



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΤΗΣΗΣ
ΜΕ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ**



ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Ανδρέας Γεωργόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015

“Wovon man nicht sprechen kann, darüber muss man schweigen.”

Ludwig Wittgenstein

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα κατ' αρχάς να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας από το ακαδημαϊκό περιβάλλον.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών για τον χρόνο που διέθεσε συζητώντας και συμβουλεύοντας με, όσο και για την ενθάρρυνση, το ενδιαφέρον και την επίβλεψη της διπλωματικής αυτής εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος να προσφέρει την εμπειρία και τις γνώσεις του.

Στη συνέχεια ευχαριστώ τον κ. Δημήτρη Δεληκαράογλου Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών για την καθοδήγηση και την άμεση και ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους, πέρα από το ακαδημαϊκό περιβάλλον, βοήθησαν και αυτοί με τον δικό τους τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου, οι οποίοι υπήρξαν πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα και στους οποίους οφείλω όλη την διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Πλατφορμών (ΜΕΕΠ), είναι ένα διφορούμενο ζήτημα που αποτελείται από ευρύ φάσμα θεμάτων, που περιλαμβάνει την τεχνολογία, την προστασία της ιδιωτικής ζωής, την ασφάλεια και τις ρυθμιστικές διατάξεις, ακόμα και την ειρήνη και τον πόλεμο. Η σύγχρονη Φωτογραμμετρία έχει αναγνωρίσει τις δυνατότητες των ΜΕΕΠ εδώ και περισσότερο από 30 χρόνια. Κατά τα τελευταία πέντε όμως χρόνια έχει καταφέρει να αναπτύξει την τεχνολογία για να τις αξιοποιήσει και να παράγει προϊόντα αρκετά καλής ακρίβειας, ώστε ο συνδυασμός αυτός να αποτελέσει πρόκληση για τις παραδοσιακές μεθόδους συλλογής και επεξεργασίας Φωτογραμμετρικών δεδομένων.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι, αφού γίνει μια συνοπτική ανάλυση του υποβάθρου και του ρυθμιστικού καθεστώτος που σχετίζεται με τις ΜΕΕΠ, να εξετάσει τις πρόσφατες εξελίξεις που αφορούν στην αξιοποίηση των συστημάτων αυτών σε Φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, καλύπτει σε θεωρητικό επίπεδο θέματα που αφορούν στην τεχνολογία αιχμής (συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων πλοήγησης, προσανατολισμού και αισθητήρων συλλογής Φωτογραμμετρικών δεδομένων, που η προσαρμογή τους στις ΜΕΕΠ έχει ή πρόκειται αν επιτευχθεί), την αυτόματη και χειροκίνητη πλοήγηση καθώς και τον προγραμματισμό λήψης εικόνων, την επεξεργασία και τέλος την άμεση γεωαναφορά φωτογραφικών δεδομένων συλλεχθέντων από ΜΕΕΠ. Προσθέτως, γίνεται αναφορά σε περιπτώσεις εφαρμογής των ΜΕΕΠ και ειδικότερα για την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς.

ABSTRACT

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) is an ambiguous topic comprising a diverse array of aspects including technology, privacy rights, safety and regulations, and even peace and war. Modern Photogrammetry has identified the potential of UAV more than thirty years ago. Yet, only in the last five years, did Modern Photogrammetry achieve the required development in technology to embrace UAV systems and generate products of sufficiently good precision, in order to challenge the traditional acquisition and processing methods.

The purpose of the work presented in this diploma thesis, is to elaborate on recent evolution of the use of UAV systems in the field of Photogrammetry, after briefly discussing the relevant background and regulatory status. In particular, it covers theoretical issues on state-of-the-art (including navigation and orientation sensors and Photogrammetric data collection sensors, of whom the integration with UAV systems has been achieved or is achievable), automatic and manual navigation, image planning and processing and also direct georeferencing of UAS-sourced images. Additionally, reference is made in cases where UAV are used and especially for cultural heritage documentation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1. Σκοπός της Εργασίας.....	10
1.2. UAV Φωτογραμμετρία.....	11
1.3. Χαρακτηριστικά των Σύγχρονων UAV.....	12
1.3.1. Πλεονεκτήματα των σύγχρονων UAV.....	12
1.3.2. Μειονεκτήματα και περιορισμοί στην χρήση των UAV.....	13
1.3.3. Τύποι σύγχρονων UAV.....	14
1.4. Νομοθεσία	18
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	20
2.1. Τεκμηρίωση Πολιτιστικής Κληρονομιάς.....	21
2.1.1. Περίπτωση μελέτης στην περιοχή Aquileia της Ιταλίας.....	23
2.1.2. Περίπτωση μελέτης στην αρχαιολογική περιοχή Veii της Ιταλίας.....	25
2.1.3. Περίπτωση μελέτης στην αρχαιολογική περιοχή Raestum της Ιταλίας.....	27
2.1.4. Περίπτωση μελέτης στην περιοχή Mantua της Ιταλίας.....	30
3. ΦΟΡΤΙΑ ΓΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ UAV.....	34
3.1. Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS).....	34
3.2. Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης (INS).....	37
3.2.1. Γυροσκόπια	39
3.2.2. Γραμμικά επιταχυνσιόμετρα.....	40
3.2.3. Σφάλματα INS.....	42
3.3. Υβριδικά Συστήματα Πλοήγησης (HNS)	42
3.4. Αισθητήρες για Φωτογραμμετρία και Τηλεπισκόπηση	44
3.4.1. Φωτομηχανές ορατού φάσματος.....	45
3.4.2. Πολυφασματικές φωτομηχανές.....	47
3.4.3. Υπερφασματικές φωτομηχανές.....	48
3.4.4. Θερμικές φωτομηχανές.....	50

3.4.5.	LiDAR.....	53
3.4.6.	SAR.....	58
3.4.7.	Βοηθητικός εξοπλισμός.....	64
4.	ΠΛΟΗΓΗΣΗ	67
4.1.	Βασικά Στοιχεία Αεροδυναμικής των UAV.....	67
4.1.1.	Το σύστημα αναφοράς του εναέριου οχήματος.....	67
4.1.2.	Γωνίες Euler	68
4.1.3.	Η σειρά στροφών Z-Y-X.....	69
4.1.4.	Πραγματικές γωνίες πτήσης.....	73
4.1.5.	Αεροδυναμική των σταθερών πτερυγίων	74
4.1.6.	Αεροδυναμική των πολλαπλών στροφείων	75
4.2.	Προγραμματισμός Φωτογραμμετρικής Πτήσης.....	77
4.2.1.	Παράμετροι πτήσης και σχέσεις υπολογισμού τους	77
4.2.2.	Ανάλυση των παραμέτρων πτήσης και σχετικές ρυθμίσεις.....	80
4.2.3.	Μετρήσεις φωτοσταθερών σημείων.....	81
4.3.	Έλεγχοι και Ρυθμίσεις πριν την Πτήση	82
4.4.	Αυτόματη Πτήση.....	85
4.4.1.	Συστήματα αυτόματου πιλότου	85
4.4.2.	Επίγειοι σταθμοί ελέγχου	88
4.4.3.	Δικλείδες ασφαλείας.....	98
4.5.	Χειροκίνητη Πτήση.....	99
4.5.1.	Τηλεχειριστήρια.....	99
4.5.2.	Βασικοί χειρισμοί	100
4.5.3.	Αντιμετώπιση των καιρικών συνθηκών	102
4.5.4.	Προληπτικά μέτρα και δικλείδες ασφαλείας.....	103
5.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ UAV	104
5.1.	Προσανατολισμός Εικόνων και Βαθμονόμηση Μηχανής.....	104
5.2.	Ανακατασκευή Επιφανειών	108
6.	ΑΜΕΣΗ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ	109
6.1.	Μαθηματικό Μοντέλο	110
6.2.	Ενοποιημένα Συστήματα GPS/INS.....	112
6.2.1.	Φίλτρο Kalman.....	113

6.2.2.	Σφάλματα ενοποίησης.....	115
6.2.3.	Αρχικοποίηση INS.....	117
6.2.4.	Βαθμονόμηση.....	119
6.3.	Ακρίβεια Άμεσης Γεωαναφοράς.....	119
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	121
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'.....	123
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	1244

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: συλλεχθείσες εικόνες και μέση ανάλυση στο έδαφος, αρχαιολογικός χώρος στο Raestum της Ιταλίας.....	28
Πίνακας 3.1: εμπορικά HMU και HNS για πλοήγηση μη επανδρωμένων οχημάτων.....	44
Πίνακας 3.2: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές μηχανές ορατού φάσματος.....	46
Πίνακας 3.3: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές πολυφασματικές φωτομηχανές για UAV.....	47
Πίνακας 3.4: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές υπερφασματικές φωτομηχανές για UAV.....	49
Πίνακας 3.5: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές θερμικές μηχανές για UAV.....	52
Πίνακας 3.6: κοινοί και/ή αντιπροσωπευτικοί σαρωτές laser.....	55
Πίνακας 3.7: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές συσκευές SAR για UAV.....	63
Πίνακας 4.1: οι ακολουθίες των στροφών Euler.....	68
Πίνακας 4.2: παράμετροι πτήσης για τον προγραμματισμό λήψης εικόνων με UAV.....	79
Πίνακας 4.3: παραδείγματα συστημάτων αυτόματου πιλότου.....	85
Πίνακας 6.1: ακρίβειες άμεσης γεωαναφοράς που μπορούν να επιτευχθούν με σύγχρονους φωτογραφικούς δέκτες και συστήματα πλοήγησης.....	120
Πίνακας A.1: παραδείγματα κοινών UAV για Φωτογραμμετρικές εφαρμογές.....	123

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: σχέδιο της λήψης εικόνων από UAV. Με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύονται οι εικόνες του μπροστινού μέρους του καμπαναριού, ενώ με κόκκινο του στρογγυλής κάτοψης ναού. Δεξιά το αποτέλεσμα του προσανατολισμού των φωτογραφιών.....	31
Σχήμα 3.1: σύστημα δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη γη.....	35
Σχήμα 3.2: οι διαδρομές των δορυφόρων GPS, όπως μπορούν να παρατηρηθούν από το διάστημα κοιτώντας προς το Βόρειο Πόλο.....	35
Σχήμα 3.3: IMU σταθερής πλατφόρμας.....	38
Σχήμα 3.4: το φαινόμενο Sagnac.....	40
Σχήμα 3.5: περιστρεφόμενη μάζα γυροσκοπίου.....	40
Σχήμα 3.6: μηχανικό επιταχυνσιόμετρο.....	41
Σχήμα 3.7: επιταχυνσιόμετρο επιφανειακών ακουστικών κυμάτων.....	41
Σχήμα 3.8: ναδρική άποψη θεωρητικών μοτίβων σάρωσης των συσκευών LiDAR (από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά), α. ταλαντευόμενο, β. σταθεροποιημένο ταλαντευόμενο, γ. παράλληλο, δ. ελλειπτικό.....	56
Σχήμα 3.9: απεικόνιση των χαρακτηριστικών σάρωσης κατά την συλλογή από σύστημα LiDAR.	58
Σχήμα 3.10: δισδιάστατος χώρος δεδομένων SAR.....	59
Σχήμα 3.11: τεχνικές SAR εικονοληψίας.....	61
Σχήμα 3.12: η γεωμετρία του radar απεικόνισης SAR.....	62
Σχήμα 4.1: σύστημα αναφοράς του οχήματος.....	68
Σχήμα 4.2: στροφή κατά ψ	69
Σχήμα 4.3: στροφή κατά θ	69
Σχήμα 4.4: στροφή κατά ϕ	70

Σχήμα 4.5: οι στροφές του οχήματος	71
Σχήμα 4.6: 3D οπτικοποίηση yaw 30°	72
Σχήμα 4.7: 3D οπτικοποίηση pitch 30°	72
Σχήμα 4.8: 3D οπτικοποίηση roll 30°	72
Σχήμα 4.9: 2D οπτικοποίηση της γωνίας α	73
Σχήμα 4.10: 2D οπτικοποίηση της πλαγιολίσθισης	73
Σχήμα 4.11: χειρισμοί πτήσης σε ένα εναέριο όχημα σταθερών πτερυγίων	74
Σχήμα 4.12: διαφορετικές διαρρυθμίσεις στροφείων σε UAV πολλαπλών στροφείων	75
Σχήμα 4.13: διάγραμμα ελευθέρου σώματος για quadcopter	76
Σχήμα 4.14: hover, forward pitch, right yaw	76
Σχήμα 4.15: διάγραμμα ροής μίας τυπικής αυτοματοποιημένης αποστολής UAV	90
Σχήμα 4.16: παράδειγμα quadcopter rolling προς τα δεξιά και προς τα αριστερά	100
Σχήμα 4.17: παράδειγμα quadcopter pitching προς τα εμπρός και προς τα πίσω	101
Σχήμα 4.18: κίνηση του UAV σε συνθήκες ισχυρών ανέμων, α η ταχύτητα του ανέμου, β η συνισταμένη ταχύτητα (x) που εφαρμόζεται, της επιθυμητής ταχύτητας (v) και της αντίθετης από την ταχύτητα του ανέμου ($-a$), γ η επιθυμητή ταχύτητα (v) ως αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης ταχύτητας (x) και της ταχύτητας του ανέμου	102
Σχήμα 6.1: σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου της άμεσης γεωαναφοράς	111
Σχήμα 6.2: Απλοποιημένο παράδειγμα διαγράμματος ροής φιλτραρίσματος	114

