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Low
Depth filtering	Aggressive
Face count	2,459,241
Processing time	1 minutes 10 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
UV mapping time	47 seconds
Blending time	1 minutes 34 seconds

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Santoro C., (2014). *How does a Quadrotor fly? A journey from physics, mathematics, control systems and computer science towards a "Controllable Flying Object"*. ARSLab, Department of Mathematics and Informatics, University of Catania, Italy
2. Πέτσα Έ., (2000). *Θεμελιώδης Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας*. Τμήμα Τοπογραφίας, ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ.
3. Γεωργόπουλος Α., (1993). *Αεροτριγωνισμοί*. Σημειώσεις για το μάθημα της Αναλυτικής Φωτογραμμετρίας. Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
4. Hamid Ebadi, (2006). *Advanced Analytical Aerial Triangulation*. Κ.Ν. ΤΟΟΣΙ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
5. Καρράς Γ. Διαφάνειες Μαθήματος «Φωτογραμμετρία ΙΙΙ». Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
6. Eisenbeiß H., (2009). *UAV Photogrammetry*. University of Technology Dresden. Zurich, Switzerland.
7. Graham L., (16th June 2016). *Drone Mapping Considerations*. GeoCue Group and AirGon LLC.
8. Graham L., (January 2015). *Tools: Volumetrics – Do it Right!*. QCoherent Software LLC. www.LP360.com.
9. Graham L., (July 2014). *Case Studies: Getting Under Control*. AirGon LLC.
10. *Drone Collected Volumetrics*. AirGon LLC. www.AirGon.com.
11. Sharlene Pillay, (June 2015). *Aerial Photogrammetry*. Surveying and Land Information Department, ΕΤΗΕΚWINI Municipality.
12. Δεληκαράογλου Δ., Φίλτρα Kalman. Εκπαιδευτικό υλικό του μαθήματος «Αναλυτικές Μέθοδοι στη Γεωπληροφορική», Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Γεωπληροφορική». Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π
13. Brance Hudzietz, Srikanth Saripalli, (September 14-16, 2011). *An Experimental Evaluation of 3D Terrain Mapping with an Autonomous Helicopter*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

- Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
14. Reed D., Rice A., (22-24 March 2016). *Whitaker Drone Stockpile Cost Savings*. Drones and Stockpiles. AGG1 annual conference in Nashville.
 15. Jeff Specht, (May/June 2011). Accurate and precise ground control is essential to successful mapping projects. *Earth Imaging Journal* (www.eijournal.com), Greeley, Colo, pp. 30-32.
 16. Wiseman T., Rorke T., (September/October 2015). Using Photogrammetry and UAVs for Pattern Optimization, Quantification and Mapping. *The Journal of Explosives Engineering*, pp. 6-15.
 17. Siebert S., Teizer J., (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System. *Automation in Construction*, 41, pp. 1-14. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/autcon.
 18. Adriaan van Natiyne, (January 2014). *Creation of precise shoal elevation models from UAV-photogrammetry*. Comparison of available (software) solutions using two surveys of the beach nourishment at the Oesterdam (The Netherlands). Delft University of Technology.
 19. Colomina I., Molina P., (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92 (2014), pp. 79–97. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/isprsjprs.
 20. Τσούλος, Λ., (2008). Ψηφιακή Χαρτογραφία. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
 21. Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α. & Στάμου, Λ., (2015α). Εκπαιδευτικό υλικό του μαθήματος «Επεξεργασία, Ανάλυση και Απόδοση Χωρικών Δεδομένων» ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
 22. Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α. & Στάμου, Λ., (2015β). Εκπαιδευτικό υλικό του μαθήματος «Ψηφιακή Χαρτογραφία» ΣΑΤΜ ΕΜΠ.
 23. Βουλγαράκης Α., (2014). Παράμετροι που επηρεάζουν τον θρυμματισμό του πετρώματος κατά την εξόρυξη του με εκρηκτικές ύλες. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μ.Μ.-Μ, Ε.Μ.Π.