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: UAV πολλαπλών στροφείων	15
Εικόνα 1.2: senseFly eBee(αριστερά), GerMAP G180(δεξιά)	16
Εικόνα 1.3: παράδειγμα απογείωσης του Trimble UX5	17
Εικόνα 2.1: η εισαγωγή των δεδομένων στην μονάδα ελέγχου, (α)χαμηλότερη πτήση και (β)υψηλότερη πτήση	24
Εικόνα 2.2: (α)ο προγραμματισμός πτήσης στην ορθοεικόνα του Quickbird, (β)οι πραγματικές τροχιές που ακολούθησε η εναέρια πλατφόρμα	24
Εικόνα 2.3: το προσανατολισμένο φωτογραμμετρικό μπλοκ	25
Εικόνα 2.4: η ορθοφωτογραφία της οικίας "dei putti danzanti"	25
Εικόνα 2.5: τα αποτελέσματα του αυτόματου τριγωνισμού για το φωτογραμμετρικό μπλοκ της περιοχής του Veii στην Ιταλία	26
Εικόνα 2.6: Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MIC-MAC για τις φωτογραφίες πάνω από το Veii, οπτικοποιημένες με σκίαση	27
Εικόνα 2.7: Παραδείγματα εικόνων που συλλέχθηκαν με το UAV στον αρχαιολογικό χώρο Paestum στην Ιταλία, α) περιμετρικά της «Βασιλικής» και β) για το σύνολο του χώρου	28
Εικόνα 2.8: Μοντέλο επιφανείας όλου του μνημειακού χώρου του Paestum	29
Εικόνα 2.9: Η γεωαναφερμένη ορθοφωτογραφία αφού υπερτέθηκε στο χάρτη της ευρύτερης περιοχής κληρονομιάς του Paestum στην Ιταλία	29
Εικόνα 2.10: Το καμπαναριού της Santa Barbara, μετά τον πρώτο σεισμό (α) και μετά τον δεύτερο (β) με την κατάρρευση του φαναριού	30
Εικόνα 2.11: (α) παράδειγμα κατακόρυφης λωρίδας λήψης, (β) μοντέλο με υφή βασισμένο	

στις εικόνες, (γ) μπροστινή ορθοεικόνα.....	32
Εικόνα 2.12: τρισδιάστατο μοντέλο του κυκλικού ναού της Santa Barbara.....	33
Εικόνα 2.13: το καμπαναριό της Santa Barbara. Δεδομένα από τον επίγειο σαρωτή, ορθοεικόνα και τελική κατακόρυφη τομή.....	33
Εικόνα 3.1: (αριστερά) το Argoee-N της SBG, και (δεξιά) το SPAN-IGM της Novatel.....	44
Εικόνα 3.2: (αριστερά) η Canon EOS 5DS τοποθετημένη στο Dji Spreading Wings S1000 Octocopter, και (κάτω) εικόνα από αέρος με την Canon EOS 5DS και φακό 28.....	46
Εικόνα 3.3: (αριστερά) η Mlni-MCA6 της Tetracam, τοποθετημένη στο md4-1000 της Microdrones, και (κάτω) πολυφασματικές απεικονίσεις από την Mlni-MCA6.....	48
Εικόνα 3.4: (πάνω αριστερά) η Hyperspectral Camera της Ricola Ltd., (πάνω δεξιά) υπερφασματικά αποτυπώματα ανακλαστικότητας και νέφη σημείων για γεωπονία ακριβείας και (κάτω) μωσαϊκά μεμονωμένων φασματικών καναλιών.....	50
Εικόνα 3.5: (αριστερά) η Thermal Vision Pro της Workswell και (δεξιά) θερμογραφία.....	53
Εικόνα 3.6: απεικόνιση από μετρήσεις του IBEO LUX.....	55
Εικόνα 3.7: πολωσιμετρική εικόνα τμήματος της Αλάσκα από το σύστημα UAVSAR.....	60
Εικόνα 3.8: εικόνα IfSAR του Glacier Bay National Park and Preserve.....	60
Εικόνα 3.9: ψευδοχρωματική εικόνα του ηφαιστείου Galeras στην Κολομβία, που συλλέχθηκε με τον UAVSAR, στις 13 Μαρτίου 2013.....	63
Εικόνα 3.10: το Zenmuse 3-axis gimbal της DJI.....	65
Εικόνα 3.11: σύστημα FPV για το Phantom 2 της DJI.....	66
Εικόνα 4.1: το interface του DJI Ground Station Software για PC.....	89
Εικόνα 4.2: το interface του DJI Ground Station Software για iPad.....	89
Εικόνα 4.3: ορισμός των waypoints στο Airware Ground Control Station με χρήση Pre-Programmed Route Templates.....	92
Εικόνα 4.4: επεξεργασία παραμέτρων των waypoints στο DJI Ground Station Software.....	93
Εικόνα 4.5: επεξεργασία παραμέτρων της αποστολής στο DJI Ground Station Software.....	93
Εικόνα 4.6: τοποθέτηση waypoints σε περιοχή με μη ομαλό υψόμετρο.....	94
Εικόνα 4.7: σχεδιασμός της αυτόματης πτήσης στο APM Mission Planner της 3D Robotics. 94	94
Εικόνα 4.8: αυτοματοποιημένη δημιουργία waypoints - προγραμματισμός πτήσης με το Photogrammetry Tool στο DJI Ground Station Software για PC.....	95
Εικόνα 4.9: Mapping Camera Automatically Triggered by APM Mission Planner.....	96
Εικόνα 4.10: παράμετροι συστήματος στο DJI A2.....	96
Εικόνα 4.11: Trimble Access field software.....	97
Εικόνα 4.12: Τα χαρακτηριστικά του WFT06X-A της WFLY.....	100
Εικόνα 5.1: μπλοκ φωτογραφιών μετά τον αυτόματο τριγωνισμό για εικόνες από UAV στο Photomod 5.3 της Racurs.....	107

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

AAT	Automatic AeroTriangulation
ALSM	Airborne Laser Swath Mapping
AT	AeroTriangulation
ATiPE	Automatic Tie Point Extraction
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CU	Control Unit
DEM	Digital Elevation Model
DGPS	Differential Global Positioning System
DiSO	Direct Sensor Orientation
DSLR	Digital Single-Lens Reflex camera
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FBM	Feature-Base Matching
FC	Flight Control
FCS	Flight Control System
FOG	Fiber Optic Gyroscope
FPA	Focal Plane Array
FPV	First-Person View
GCP	Ground Control Points
GCS	Ground Control Station
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
GSD	Ground Sampling Distance
HMU	Hybrid Measurement Unit
HNS	Hybrid Navigation System
HOS	Hybrid Orientation System
IfSAR	Interferometric Synthetic Aperture
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
InSO	Indirect Sensor Orientation
ISO	Integrated Sensor Orientation
LiDAR	Light Detection And Ranging
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MIC-MAC	Multi Images Correspondences par Méthodes Automatiques de Corrélacion
MILC	Mirrorless Interchangeable-Lens Camera
NAVSTAR	NAVigation Satellite Timing And Ranging

NC	Navigation Control
NS	Navigation System
OS	Orientation System
PaRS	Photogrammetry and Remote Sensing
PPP	Precise Point Positioning
PVA	Position Velocity Attitude
RC	Radio Control
RGB	Red Green Blue
RMS	Root Mean Square
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RPV	Remote-Person View
RTK	Real Time Kinematic
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAW	Surface Acoustic Wave
SfM	Structure from Motion
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SOP	Solid OrthoPhoto
tPVA	time Position Velocity Altitude
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VTOL	Vertical Take-Off and Landing aircraft
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός της Εργασίας

Η χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) γίνεται πλέον αρκετά κοινή στις φωτογραμμετρικές μελέτες, γεγονός που οφείλεται στα πολυάριθμα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με την παραδοσιακή εναέρια φωτογραμμετρία. Οι πρόσφατες κατακτήσεις στον τομέα της UAV Φωτογραμμετρίας και οι τάσεις αυτοματοποίησης της φωτογραμμετρικής διαδικασίας επιβάλλουν την βελτίωση της αξιοπιστίας και την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας αυτής της μεθόδου. Για την επίτευξη των ως άνω στόχων και λαμβάνοντας υπ' όψη το μεγάλο τεχνολογικό άλμα που έχει ήδη γίνει όσον αφορά την αεροναυπηγική των καθ' αυτό πλατφορμών των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων και του σχετικού φορτίου, το βάρος ρίχνεται στην βελτιστοποίηση και αυτοματοποίηση των διαδικασιών πλοήγησης και προγραμματισμού πτήσης. Η ορθολογική και οικονομική αξιοποίηση εξοπλισμού εντοπισμού και πλοήγησης αποτελεί παράγοντα καθοριστικό.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξαντλητική διερεύνηση των δυνατοτήτων πλοήγησης και προγραμματισμού πτήσης – λήψεως φωτογραφιών με μη επανδρωμένο σύστημα αεροφωτογράφισης, καθώς και του σχετικά χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, σε θεωρητικό επίπεδο. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται πληροφορίες σχετικά με τις μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες και τις σχετικές ήδη κατεκτημένες θεωρητικές γνώσεις και εμπειρία. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στις περιοχές εφαρμογής των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων, ενώ δίνεται ιδιαίτερο βάρος όσον αφορά στην συνεισφορά και τις δυνατότητες αξιοποίησης των UAV σε αρχαιολογικές εφαρμογές και στην καταγραφή της πολιτιστικής κληρονομιάς. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται εκτενώς η τεχνογνωσία (state of the art), που σχετίζεται με τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα και αφορά στα συστήματα πλοήγησης και προσανατολισμού, στους αισθητήρες για Φωτογραμμετρία, αλλά και στον σχετικό βοηθητικό εξοπλισμό. Μέσα από την ευρύτερη ανάλυση της τεχνογνωσίας που χρησιμοποιείται και ειδικότερα του εμπορικού εξοπλισμού που είναι διαθέσιμος, καθώς και των πρόσφατων επιτευγμάτων σε συστήματα που περιλαμβάνουν αισθητήρες όχι τόσο κοινούς, ακόμα, στην Φωτογραμμετρία με UAV, γίνεται αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και επισήμανση των σημερινών αδυναμιών της, που βοηθά να κατανοηθούν καλύτερα οι δυνατότητες χρήσης των UAV και η αποτελεσματικότητα του προαναφερθέντος εξοπλισμού. Ακολούθως, στο τέταρτο κεφάλαιο διερευνάται ο προγραμματισμός για την εκτέλεση φωτογραφικών αποστολών με UAV δίνοντας μεγάλη βαρύτητα στα επίγεια λογισμικά ελέγχου πτήσης, τους σταθμούς επίγειου ελέγχου αλλά και στον καθαυτό προγραμματισμό πτήσης, θέτοντας μία διαχωριστική γραμμή μεταξύ πλήρως αυτόματης και χειροκίνητης πτήσης, και εξετάζοντας τις ξεχωριστά. Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται πληροφορίες που αφορούν την αξιοποίηση των εικόνων που λαμβάνονται από UAV και αφορούν στην βαθμονόμηση μηχανών, στον προσανατολισμό των εικόνων, στην ανακατασκευή επιφανειών και στην παραγωγή εικονιστικών προϊόντων, όπως

ορθοεικόνες. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ξεχωριστή αναφορά, στην άμεση γεωαναφορά των εικόνων που λαμβάνονται από UAV με την αξιοποίηση συστημάτων GPS και INS, που συνοδεύεται από σύντομη αναφορά της μεθοδολογίας που ακολουθείται.

1.2. UAV Φωτογραμμετρία

Μη επανδρωμένες ιπτάμενες μηχανές (Unmanned Aerial Vehicles - UAV ή Remotely Piloted Aerial Systems - RPAS), ονομάζονται τα κάθε είδους μηχανοκίνητα ιπτάμενα οχήματα, που δεν φέρουν τον χειριστή, μπορούν να πετάξουν αυτόνομα ή να τηλεκατευθυνθούν, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για επιστημονικούς, ερευνητικούς και στρατιωτικούς σκοπούς, μπορεί να είναι αναλώσιμα ή ανακτήσιμα, και μπορούν να φέρουν ωφέλιμο φορτίο.

Από τις πρώτες εναέριες λήψεις φωτογραφιών με επανδρωμένο αερόστατο στο Παρίσι το 1858 από τον Nadar, μέχρι τις σύγχρονες μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες, η τεχνολογική εξέλιξη ήταν αλματώδης. Ίσως τα πιο σημαντικά ιστορικά γεγονότα αναφορικά με τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα είναι: Η εκτεταμένη χρήση αεροστάτων για αρχαιολογικές κυρίως εφαρμογές την δεκαετία 1975-1985, κάποιες συναντήσεις χρηστών τέτοιων συστημάτων την ίδια δεκαετία πρώτη χρήση UAV πολλαπλών στροφείων για φωτογραμμετρικούς σκοπούς το 1980. Για τις επόμενες δεκαετίες η χρήση αντίστοιχων συστημάτων ατόνησε για να επανέλθει στο προσκήνιο την ψηφιακή εποχή πλέον με την διδακτορική διατριβή του Eisenbeiss το 2008, ο οποίος επιχείρησε μια πιο εμπεριστατωμένη κατηγοριοποίησή τους και αξιολόγησε την χρήση τους σε διαφορετικά είδη εφαρμογών. Όσον αφορά στην ελληνική πραγματικότητα, η πρώτη αναφορά της χρησιμότητας των UAV έγινε στο πανελλήνιο Συνέδριο Τοπογράφων Μηχανικών στην Θεσσαλονίκη το 2014. Η σχετική βιβλιογραφία ακολουθεί μοιραία την εξέλιξη της τεχνογνωσίας με κάποια καθυστέρηση, καθώς οι δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και οι αναφορές σε συνέδρια, πάνω στο εν λόγω αντικείμενο αρχίζουν να αυξάνονται από το 2008 και μετά.

Η ορολογία *UAV Φωτογραμμετρία* ή *Φωτογραμμετρία με ΜΕΕΠ (Μη Επανδρωμένη Εναέρια Πλατφόρμα)*, χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, περιγράφοντας πλατφόρμες φωτογραμμετρικών μετρήσεων που λειτουργούν με τηλεχειρισμό, αυτόνομα, ημι-αυτόνομα ή τελείως χειροκίνητα. Η πλατφόρμα μπορεί να είναι εξοπλισμένη με συστήματα εντοπισμού και πλοήγησης, κλισίμετρα, διάφορους δέκτες και φωτογραμμετρικό σύστημα μέτρησης. Η πλατφόρμα ελέγχεται από χειριστήριο ή μέσω επίγειου σταθμού ελέγχου με λογισμικό ελέγχου πτήσης για την καθοδήγηση και την παρακολούθηση της πτήσης από την απογείωση ως την προσγείωση. Η UAV Φωτογραμμετρία, είναι κατά τον Eisenbeiss (2008), ένα νέο εργαλείο μετρήσεων και ανοίγει πληθώρα νέων εφαρμογών στον τομέα της εγγύς φωτογραμμετρίας, συνδυάζοντας επίγεια και εναέρια ενώ παράλληλα αποτελεί αφορμή για νέες χαμηλού κόστους εναλλακτικές εφαρμογές της φωτογραμμετρίας.

Τα UAV μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διάφορες παραμέτρους. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος, το βάρος, τη διάρκεια πτήσης, το υψόμετρο πτήσης και το εύρος κάλυψης σε τακτικά, στρατηγικά και ειδικών χρήσεων. Ανάλογα με το βάρος του φορτίου που μπορούν να μεταφέρουν σε μικρο, μικρά και μεγάλα. Ανάλογα με το υψόμετρο και το εύρος κάλυψης. Ακόμη ταξινομούνται ανάλογα με το αν είναι ελαφρύτερες ή βαρύτερες κατασκευές και με βάση την πηγή ενέργειας. Στα βαρύτερα υπάρχουν υποκατηγορίες που αφορούν στο αν η πλατφόρμα είναι εύκαμπτων πτερυγίων, σταθερών πτερυγίων ή πολλαπλών στροφείων. Τέλος μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο της γεωαναφοράς, την δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και τις απαιτήσεις της εφαρμογής ή το αν είναι ανοιχτού κώδικα είτε εμπορικά.

1.3. Χαρακτηριστικά των Σύγχρονων UAV

1.3.1. Πλεονεκτήματα των σύγχρονων UAV

Η χρησιμότητα των UAV συνίσταται κυρίως στην δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις που δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τα επανδρωμένα οχήματα. Αυτές αφορούν κύρια σε δυσπρόσιτες περιοχές. Δυσπρόσιτες μπορούν να θεωρηθούν εδώ, είτε περιοχές όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη λόγω μη ύπαρξης βατού δρόμου είτε περιοχές όπου η πρόσβαση από τον άνθρωπο συνεπάγεται κάποια επικινδυνότητα(για τον ίδιο ή για το φυσικό/ανθρωπογενές περιβάλλον). Ακόμη τα UAV είναι χρήσιμα, σε περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία, με σκοπό την λήψη εικόνων, η πραγματοποίηση πτήσεων σε χαμηλό σχετικά υψόμετρο, πολύ κοντά σε κατασκευές ή αντικείμενα. Για παράδειγμα μπορεί να γίνει χρήση UAV σε περιοχές που έχουν λάβει χώρα φυσικές καταστροφές ή πάνω/κοντά σε μνημεία παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Προσθέτως, η χρήση UAV είναι ενδεδειγμένη, όταν απαιτείται –με οικονομικό τρόπο- η λήψη συγκεκριμένων εικόνων από αποστάσεις και γωνίες λήψεις που άλλως θα ήταν δύσκολο να ληφθούν με τη χρήση φωτογραφικών ή άλλων τριπόδων ή οποιουδήποτε είδους πλατφορμών, αλλά και η διατήρηση ορισμένης πορείας κατά την διάρκεια της λήψης εικόνων με μεγάλη ακρίβεια. Με άλλα λόγια τα συστήματα αυτά είναι μία τακτική με την οποία μπορούν να αποφευχθούν επισφαλείς ή επιζήμιες καταστάσεις τόσο σχετικά με την ανθρώπινη ζωή όσο και με τα υπό μελέτη αντικείμενα, ενώ παράλληλα μπορεί να αποφευχθεί και ζημία με την έννοια του κόστους ή του χρόνου.

Τα σύγχρονα UAV υποστηρίζουν λειτουργίες μερικώς υποβοηθούμενες ή πλήρως αυτόνομες, λόγω της αξιοποίησης συστημάτων πλοήγησης και προσανατολισμού και της εγκατάστασης προγραμμάτων αυτόματου πιλότου. Την ταχεία άνοδο και την αυξανόμενη δημοφιλία τους, υποστήριξε μία σειρά θετικών τεχνολογικών εξελίξεων. Μικροηλεκτρονική, αυτόματη πλοήγηση, υψηλής χωρητικότητας μπαταρίες, μεγάλης αντοχής υλικά, ασύρματη επικοινωνία, compact ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, λογισμικό επεξεργασίας εικόνας, σμίκρυνση των συστημάτων GNSS και INS. Όλες αυτές οι καινοτομίες

ενισχύοντας η μία την άλλη πήραν τη θέση τους πάνω στις πλατφόρμες των UAV. Οι εικόνες που λαμβάνονται είναι πολύ καλής ποιότητας, απαλλαγμένες από θολούρες και θόρυβο, λόγω καλύτερης σταθεροποίησης της πλατφόρμας, έχουν ληφθεί από σωστές θέσεις λήψης και με ορθή επικάλυψη κατά μήκος και πλάτος και προσφέρονται για περαιτέρω επεξεργασία με την βοήθεια ψηφιακών φωτογραμμετρικών σταθμών καθώς και αυτοματοποιημένων προγραμμάτων. Το σημερινό φωτογραμμετρικό λογισμικό υποστηρίζει την υψηλή αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας, από τον σχεδιασμό πτήσης έως την ακριβή βαθμονόμηση των μηχανών και από τον αεροτριγωνισμό μέχρι τη δημιουργία DEMs και ορθοφωτομωσαϊκών αλλά και ψηφιακών διανυσματικών σχεδίων. Ακόμη σημαντική είναι η δυνατότητα μεταβίβασης εικόνας, βίντεο και δεδομένων προσανατολισμού σε πραγματικό χρόνο. Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω, τα σύγχρονα UAV είναι ιδανικά για φωτογραμμετρική χρήση (Colomina, Molina, 2014).

Όσον αφορά τη Φωτογραμμετρία, τα χρησιμοποιούμενα UAV, μπορούν να καλύψουν εκτάσεις από μερικά τετραγωνικά μέτρα έως αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα, με υψηλή ανάλυση εικόνας – διασφαλίζοντας παράλληλα μέγεθος εδαφοψηφίδας (GSD) από μερικά χιλιοστά, εύρος πτήσης έως ορισμένα χιλιόμετρα καθ' ύψος ενώ τα εικονιστικά προϊόντα που παράγονται από τις λήψεις αυτών μπορούν πλέον να φθάσουν και τα λίγα χιλιοστά σε ακρίβεια για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Χρησιμοποιούνται για εφαρμογές τόσο μεγάλης όσο και μικρής κλίμακας.

Το κόστος αγοράς των UAV ξεκινάει από κάποιες εκατοντάδες ευρώ και μπορεί να φτάνει τις πολλές χιλιάδες. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησής τους όμως, ειδικά για τις μικρότερες κατηγορίες είναι πολλές φορές υπό-πολλαπλάσιο σε σχέση με τα επανδρωμένα οχήματα, ενώ, επιπλέον, ένα θεμελιώδες πλεονέκτημα της χρήσης UAV είναι ότι δεν επιβαρύνονται με τους φυσιολογικούς περιορισμούς και τις οικονομικές δαπάνες των ανθρώπινων χειριστών. Για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, που οι δαπάνες για επανδρωμένα σκάφη ή ακόμη και για επίγεια συστήματα δεν μπορούν να καλυφθούν εύκολα, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπλήρωμα ή ως υποκατάστατο της επίγειας φωτογραμμετρίας σε μία συγκεκριμένη περιοχή εφαρμογών.

1.3.2. Μειονεκτήματα και περιορισμοί στην χρήση των UAV

Τα συστήματα αυτά, και ιδίως τα χαμηλού κόστους θέτουν περιορισμούς όσον αφορά στο ωφέλιμο φορτίο, δηλαδή στις διαστάσεις και το βάρος των αισθητήρων και των άλλων φερόμενων συστημάτων. Συχνά απαιτούνται περισσότερες εικόνες για την κάλυψη του ίδιου αντικειμένου με συγκρίσιμη ανάλυση. Ακόμη το βεληνεκές τους είναι περιορισμένο (Eisenbeiss 2009).

Το υψόμετρο πτήσης των UAV περιορίζεται όχι μόνο λόγω των λιγότερο ισχυρών κινητήρων που συνεπάγεται το χαμηλότερο κόστος που επιδιώκεται και τις ίδιες τους τις προδιαγραφές, αλλά και για λόγους ασφάλειας. Σε γενικές γραμμές δεν υπάρχουν επαρκείς ρυθμίσεις, θεσμοθετημένες από τις αρχές. Τα UAV χαμηλού κόστους δεν είναι εξοπλισμένα

με συσκευές επικοινωνίας με τις αρχές της εναέριας κυκλοφορίας και με συστήματα αποφυγής συγκρούσεων. Επομένως είναι αναγκασμένα να λειτουργούν μόνο εντός του οπτικού πεδίου και με την παρουσία χειριστή, για την περίπτωση που θα κριθεί απαραίτητη η υποβοηθούμενη ή πλήρως χειροκίνητη πλοήγηση για λόγους ασφαλείας. Έτσι προκύπτει το πρόβλημα της ύπαρξης καλά εκπαιδευμένου πιλότου, αν και ο κίνδυνος σύγκρουσης υπάρχει πάντα. Λύση σε αυτά τα προβλήματα καλείται να δώσει ο κλάδος του *machine learning* με διάφορους αλγόριθμους που εφαρμόζονται στα UAV ήδη σε ερευνητικό επίπεδο.

Άλλα προβλήματα που προκύπτουν κατά την χρήση των UAV είναι οι κραδασμοί που σε συνδυασμό με τις καιρικές συνθήκες μπορεί να συντελέσουν στην λήψη φωτογραφιών ακατάλληλων για φωτογραμμετρική επεξεργασία. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται εν μέρει από αυτοματοποιημένα λογισμικά επεξεργασίας κατασκευασμένα για χρήση εικόνων που έχουν ληφθεί από UAV.

1.3.3. Τύποι σύγχρονων UAV

Η ύπαρξη πολλών διαφορετικών τύπων UAV, απόρροια της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας δημιουργεί την ανάγκη αξιολόγησης και σύγκρισής τους με βάση ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως: ο τύπος και οι διαστάσεις της πλατφόρμας, η αντοχή στις καιρικές συνθήκες, οι συσκευές μετρήσεων που φέρει, ο τρόπος απογείωσης προσγείωσης και πλοήγησης, το ενσωματωμένο λογισμικό και ο επίγειος σταθμός ελέγχου.

Οι εναέριες πλατφόρμες μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες ομάδες: σταθερών πτερυγίων και πολλαπλών στροφείων. Και τα δύο είναι εύκολα φορητά, αλλά τα UAV σταθερών πτερυγίων μπορούν να παραμείνουν στον αέρα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, μπορούν να αντισταθούν σε μεγαλύτερες δυνάμεις του ανέμου και να καλύψουν μεγαλύτερες σε έκταση περιοχές ανά πτήση. Τα πολλαπλών στροφείων, είναι καλύτερα στο να ελίσσονται και χρειάζονται μικρότερο χώρο για την απογείωση και την προσγείωση.

1.3.3.1. UAV πολλαπλών στροφείων

Τα UAV πολλαπλών στροφείων είναι οχήματα στροφείων με περισσότερα από 2 στροφέια (ρότορες). Υπάρχουν πολλοί τύποι *multirotor UAV* με 3 στροφέια (*tricopter*), 4 στροφέια (*quadcopter*), 6 στροφέια (*hexacopter*), 8 στροφέια (*octocopter*), καθώς και πιο ασυνήθιστες διαρρυθμίσεις όπως 12 και 16 στροφέια. Κάθε διαρρύθμιση έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο γενικευμένος όρος «*drone*» έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τα μη επανδρωμένα πολλαπλών στροφείων οχήματα. Αυτός ο όρος όμως προκαλεί συχνά σύγχυση, διότι χρησιμοποιείται ευρέως για τα μεγάλα στρατιωτικού τύπου οχήματα, που χρησιμοποιούν σταθερά πτερύγια. Η σωστή ορολογία είναι *multirotor aircraft* ή εναέριο όχημα πολλαπλών στροφείων (Nolan, 2015).



Εικόνα 1.1: UAV πολλαπλών στροφείων(από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά), Vulcan Y6 Pro System tricopter, WALKERA QR X800 quadcopter, DJI Phantom 3 quadcopter, Vulcan LDH8 quadcopter, DJI Flame wheel hexacopter, Vulcan MANTIS HexaBeast Pro System hexacopter, Vulcan MANTIS Octo 1080 PRO octocopter (dji.com, Vulcan.com & walkera.com)

Τα UAV πολλαπλών στροφείων χρησιμοποιούνται για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές γιατί πετούν σε χαμηλότερα ύψη πτήσης. Μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι ότι χρειάζονται μικρή περιοχή απογείωσης ή προσγείωσης γιατί έχουν την δυνατότητα να κινούνται κατακόρυφα. Η σταθερότητά τους, η ικανότητά τους να αιωρούνται και να εκτελούν ελιγμούς, τα καθιστά ιδανικά για φωτογραμμετρικές εφαρμογές, λόγω της ποιότητας των δεδομένων που μπορούν να ληφθούν με αυτά.

Από την άλλη πλευρά τα οχήματα περιστρεφόμενων πτερύγων συνεπάγονται μεγαλύτερη μηχανική και ηλεκτρονική πολυπλοκότητα που μεταφράζεται, γενικά, σε πιο περίπλοκες εργασίες συντήρησης και επισκευής και περισσότερη δαπάνη χρόνου. Επιπλέον, αυτά τα είδη των συστημάτων είναι σε θέση να μεταφέρουν μικρότερο ωφέλιμο φορτίο, που αντιστοιχεί στον αριθμό, το μέγεθος και το βάρος των αισθητήρων που μπορεί να τοποθετηθούν στο UAV και ιδίως όταν πρόκειται για τις μικρότερες ή τις χαμηλότερου κόστους κατηγορίες. Τέλος, λόγω των χαμηλότερων ταχυτήτων τους και της συντομότερης πτήσης (που οφείλεται στο ότι είναι ενεργοβόρα και συνακόλουθα έχουν μικρή αυτονομία πτήσης), ο χειριστής θα απαιτήσει πολλές επιπλέον πτήσεις για να καλύψει μεγαλύτερες προς κάλυψη περιοχές, το οποίο θα οδηγήσει σε μια άλλη αύξηση στο χρόνο και το λειτουργικό κόστος.

1.3.3.2. UAV σταθερών πτερυγίων

Τα UAV σταθερών πτερυγίων διαθέτουν σταθερά φτερά, όπως τα συνηθισμένα αεροπλάνα, που έχουν μια προκαθορισμένη αεροτομή, που κάνει την πτήση δυνατή δημιουργώντας ανύψωση η οποία προκαλείται από την ταχύτητα του αέρα καθώς το UAV κινείται προς τα εμπρός. Αυτή η ταχύτητα αέρα δημιουργείται με ώθηση προς τα εμπρός συνήθως μέσω ενός έλικα που περιστρέφεται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης ή ηλεκτροκινητήρα.



Εικόνα 1.2: (αριστερά) senseFly eBee (sensefly.com),
(δεξιά) GerMAP G180 (germap.com)

Το κύριο πλεονέκτημα του UAV σταθερών πτερυγίων, είναι ότι αποτελεί μία πολύ απλούστερη κατασκευή σε σύγκριση με ένα πολλαπλών στροφείων. Η απλούστερη δομή παρέχει μια λιγότερο περίπλοκη διαδικασία συντήρησης και επισκευής επιτρέποντας έτσι στο χρήστη περισσότερο χρόνο λειτουργίας με χαμηλότερο κόστος. Πιο σημαντικό ακόμα, είναι, ότι η απλή δομή εξασφαλίζει πιο αποτελεσματική αεροδυναμική, που παρέχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης διάρκειας πτήσης σε υψηλότερες ταχύτητες, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερης έκτασης ανά πτήση.

Επίσης, αξίζει να εξεταστεί το γεγονός ότι τα UAV σταθερών πτερυγίων είναι επίσης σε θέση να φέρουν μεγαλύτερα ωφέλιμα φορτία για μεγαλύτερες αποστάσεις με λιγότερη ισχύ και επιτρέπει να μεταφέρονται ορισμένοι από τους μεγαλύτερους (πιο ακριβούς) αισθητήρες, καθώς και διατάξεις δίδυμων αισθητήρων.

Τα μόνα μειονεκτήματα σε αυτά τα συστήματα είναι η ανάγκη για ένα διάδρομο ή εκτοξευτή για την απογείωση και την προσγείωση. Δηλαδή για την απογείωσή τους και την προσγείωσή τους απαιτείται αρκετός χώρος. Επίσης, το UAV σταθερών πτερυγίων απαιτεί αέρα που κινείται πάνω από τα φτερά του και για τη δημιουργία ανύψωσης θα πρέπει να παραμείνει σε μια σταθερή κίνηση προς τα εμπρός, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να αιωρείται με τον ίδιο τρόπο που ένα UAV πολλαπλών στροφείων μπορεί. Αυτό σημαίνει ότι τα UAV σταθερών πτερυγίων δεν είναι καλή λύση για εφαρμογές που απαιτούν σταθερότητα και λήψεις από συγκεκριμένα σημεία.



Εικόνα 1.3: Παράδειγμα απογείωσης του Trimble UX5 (uas.trimble.com)

1.4. Νομοθεσία

Οι κανονισμοί για την χρήση των UAV είναι προς το παρόν ασαφείς στην Ελλάδα. Για την περαιτέρω διάδοσή τους όμως είναι απαραίτητη η αντιμετώπιση ζητημάτων σχετικών με την ασφάλεια και την ιδιωτική ζωή. Η απόφαση υπ' αριθμόν Δ2/Δ/352/17475 (ΦΕΚ Β9 2010) που τέθηκε σε ισχύ το 2010 θέτει κάποιους γενικούς κανονισμούς για την χρήση των αερομοντέλων. Ορίζει ως αερομοντέλο «μία ιπτάμενη συσκευή περιορισμένων διαστάσεων, που φέρει ή όχι προωθητικό σύστημα, που δεν έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο χρησιμοποιείται για αεραθλητισμό ή ψυχαγωγία. Τα αερομοντέλα μπορεί να έχουν τη μορφή αεροπλάνου, ανεμοπτερού, ελικόπτερου, αυτόγυρου, υδροπλάνου, αμφίβιου, αλεξίπτωτου, αερόστατου, αερόπλοιου, ή άλλης μορφής. Τα αερομοντέλα μπορεί να είναι τηλεχειριζόμενα, ελεύθερης πτήσης, ή κυκλικής πτήσης». Θέτει συγκεκριμένους περιορισμούς για τα αερομοντέλα, όπως τη μέγιστη επιφάνεια των πτερυγών, ο μέγιστος κυβισμός, η μέγιστη ώση και το μέγιστο φορτίο ανά κινητήρα. Απαγορεύει τη ρίψη οποιουδήποτε αντικειμένου κατά τη διάρκεια της πτήσης και την προσάρτηση πρόσθετου φορτίου που μπορεί να μετακινηθεί ή να αποσπαστεί από το μοντέλο. Ακόμη στην απόφαση αυτή αναφέρεται, ότι οι πτήσεις θα πρέπει να είναι περιορισμένες στον εναέριο χώρο που προσφέρεται για τον σκοπό αυτό και σε απόσταση ασφαλείας 50 μέτρων από ανθρώπους, ενώ οι απογειώσεις και προσγειώσεις θα εκτελούνται σε χώρους ελεύθερους εμποδίων. Δεν επιτρέπονται πτήσεις αερομοντέλων χωρίς άδεια:

- σε απαγορευμένες, περιορισμένες, επικίνδυνες και δεσμευμένες περιοχές όπως αυτές αναφέρονται στις πάσης φύσεως αεροναυτικές εκδόσεις της ΥΠΑ
- σε ύψος μεγαλύτερο των 122 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους
- σε απόσταση μικρότερη των 3 χιλιομέτρων από ελεγχόμενο αεροδρόμιο
- εντός πολιτικών ή στρατιωτικών αεροδρομίων
- άνωθεν, πλησίον ή εντός στρατιωτικών εγκαταστάσεων
- άνωθεν η πλησίον κατοικημένων περιοχών
- άνωθεν η πλησίον εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας
- άνωθεν η πλησίον αρχαιολογικών χώρων, εκτός αν παρέχεται σχετική άδεια από την υπεύθυνη υπηρεσία

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη απόφαση, «UAV είναι μία ιπτάμενη συσκευή που δεν μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται για επιστημονικούς, ερευνητικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς. Τα UAV δεν θεωρούνται αερομοντέλα, και τα αερομοντέλα δεν θεωρούνται UAV». Δηλαδή, ο ίδιος κανονισμός που περιορίζει την χρήση τους, τα εξαιρεί κατά κάποιον τρόπο από αυτές τις διατάξεις αφού UAV και αερομοντέλα εμπίπτουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Σε κάθε περίπτωση όμως ο χρήστης του UAV, οφείλει να είναι ενημερωμένος για τα θέματα ασφαλείας και τις ευθύνες που προκύπτουν

από αυτή την δραστηριότητα και να προσπαθεί να συμμορφώνεται στις ανωτέρω διατάξεις, καθώς έχει την πλήρη ευθύνη για:

- την εκμετάλλευση του αερομοντέλου ή UAV
- την σωστή συντήρηση του υλικού
- το σύστημα τηλεχειρισμού

Η νέα νομοθεσία του 2016 αναμένεται να καλύπτει αρκετές παραμέτρους σχετικά με την πτήση UAV στην Ελλάδα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν έχει εκδώσει κάποια οδηγία αναφορικά με τα UAV και τυχόν περιορισμούς για την χρήση τους, όμως η Ευρωπαϊκή εποπτεία για την προστασία των δεδομένων έχει εκφράσει εγγράφως -σε κείμενο χωρίς νομική ισχύ- την γνώμη της επί του θέματος. Σε αυτό το κείμενο, υπογραμμίζονται τα κοινωνικά και οικονομικά οφέλη από την χρήση των UAV, τονίζεται η ανάγκη εναρμόνισης των περί αεροπορίας σχετικής με UAV πολιτικών ασφαλείας των κρατών μελών, γίνεται αναφορά σε θέματα αστικής ευθύνης και δημόσιας ασφάλειας και επισημαίνεται ότι η διάδοση των UAV μπορεί να επιτευχθεί αν διασφαλιστεί η συμμόρφωση σε θέματα που αφορούν τα προσωπικά δεδομένα, την ιδιωτική ζωή και την ασφάλεια. Στο κείμενο αυτό όμως δεν διατυπώνονται κανόνες τεχνικής φύσεως, γίνονται μόνο παραπομπές σε άλλες οδηγίες της Ευρωπαϊκής ένωσης ή των κρατών μελών. Εν γένει, σε όσα από τα υπόλοιπα κράτη της ΕΕ έχουν εκδοθεί οδηγίες αναφορικά με τα UAV, αυτές συμβαδίζουν μεταξύ τους, αλλά και με την εγχώρια απόφαση περί αερομοντέλων. Δηλαδή, στα περισσότερα κράτη της ΕΕ απαγορεύεται η πτήση UAV εκτός οπτικού πεδίου του χειριστή ή σε ύψος μεγαλύτερο από 250-400 πόδια, σε μικρή απόσταση από ανθρώπους ή κατοικημένες περιοχές και κοντά σε στρατιωτικά αεροδρόμια ή εγκαταστάσεις.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να γίνει σύντομη αναφορά και στους κανονισμούς που ισχύουν στις ΗΠΑ για τα UAV. Η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας με σχετικό υπόμνημα καθιστά σαφές ότι η χρήση ιδιόκτητου drone για συλλογή ειδήσεων για τα μέσα ενημέρωσης ή για άλλους επαγγελματικούς σκοπούς απαιτεί άδεια από την Ομοσπονδία, ενώ η χρήση drone για ερασιτεχνικούς σκοπούς δεν απαιτεί άδεια. Ούτε στις ΗΠΑ όμως η ομοσπονδιακή εξουσία εκδίδει κανόνες τεχνικής φύσεως που να περιορίζουν την χρήση των UAV. Αυτοί οι περιορισμοί θεσμοθετούνται σε επίπεδο πολιτείας και σε κάποιες περιπτώσεις είναι πολλοί αυστηροί ενώ σε άλλες σχεδόν ανύπαρκτοι.

2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Αρχικώς η χρήση των UAV είχε συσχετισθεί με την χρήση τους για στρατιωτικούς σκοπούς. Όμως, οι τεχνολογικές εξελίξεις στους σχετικούς με τις πλατφόρμες αυτές κλάδους της αεροναυπηγικής αλλά και με τους αισθητήρες και τα συστήματα πλοήγησης που αυτά φέρουν, έχουν οδηγήσει στην ευρεία αποδοχή τους και στην χρήση τους σε πληθώρα άλλων εφαρμογών. Κατωτέρω παρατίθενται ορισμένες από τις περιπτώσεις εφαρμογής των UAV:

- Βιντεοσκόπηση για διαφημιστικούς σκοπούς, κινηματογράφηση, δημοσιογραφία, μετάδοση ραδιοτηλεοπτικών σημάτων, επικοινωνίες
- Επιστημονική έρευνα
- Τοπογραφία, φωτογραμμετρία, remote sensing, παρακολούθηση του κλίματος, χαρτογραφία, κτηματολόγιο, 3D modeling, εναέρια βαρυτημετρία
- Αρχαιολογικές εφαρμογές και τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς
- Παρακολούθηση κινδύνων και φυσικών καταστροφών (παρακολούθηση των σεισμών, παρακολούθηση της ρύπανσης)
- Γεωργία, δασοκομία, ιχθυοκαλλιέργειες και περιβάλλον (περιβαλλοντική παρακολούθηση, επιθεώρηση των δασικών εκτάσεων, αεροψεκασμοί, επιθεώρησης των καλλιεργειών και των φυτειών, υπολογισμός δεικτών βλάστησης, βελτιστοποίηση των πόρων, διαχείριση υδάτινων πόρων)
- Μεταλλευτική βιομηχανία και εξορύξεις (καταγραφή και εξερεύνηση επιφάνειας εδάφους, προσδιορισμός αφαιρούμενου όγκου και όγκου αποθεμάτων των ορυκτών)
- Μη-στρατιωτικές κυβερνητικές εφαρμογές (πολιτική προστασία, ασφάλεια συνόρων, θαλάσσια περιπολία) και υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης (εντοπισμός πυρκαγιών, πυρόσβεση, διάσωση, άμεση ανταπόκριση για την αντιμετώπιση μεγάλης έκτασης περιστατικών)
- Εφαρμογές στον τομέα της ενέργειας (εναέρια επιτήρηση των υποδομών διανομής φυσικού αερίου και πετρελαίου και των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας)
- Εφαρμογές στον τομέα των κατασκευών (μοντελοποίηση, παρακολούθηση και συντήρηση για οδικά έργα, σιδηροδρομικά δίκτυα, γέφυρες, φράγματα, κανάλια, αντιπλημμυρικά έργα)
- Μεταφορά εμπορευμάτων

2.1. Τεκμηρίωση Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Η προστασία των μνημείων της πολιτιστικής κληρονομιάς προϋποθέτει την γεωμετρική τεκμηρίωσή τους. Αυτή γίνεται συνήθως στα πλαίσια μίας ολοκληρωμένης τεκμηρίωσης, μίας σύνθετης δηλαδή διαδικασίας που απαιτεί το έργο πολλών ειδικών, καθώς εκτός από την γεωμετρική περιλαμβάνει βιβλιογραφική, ιστορική, αρχαιολογική, αρχιτεκτονική, στατική, χαρτογραφική και νομική τεκμηρίωση. Η τεκμηρίωση είναι μία ενέργεια πολύ σημαντική γιατί, ακριβώς όπως δηλώνει και ο ίδιος ο όρος, προσφέρει τα τεκμήρια ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος ενεργειών στο πλαίσιο της προστασίας μνημείων ορισμένες από τις οποίες είναι: η συντήρηση, η αποκατάσταση, η αναστήλωση, η δημιουργική προστασία, η προληπτική προστασία, η εξυγίανση, η αναβίωση, η προβολή και οργανική ένταξη στο χώρο (Καραδέδος, 2009). Σύμφωνα με την "Χάρτα της Βενετίας", η αποκατάσταση σταματάει στο σημείο που αρχίζουν να υπάρχουν υποθέσεις και πριν και μετά από οποιαδήποτε επέμβαση θα πρέπει να γίνεται ιστορική κα αρχαιολογική μελέτη, θέσεις που ενισχύουν την αναγκαιότητα της τεκμηρίωσης. Γίνεται αντιληπτό, ότι τα μη επανδρωμένα συστήματα καλούνται να διαδραματίσουν πολυσχιδή ρόλο στην γεωμετρική τεκμηρίωση, γνωρίζοντας μάλιστα πως πολλές από τις υπάρχουσες τοποθεσίες αρχαιολογικής και πολιτιστικής κληρονομιάς σε όλο τον κόσμο είναι ανεπαρκώς ή καθόλου τεκμηριωμένες (Eisenbeiss, 2009).

Σύμφωνα πάλι με την "Χάρτα της Βενετίας", η έννοια ενός ιστορικού μνημείου δεν καλύπτει μόνο το μεμονωμένο αρχιτεκτονικό έργο, αλλά καλύπτει και την αστική ή αγροτική τοποθεσία, που μαρτυρεί έναν ιδιαίτερο πολιτισμό, μια ενδεικτική εξέλιξη ή ένα ιστορικό γεγονός. Επομένως, η γεωμετρική τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς αφορά συχνά σε μεγάλης έκτασης εφαρμογές, που πρέπει να αντιμετωπισθούν με μεθόδους γρήγορες και χαμηλού κόστους, πάντα με σεβασμό προς το εκάστοτε μνημείο και τον αντίστοιχο χώρο που τα περιβάλλει (Καραδέδος, 2009). Ειδικά όσον αφορά σε ιστορικά μνημεία και σύνολα που είναι ανοιχτά στο κοινό ή/και προσελκύουν μεγάλο τουριστικό ενδιαφέρον, η ανάγκη αυτή γίνεται επιτακτική, ώστε να μην παρεμποδίζεται η ροή των τουριστών. Με τις αυτοματοποιημένες διαδικασίες απογείωσης, πλοήγησης, λήψης εικόνων, προσγείωσης και επεξεργασίας των εικόνων που είναι εφικτές με τις σύγχρονες εναέριες μη επανδρωμένες πλατφόρμες, οι διαδικασίες της γεωμετρικής τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς γίνονται οικονομικότερες από άποψη χρόνου και κόστους, ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι παραπάνω απαιτήσεις για μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Άλλωστε και οι εφαρμογές που αφορούν στην γεωμετρική τεκμηρίωση σε περιοχές αρχαιολογικών ανασκαφών, και έχουν σκοπό είτε την ανεύρεση περιοχών με πιθανή ύπαρξη αρχαιολογικών ευρημάτων, είτε στον καλύτερο συντονισμό των εργασιών μετά την ανεύρεσή τους, είτε στην αποτύπωση όλων των ενδιάμεσων φάσεων μίας ανασκαφής, είτε ακόμα την ψηφιακή ανακατασκευή μεμονωμένων ευρημάτων, καταλαμβάνουν συχνά μεγάλο χώρο. Τα μη επανδρωμένα συστήματα, μπορούν πλέον, κυρίως λόγω των αυτοματισμών που αναφέρθηκαν ανωτέρω, να συνεισφέρουν και σε αυτές τις διαδικασίες. Προσθέτως ο συνδυασμός άλλων συστημάτων εκτός από απλές φωτογραφικές μηχανές,

δηλαδή σένσορες με ευαισθησία σε ακτινοβολίες εκτός του ορατού φάσματος ή αισθητήρες για γεωφυσικές διασκοπήσεις, μπορεί να αποτελέσει ισχυρό εργαλείο με στόχο την ολοκληρωμένη ερμηνεία αρχαιολογικών θέσεων.

Ορισμένες φορές στα υπό μελέτη αντικείμενα που πρέπει να τεκμηριωθούν δεν υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης. Συχνά τα αρχαιολογικά ευρήματα και τα άλλα μνημεία της πολιτιστικής κληρονομιάς βρίσκονται σε χώρους δύσβατους ή ακόμη και σε τοποθεσίες όπου δεν μπορούν να προσεγγιστούν με κανένα τρόπο από τους αρχαιολόγους και τους αναστηλωτές ή από επανδρωμένα οχήματα. Η αδυναμία πρόσβασης όμως αυτή μπορεί να υπαγορεύεται και από άλλους λόγους, όπως κίνδυνοι λόγω αστάθειας του εδάφους ή ακόμα και κατάρρευσης του ευρύτερου χώρου ή και των ίδιων των μνημείων. Ακόμη η έλλειψη στατικής επάρκειας ορισμένων μνημείων που μπορεί να οφείλεται σε ζημιές που έχουν προκληθεί κατά το πέρασμα του χρόνου σε κάποιο ιστορικό κτήριο, μπορεί να επιτάσσει οι απαιτούμενες μελέτες να γίνουν χωρίς να υπάρξει ανθρώπινη επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο για να αποφευχθούν περαιτέρω καταστροφές μέχρις ότου υπολογιστούν οι απαραίτητες ενέργειες για την στήριξή του. Αρχιτεκτονικά και φυσικά μνημεία υπάρχει περίπτωση επίσης να ευρίσκονται σε τοποθεσίες όπου έχει λάβει χώρα κάποια ανθρωπογενής ή φυσική καταστροφή και επομένως η παρουσία του ανθρώπου μπορεί να τον θέσει σε κίνδυνο. Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις, οι αυτοματοποιημένες πτήσεις των μη επανδρωμένων εναέριων πλατφορμών μπορούν να δώσουν πλέον λύση.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα που παρέχουν τα UAV είναι η δυνατότητα πτήσης πάνω και σε κοντινή απόσταση από αρχαιολογικά ευρήματα και ιστορικά κτήρια μεγάλου ύψους, ώστε με τη λήψη εικόνων από αυτές τις πλατφόρμες, μπορούν να εξαχθούν εικονιστικά παράγωγα που δεν θα ήταν δυνατόν να εξαχθούν με άλλες μεθόδους όπως επίγεια φωτογραμμετρία, παραδοσιακή εναέρια φωτογραμμετρία ή κλασική τοπογραφία. Για παράδειγμα οι ορθοεικόνες-κατόψεις αρχαιολογικών χώρων και επίστεγνων ή όχι ιστορικών κτιρίων που είναι αρκετά οικονομικό να υλοποιηθούν με την χρήση UAV για την λήψη των απαιτούμενων εικόνων, είναι πολύ δύσκολο να υλοποιηθούν με επίγειες μεθόδους τοπογραφίας και φωτογραμμετρίας γιατί τότε απαιτείται φωτογράφιση συνήθως από κοντινά κτίρια αν αυτά υπάρχουν ή με αυτοσχέδιους μεγάλου ανοίγματος ποδιών τρίποδες ή άλλες κατασκευές ανάρτησης και ανύψωσης των μηχανών λήψης εικόνων. Ταυτόχρονα η ευελιξία των UAV, δίνει την δυνατότητα τα υπό μελέτη αντικείμενα να αναπαρίστανται με υψηλή ανάλυση και ακρίβεια, γιατί συχνά δεν είναι χρήσιμη μόνο η γεωμετρική τεκμηρίωση των ιστορικών κτηρίων ή συνόλων και η αποτύπωση των αποτελεσμάτων με την μορφή δισδιάστων σχεδίων, όσο η τρισδιάστατη ανακατασκευή τους, και μάλιστα με υφή, για επιστημονικούς ή τουριστικούς σκοπούς.

Εν κατακλείδει, τα UAV μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ψηφιοποίηση της πολιτιστικής κληρονομιάς, που προωθείται από τις διάφορες διεθνείς συμφωνίες που αφορούν στην προστασία και ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς, τους σχετικούς οργανισμούς αλλά και την ευρύτερη νέα ιστορική συνείδηση που προκύπτει από την επιστημονική απασχόληση με το παρελθόν και σκοπεύει στο να διασφαλιστεί η εύκολη πρόσβαση στην πληροφορία. Τα UAV, είναι δηλαδή ένα σημαντικό εργαλείο στην

αναπαράσταση και τεκμηρίωση του υλικού πολιτιστικού αποθέματος με την ψηφιακή συλλογή δεδομένων που με την κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να δώσουν σημαντικά τεκμήρια, ικανά να διασφαλίσουν ώστε κάθε ενδεχόμενη επέμβαση σε ένα μνημείο να είναι αναστρέψιμη.

Η χρήση των UAV σε περιπτώσεις αρχαιολογικών εφαρμογών και ψηφιακής καταγραφής των μνημείων της πολιτισμικής κληρονομιάς, έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις μνημείων σε διάφορες τοποθεσίες ανά τον κόσμο. Κατωτέρω παρατίθενται ορισμένες από αυτές τις περιπτώσεις με τα σχετικά εικονιστικά παράγωγα.

2.1.1. Περίπτωση μελέτης στην περιοχή Aquileia της Ιταλίας

Αντικείμενο της μελέτης ήταν η εκτέλεση δοκιμών αποτύπωσης με UAV - στα πλαίσια των ευρύτερων αρχαιολογικών ανασκαφών της 'via Gemina' στην Aquileia - αρχαίας οικίας που χρονολογείται τον 4^ο αιώνα μ.Χ. Η οικία αυτή έχει ανασκαφεί με συστηματικές παρεμβάσεις από το 2005. Σκοπός της μελέτης ήταν ο πειραματισμός με την χρήση μη συμβατικών οργάνων και μεθόδων για την αρχαιολογική έρευνα και για την για την υλοποίηση τρισδιάστατων βάσεων δεδομένων που αφορούν στην πολιτιστική κληρονομιά.

Η εναέρια πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα hexacopter, της εταιρίας Mikrokopter, εξοπλισμένη με: μία κάρτα ελέγχου πτήσης (FC) που λαμβάνει τις εντολές του χειριστηρίου, μία μονάδα navi control (NC) που να επιτρέπει τον αυτοματοποιημένο έλεγχο του οχήματος, επεξεργαζόμενη δεδομένα που αποκτώνται από τους κατάλληλους αισθητήρες πλοήγησης, εντοπισμού θέσης (GPS) και υπολογισμού στροφών (Mk3MAG), ένα δέκτη GPS (MKGPS) που χρησιμοποιεί αισθητήρα LEA 4H της Ublox με την δυνατότητα DGPS θεσιθεσίας (EGNOS, WAAS, ...) για τον ακριβή εντοπισμό με υπο-μετρική ακρίβεια, που μεταδίδει πληροφορίες θέσης στη NC, έναν αισθητήρα Mk3MAG εξοπλισμένο με τριαξονικό μαγνητόμετρο και μία φωτογραφική μηχανή Sony Nex_5 εξοπλισμένη με έναν αισθητήρα CMOS με φορμάτ 23,5 x 15,6 mm (μεγέθους APS-C) (Rinaudo et al., 2012).

Ο προγραμματισμός λήψης των εικόνων έγινε με την χρήση ορθοεικόνας που παρήχθη από εικόνες του δορυφόρου Quickbird και περιλάμβανε δύο πτήσεις σε διαφορετικά ύψη. Η χαμηλότερη πτήση πραγματοποιήθηκε πάνω από τα ερείπια της ρωμαϊκής οδού (cardo), που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του ανασκαφικού χώρου, με μέσο ύψος πτήσης 10 m, η οποία παρείχε κάλυψη εδάφους περίπου 10 x 15 m². Η προς τα εμπρός επικάλυψη ορίστηκε στο 75%, εξασφαλίζοντας μια βάση περίπου 4 m, ενώ η πλάγια επικάλυψη ορίστηκε στο 30% για να αποφευχθεί οποιοδήποτε στερεοσκοπικό κενό λόγω λαθών εντοπισμού των καθορισμένων τροχιών. Είχε προγραμματιστεί ένα σύνολο 36 εικόνων. Η υψηλότερη πτήση κάλυπτε ολόκληρη την περιοχή της ανασκαφής με μέσο ύψος πτήσης 18 m, και παρείχε κάλυψη περίπου 18 x 27 m² συνολικά. Στην περίπτωση αυτή η προς τα εμπρός επικάλυψη καθορίστηκε σε 75%, εξασφαλίζοντας βάση περίπου 7,50 m, ενώ η πλάγια επικάλυψη ορίστηκε στο 40%, έτσι ώστε να αντισταθμιστεί, παρεχόμενου του ύψους πτήσης, η πιθανότητα απόκλισης του αεροσκάφους από τις προβλεπόμενες τροχιές. Για την

υψηλότερη πτήση είχε προγραμματισθεί ένα σύνολο 60 εικόνων (Rinaudo κ.ά., 2012). Σημειώνεται, ότι το GSD για τις εικόνες της χαμηλότερης πτήσης ήταν περίπου 3,2mm, ενώ για εκείνες της υψηλότερης περίπου 5,7mm.



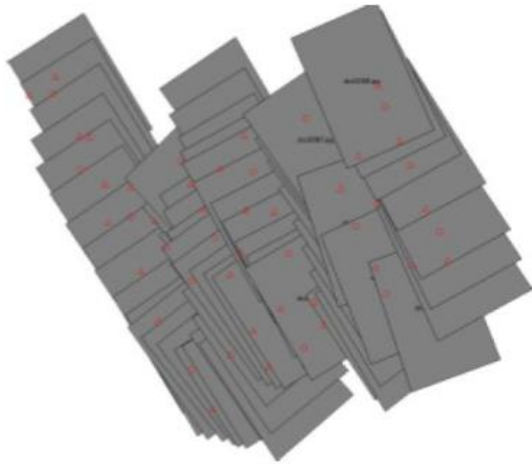
Εικόνα 2.1: Η εισαγωγή των δεδομένων πτήσης στην μονάδα ελέγχου, (a)χαμηλότερη πτήση και (b) υψηλότερη πτήση (Rinaudo et al., 2012).



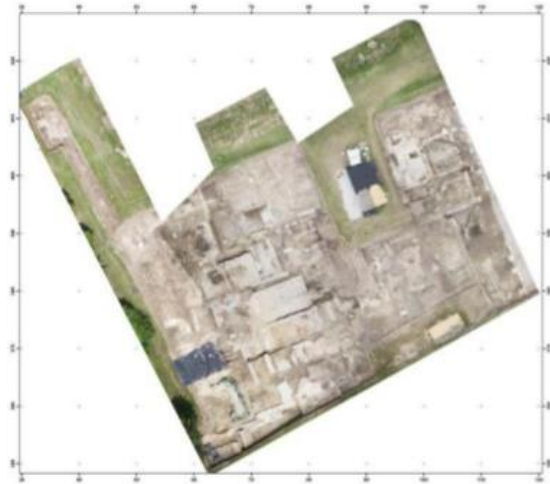
Εικόνα 2.2: (a)Ο προγραμματισμός πτήσης στην ορθοεικόνα του Quickbird, (b)οι πραγματικές τροχιές που ακολούθησε η εναέρια πλατφόρμα (με κόκκινο χρώμα περιγράφεται η υψηλότερη και με κίτρινο χρώμα η χαμηλότερη) τροχιά(Rinaudo et al., 2012).

Η απογείωση και η προσγείωση της εναέριας πλατφόρμας έγινε χειροκίνητα, ενώ η υπόλοιπη πτήση αυτόματα, αφού εισήχθησαν στο πρόγραμμα ελέγχου η διαδρομή πτήσης και οι συντεταγμένες λήψης των εικόνων. Πριν από την εκτέλεση των πτήσεων τοποθετήθηκαν μία σειρά από φωτοσταθερά, τόσο σημεία για τον αεροτριγωνισμό όσο και σημεία ελέγχου για το αποτέλεσμα της διαδικασίας. Αυτά ήταν τακτικά διανεμημένα σε όλο το μπλοκ των εικόνων προκειμένου να εγγυώνται κάποια αξιόπιστη ακρίβεια στον προσανατολισμό του φωτογραμμετρικού μπλοκ.

Αφού υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες των φωτοσταθερών με γεωδαιτικές μεθόδους, ακολούθησε η παραδοσιακή διαδικασία αεροτριγωνισμού για την δημιουργία ορθοεικόνας όλης της περιοχής των ανασκαφών χρησιμοποιώντας εικόνες από την υψηλότερη πτήση. Η διαδικασία αυτή εκτελέστηκε με το πρόγραμμα LPS (Leica Photogrammetric Suite) που κατέστησε εφικτό να προσανατολιστούν όλες οι εικόνες παρά τις διαφορετικές στροφές και επικαλύψεις. Χρησιμοποιήθηκαν 30 GCP και περισσότερα από 1200 αυτόματα εντοπισμένα σημεία ελέγχου από το πρόγραμμα. Αφού δημιουργήθηκε και μελετήθηκε το DSM παρήχθη ο τελικός ορθοφωτοχάρτης. Το αποτέλεσμα αφορούσε σε κατά μέσο όρο εναπομείναντα σφάλματα για τα σημεία ελέγχου 1cm κατά x, 0,5cm κατά y και 2cm κατά z στο τελικό προϊόν (σε 15 GCP).



Εικόνα 2.3: Το προσανατολισμένο φωτογραμμετρικό μπλοκ (Rinaudo et al., 2012).



Εικόνα 2.4: Η ορθοφωτογραφία της οικίας "dei putti danzanti" (Rinaudo et al., 2012).

Ένα άλλο προϊόν που παρήχθη, περιέχοντας τόσο την δισδιάστατη πληροφορία της ορθοφωτογραφίας όσο και την πληροφορία του ύψους που περιέχεται σε ένα DSM είναι το SOP (Solid OrthoPhoto). Το SOP είναι ένα προϊόν raster το οποίο συσχετίζει με κάθε γεωαναφερμένο εικονοστοιχείο ενός πίνακα πληροφορία χρώματος και ύψους: με αυτόν τον τρόπο τα διαθέσιμα δεδομένα μπορούν να τοποθετηθούν στην σωστή τρισδιάστατη θέση τους ακόμη και όταν ο χρήστης παρατηρεί σε δύο διαστάσεις. Λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή απλότητα των δεδομένων ράστερ, ένα προϊόν SOP μπορεί εύκολα να προβληθεί και να θεαθεί σε μία πολύ φιλική προς τον χρήστη εφαρμογή που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Visual Fortran. Οι χαρτογραφικές συντεταγμένες για κάθε θέση του δρομέα μέσα στο SOP άμεσα, ενώ ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει βασικές εντολές, όπως zooming και panning και μπορεί να ανακτήσει τις βασικές μετρικές πληροφορίες όπως αποστάσεις, γωνίες, εμβαδά, και οι όγκους (Rinaudo κ.ά., 2012).

2.1.2. Περίπτωση μελέτης στην αρχαιολογική περιοχή Veii της Ιταλίας

Αντικείμενο της μελέτης ήταν η μοντελοποίηση τμήματος του ανεσκαμμένου αρχαίου Ετρουσκικού οικισμού Veii στην περιοχή Isola Farnese βορειοδυτικά της Ρώμης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα Microdrone τεσσάρων στροφείων, σε συνδυασμό με αισθητήρες GNSS / INS και εξοπλισμένο με μηχανή Pentax Optio A40 (με φακό 8mm, 12 Megapixel, και μέγεθος pixel 1,9μm).

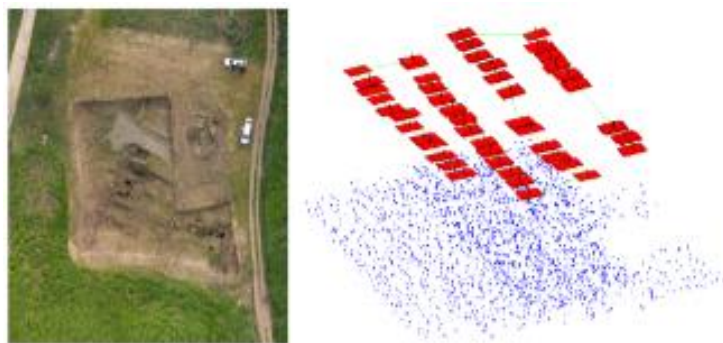
Σχεδόν 100 εικόνες αποκτήθηκαν πάνω από τον αρχαιολογικό χώρο του Veii, σε ένα τμήμα περίπου 35 x 20 m. Οι εικόνες του μπλοκ ήταν κατά μέσο όρο κλίμακας 1: 4.400 με μέσο ύψος λήψης 35m (περίπου 1 εκατοστό GSD). Ο προσανατολισμός των εικόνων επετεύχθη αυτόματα, με τη χρήση της μεθόδου ATiPE, η οποία έδωσε πάνω από 330.000 αντιστοιχίες

εικόνων, που στη συνέχεια μειώθηκαν σε περίπου 18.000, για την ταχύτερη εκτέλεση του τριγωνισμού με την μέθοδο των δεσμών.

Αναφέρεται συνοπτικά, ότι η μέθοδος ATiPE (Automatic Tie Point Extraction), συνίσταται σε μία μεθοδολογία που επιτρέπει τον προσδιορισμό ενός συνόλου αντιστοιχιών μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών από δεδομένα. Η γενική μοντελοποίηση του προβλήματος καθιστά εφικτή την όλη διαδικασία της επεξεργασίας με έναν υψηλό βαθμό αυτοματισμού. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι διαφορετικά στοιχεία που αποκτήθηκαν με διαφορετικούς αισθητήρες περιέχουν αντίστοιχα 2D χαρακτηριστικά που συνδέονται με μία σχέση που συχνά μπορεί να ορίζεται μαθηματικά ως ένας γραμμικός μετασχηματισμός. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για ακραίες τιμές απόρριψης σε σύνολα δεδομένων που περιέχουν ένα ορισμένο αριθμό λανθασμένων αντιστοιχιών που έχουν προκύψει με αλγορίθμους FBM (Feature-Based Matching). Συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί για μεγάλου μεγέθους και σύνθετα μπλοκ αεροφωτογραφιών, ακόμα και στην περίπτωση πολυφασματικών εικόνων (Barazzetti et al., 2011).

Η ανάλυση του πίνακα συμμεταβλητότητας του πακέτου λύσης, που προέκυψε με την παραπάνω μέθοδο, έδωσε ένα σ_0 της τάξης των 1,6μm, (δηλαδή της τάξης μεγέθους του pixel) και μια θεωρητική ακρίβεια των υπολογιζόμενων συντεταγμένων αντικειμένου $\sigma_x \approx \sigma_y = \pm 0,6$ εκατοστά και $\sigma_z = \pm 2,3$ εκατοστά. Το RMS υπολογισμένο με 5 στόχους ήταν 4 cm, 3 cm και 7 cm σε X, Y, και Z διευθύνσεις, αντίστοιχα. Αυτές οι διαφορές οφείλονταν στην χειροκίνητη μέτρηση των συντεταγμένων των στόχων στις εικόνες (το κέντρο του κάθε στόχου δεν ήταν σαφώς ορατό), αλλά το αποτέλεσμα ήταν αρκετά ακριβές για τις αρχαιολογικές ανάγκες. (Remondino et al., 2011).

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού MIC-MAC (Multi Images Correspondences par Méthodes Automatiques de Corrélation), δημιουργήθηκε ένα νέφος περίπου 40 εκατομμυρίων σημείων και από αυτό κατασκευάστηκε το μοντέλο επιφανείας για την καλύτερη οπτικοποίηση του οποίου χρησιμοποιήθηκαν εφέ σκίασης.



Εικόνα 2.5: Τα ποτελέσματα του αυτόματου τριγωνισμού για το φωτογραμμετρικό μπλοκ της περιοχής του Veii στην Ιταλία (Remondino et al., 2011).



Εικόνα 2.6: Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου MIC-MAC για τις φωτογραφίες πάνω από το Veii, οπτικοποιημένες με σκίαση (Remondino et al., 2011).

2.1.3. Περίπτωση μελέτης στην αρχαιολογική περιοχή Paestum της Ιταλίας

Η μελέτη αυτή που έγινε με UAV, ήταν κομμάτι μίας ευρύτερης τοπογραφικής αποτύπωσης στην αρχαιολογική περιοχή του Paestum, με σκοπό τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων με υφή, όλης της περιοχής για αρχαιολογικούς σκοπούς και γραφικές αναπαραστάσεις.

Η αρχαία πόλη του Paestum διατηρεί ερείπια από την ελληνική και τη ρωμαϊκή εποχή και τρεις πολύ καλά διατηρημένους δωρικούς ναούς. Το Paestum είναι ένας από τους πιο σημαντικούς αρχαιολογικούς χώρους στην Ιταλία και είχε συμπεριληφθεί στον κατάλογο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO το 1998. Ιδρύθηκε γύρω στο 600 π.Χ. από Έλληνες με το όνομα Ποσειδωνία και παρουσιάζει αστικό χώρο που χωρίζεται σε ιερούς, δημόσιους και ιδιωτικούς χώρους. Στα βόρεια βρισκόταν το ιερό της Αθηνάς, γνωστός ως ναός της Δήμητρας. Η λεγόμενη «βασιλική» (περίπου 550 π.Χ., ήταν ο πρώτος από τους τρεις ναούς) και ο ναός του Ποσειδώνα (περίπου 450 π.Χ.) βρίσκονταν στο Νότο. Το 273 π.Χ. η περιοχή έγινε ρωμαϊκή αποικία και πήρε το σημερινό όνομα, Paestum.

Λαμβάνοντας υπόψη την διάσταση του χώρου (περίπου 1 x 0,6 χιλιόμετρα) και τα χαρακτηριστικά των ναών, χρησιμοποιήθηκε μια πλατφόρμα UAV για την λήψη εικόνων με σκοπό την παραγωγή ορθοεικόνων και την αξιοποίηση τους σε συνδυασμό με τα δεδομένα που προέκυψαν με επίγεια τοπογραφία. Το διαθέσιμο UAV ήταν ένα MD4-1000 κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από ανθρακόνημα και μπορούσε να μεταφέρει έως και 1,2

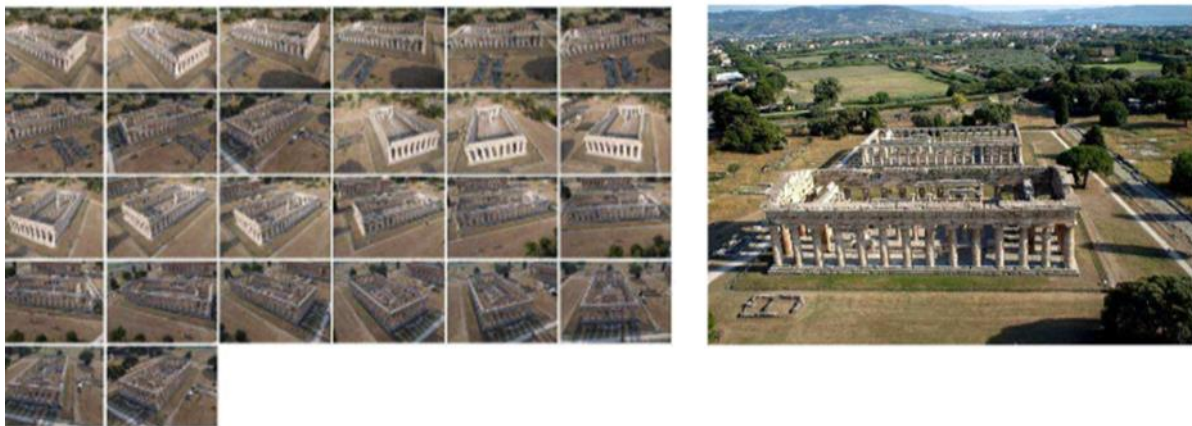
κιά. Ήταν εξολισμένο με μια φωτογραφική μηχανή Olympus E-P1 (12 Megapixel, 4 μm μέγεθος pixel) με 17 χιλιοστά εστιακό μήκος και με μία ακόμη Olympus XZ-1 (10 Megapixel, 2 μm μέγεθος pixel) 6 mm, εστιακού μήκους (Fiorillo et al., 2011).

Η διάρκεια πτήσης της πλατφόρμας UAV εξαρτάτο από το φορτίο, τον άνεμο και τις μπαταρίες, αλλά μπορούσε να φτάσει, υπό ιδανικές συνθήκες, περίπου τα 70 λεπτά. Η πλοήγησή του έγινε αυτόματα, με τη βοήθεια συστήματος GPS και αφού εισήχθησαν στο σχετικό λογισμικό οι συντεταγμένες των waypoints.

Για την αποτύπωση του ευρύτερου αρχαιολογικού χώρου και των μνημείων που βρίσκονταν εντός αυτού, επιλέχθηκε ένα σχετικό υψόμετρο 130 m (για ολόκληρη την περιοχή) και 70 m (για τα μεμονωμένα μνημεία) αντίστοιχα, παρέχοντας εικόνες με απόσταση μέσης δειγματοληψίας εδάφους (GSD) 5 και 3 εκατοστών, αντίστοιχα (πίνακας 2.1) (Fiorillo et al., 2011).

Περιοχή	Μέσο GSD	Πλήθος εικόνων
Σύνολο χώρου	περίπου 5 cm	60 κατακόρυφες εικόνες - 4 λωρίδες
"Βασιλική"	περίπου 3 cm	15 κατακόρυφες εικόνες - 3 λωρίδες
"Βασιλική"	περίπου 3 cm	25 πλάγιες εικόνες - 1 γύρος
Ναός Ποσειδώνα	περίπου 3 cm	14 κατακόρυφες εικόνες - 3 λωρίδες

Πίνακας 2.1: Συλλεχθείσες εικόνες και μέση ανάλυση στο έδαφος, αρχαιολογικός χώρος Paestum στην Ιταλία (Fiorillo et al., 2011).



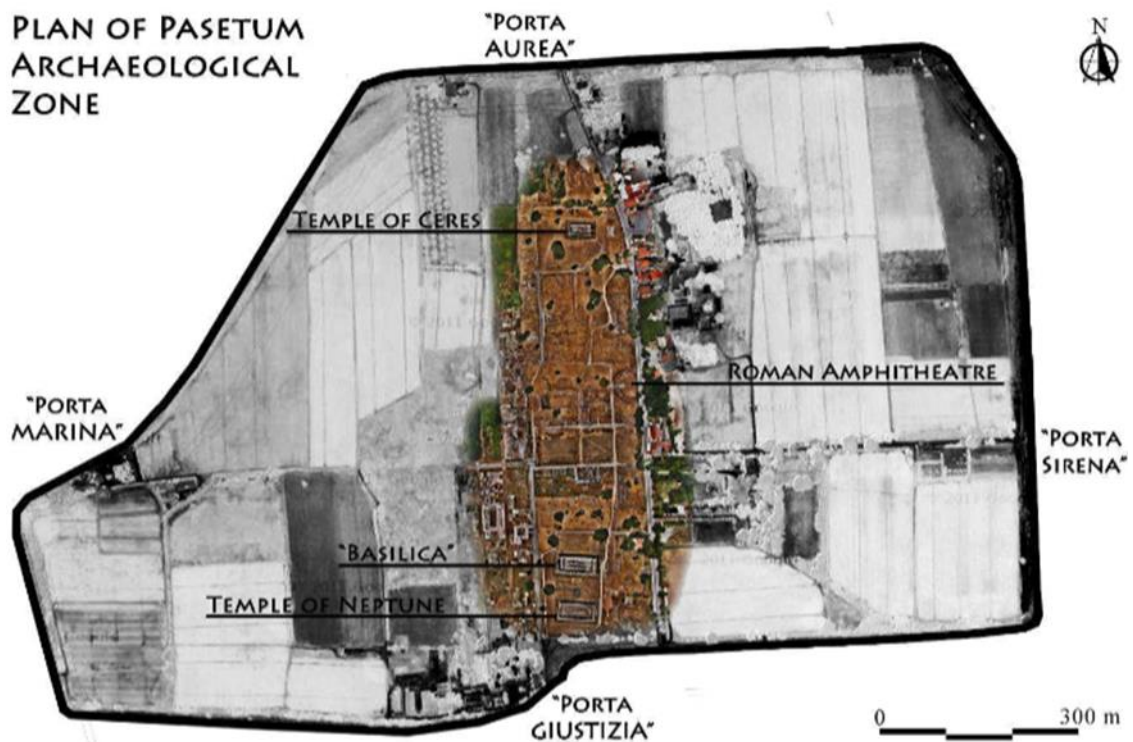
Εικόνα 2.7: Παραδείγματα εικόνων που συλλέχθηκαν με το UAV στον αρχαιολογικό χώρο Paestum στην Ιταλία, α) περιμετρικά της «Βασιλικής» και β) για το σύνολο του χώρου (Fiorillo et al., 2011).

Η επεξεργασία των αεροφωτογραφιών ακολούθησε την τυπική φωτογραμμετρική διαδικασία. Μετά τον τριγωνισμό, που έγινε με αυτόματη εξαγωγή σημείων σύνδεσης και την συνόρθωση με την μέθοδο των δεσμών, δημιουργήθηκε το πυκνό νέφος σημείων και το μοντέλο επιφανείας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή γεωαναφερμένης

ορθοεικόνας όλου του μνημειακού συγκροτήματος. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα συμπληρώθηκαν με επίγεια 3D δεδομένα με σκοπό την δημιουργία ενός πληρέστερου τρισδιάστατου μοντέλου της περιοχής, με γεωμετρικές αναπαραστάσεις χρήσιμες για αρχαιολογικούς, αρχιτεκτονικούς και επικοινωνιακούς σκοπούς.



Εικόνα 2.8: Μοντέλο επιφανείας όλου του μνημειακού χώρου του Paestum στην Ιταλία, (Fiorillo et al., 2011).



Εικόνα 2.9: Η γεωαναφερμένη ορθοφωτογραφία αφού υπερτέθηκε στο χάρτη της ευρύτερης περιοχής κληρονομιάς του Paestum στην Ιταλία, (Fiorillo et al., 2011).

2.1.4. Περίπτωση μελέτης στην περιοχή Mantua της Ιταλίας

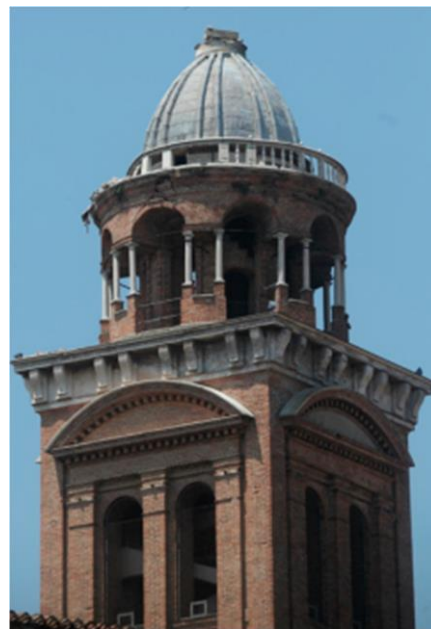
Αντικείμενο της μελέτης αυτής ήταν η διερεύνηση των τοπογραφικών τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτύπωση ψηλών κτηρίων σε ένα πλαίσιο έκτακτης ανάγκης, όπως μετά από κάποιο σεισμικό γεγονός. Ο κύριος στόχος ήταν να βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή των μεθόδων που βασίζονται στην αυτόματη απόκτηση και επεξεργασία φωτογραμμετρικών δεδομένων, ακόμη και με τη χρήση συστημάτων UAV, προκειμένου να παρέχουν γρήγορες και χαμηλού κόστους εργασίες. Η μελέτη αυτή περιγράφεται λεπτομερώς στο Fregonese et al. (2015).

Η εκκλησία της Santa Barbara βρίσκεται στο κέντρο της παλιάς πόλης της Mantua και είναι ένα από τα πιο αντιπροσωπευτικά κτήρια στην πόλη. Ανατέθηκε από τον Guglielmo Gonzaga ως οικογενειακό παρεκκλήσι στο εσωτερικό του "Palazzo Ducale", το πιο σημαντικό ιστορικό συγκρότημα της Μάντοβα. Ο αρχιτέκτονας Giovanni Batista το έκτισε μεταξύ 1562 και 1572. Το καμπαναριό, με ύψος περίπου 49 μέτρα από την κορυφή του θόλου, έχει τετράγωνη κάτοψη (περίπου 9m x 9m).

Το καμπαναριό δέχθηκε ζημιές από τους δύο μεγάλους σεισμούς που έγιναν αισθητοί τον Μάιο του 2012 στην βόρεια Ιταλία. Το φανάρι του τρούλου κατέρρευσε και στην πτώση του παρέσυρε ένα κομμάτι του μπαλκονιού της κορυφής. Ο στρογγυλός ναός υπεβλήθη σε περιστροφική κίνηση και η κατασκευή είχε κάποιες καθιζήσεις, ενώ εμφανίστηκαν και πολλές ρωγμές. Προκειμένου να σχεδιαστεί η αποκατάσταση του καμπαναριού, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει ακριβής έρευνα για την κατάσταση μετά τους σεισμούς για την απόκτηση δισδιάστατων αρχιτεκτονικών αναπαραστάσεων, κατακόρυφων τομών, όψεων, ορθοφωτογραφιών και 3D μοντέλων.



(α)

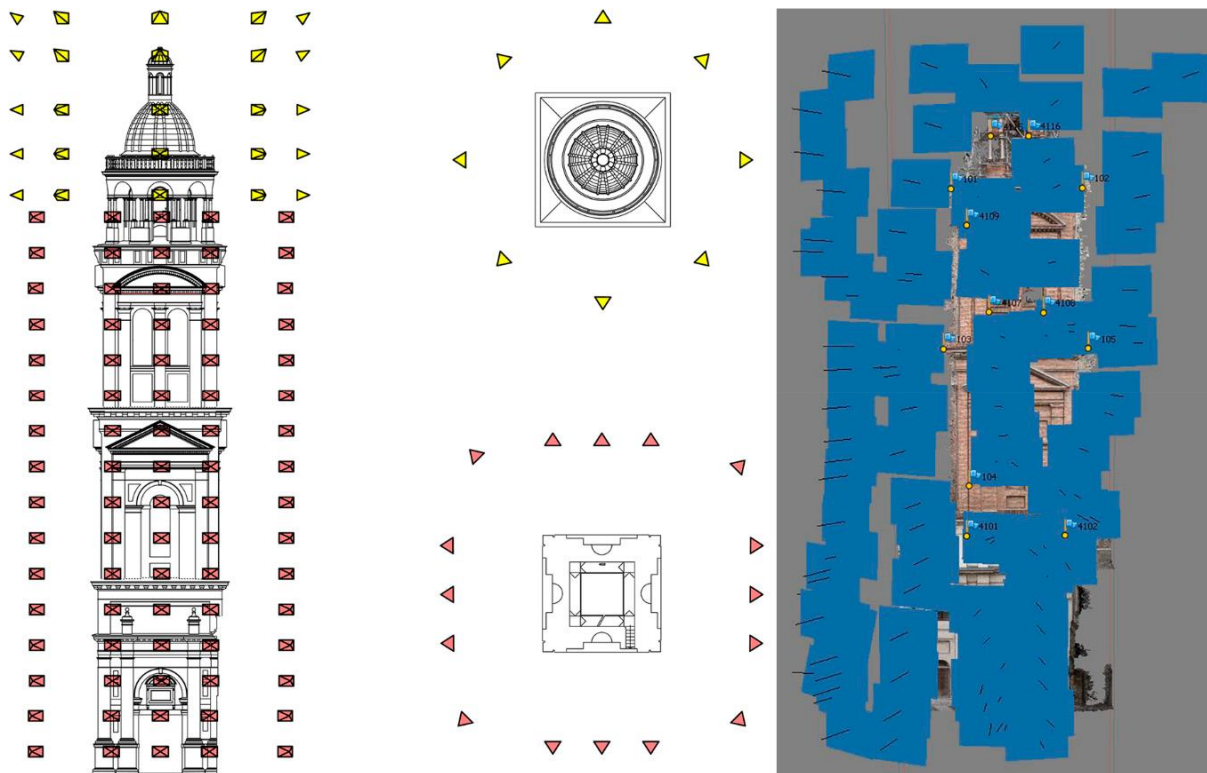


(β)

Εικόνα 2.10: Το καμπαναριό της Santa Barbara, μετά τον πρώτο σεισμό (α) και μετά τον δεύτερο (β) με την κατάρρευση του φαναριού (Fregonese et al., 2015).

Το διαθέσιμο UAV ήταν ένα octocopter. Η ομάδα που ήταν υπεύθυνη για την πτήση περιλάμβανε τον πιλότο και έναν εμπειρογνώμονα σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές ικανό να χειρίζεται εξ αποστάσεως την φωτομηχανή. Το UAV ήταν εξοπλισμένο με μία φωτογραφική μηχανή Canon EOS 650D (18 Megapixels, 4,3 μm μέγεθος pixel) με δυνατότητα στροφής 90° κατακόρυφα και εστιακό μήκος 18mm. Το GSD των εικόνων υπολογίστηκε περίπου 3 mm, καθώς η μέση απόσταση λήψης ήταν 8 m. Επιλέχθηκε επικάλυψη περίπου 80% μεταξύ γειτονικών εικόνων.

Το σχέδιο ήταν να αποκτηθούν τρεις κατακόρυφες λωρίδες εικόνων για κάθε μέτωπο του καμπαναριού, συμπληρούμενες από πρόσθετες λωρίδες στις γωνίες, που θα επέτρεπαν την σύνδεση μεταξύ γειτονικών μετώπων. Για την συλλογή των εικόνων γύρω από το κυκλικής κάτοψης ναό σχεδιάστηκε η πραγμάτωση τριών πτήσεων 360° γύρω του, με τουλάχιστον 8 λήψεις η κάθε μία, συμπληρούμενες από τον ίδιο αριθμό πλάγιων εικόνων από ψηλότερες θέσεις και ορισμένες ναδρικές φωτογραφίες.



Σχήμα 2.1: σχέδιο της λήψης εικόνων από UAV. Με κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύονται οι εικόνες του μπροστινού μέρους του καμπαναριού, ενώ με κόκκινο του στρογγυλής κάτοψης ναού. Δεξιά το αποτέλεσμα του προσανατολισμού των φωτογραφιών. Η διαφορά μεταξύ του σχεδίου και της πραγματικής πτήσης είναι εμφανής. (Fregonese et al., 2015).

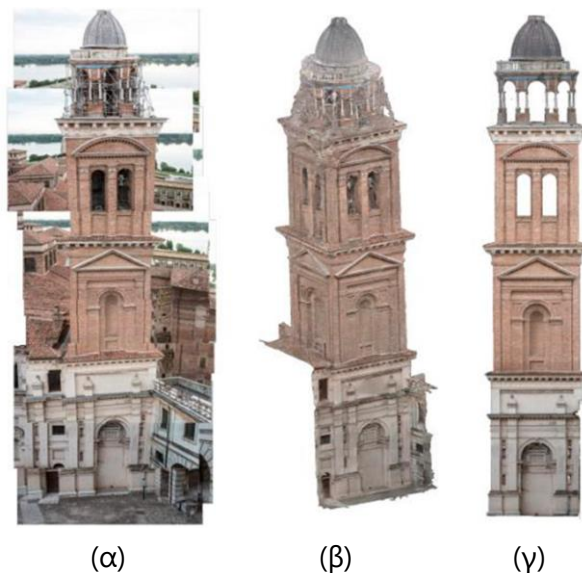
Κατά τη διάρκεια της λήψης των εικόνων, έγινε προσπάθεια να υπάρχουν παρόμοιες συνθήκες φωτισμού, κατά το δυνατόν χωρίς σκιές, ώστε τα χρώματα να είναι ομοιόμορφα σε όλες τις φωτογραφίες. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μία νεφελώδης μέρα για την λήψη των εικόνων. Ως αποτέλεσμα η φωτογραμμετρική υφή και οι ορθοεικόνες είχαν πολύ κοντινές αποχρώσεις.

Συνολικά, ελήφθησαν 110 εικόνες της βόρειας πρόσοψης, 19 της νότιας, 70 εικόνες της ανατολικής πρόσοψης και 83 της δυτικής, καθώς και 159 εικόνες του κυκλικού ναού. Ο διαφορετικός αριθμός εικόνων ανά πρόσοψη οφειλόταν στο διαφορετικό μέγεθος και θέση κάθε πρόσοψης και αρχιτεκτονικών μελών. Επετεύχθη μία μέση επικάλυψη 77% στις εικόνες με κτακούφη βάση 2,35 μέτρα και οριζόντια 3,48 μέτρα. Μόνο η μεσαία λωρίδα εικόνων για κάθε πλευρά κάλυπτε περισσότερο από το 90% της αντίστοιχης πρόσοψης, με αποτέλεσμα κάθε σημείο της επιφανείας του αντικειμένου να είναι διακριτό σε τουλάχιστον οκτώ εικόνες.

Η φωτογραμμετρική διαδικασία για την παραγωγή ορθοεικόνων και μοντέλων έγινε αυτόματα με τη χρήση του Agisoft Photoscan. Λόγω του μεγάλου αριθμού εικόνων, η όλη εργασία χωρίστηκε σε μικρότερα κομμάτια ("chunks" κατά το Photoscan). Αυτό επέτρεπε την μείωση του απαιτούμενου χρόνου για την ολοκλήρωση της εργασίας, χωρίζοντας την σε διαφορετικούς υπολογιστές. Το μοντέλο του εξωτερικού του καμπαναριού χωρίστηκε σε τέσσερα chunks, ένα για κάθε πρόσοψη. Ένα πέμπτο chunk δημιουργήθηκε για τον στρογγυλό ναό. Για το κατώτερο τμήμα του εξωτερικού του καμπαναριού έγινε συνένωση με νέφος σημείων από laser scanner.

Για τον προσανατολισμό των εικόνων έγινε σκόπευση τοποσταθερών σημείων πάνω στο κτήριο των οποίων οι συντεταγμένες εξήχθησαν χειροκίνητα από τις laser σαρώσεις. Στις τελικές ορθοεικόνες η μέση εδαφοψηφίδα ήταν 0,003 m. Το μέσο σφάλμα στον προσανατολισμό των εικόνων ήταν περίπου 1,8 pixels μετά τη βελτιστοποίηση. Μετά τη γεωαναφορά στο τοπικό σύστημα αναφοράς το μοντέλο παρουσίαζε ένα μέσο σφάλμα περίπου 0,011 m.

Ως αποτέλεσμα, πυκνό νέφος σημείων και μοντέλα πλέγματος εξήχθησαν από Agisoft PhotoScan. Το πρώτο ήταν χρήσιμο για την ενσωμάτωση των δεδομένων από το σαρωτή μετά τη μείωση του θορύβου. Τα μοντέλα πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή υψηλής ανάλυσης ορθοφωτοχάρτων, αν και ήταν απαραίτητη η διαδικασία γεμίσματος κενών. Αυτή η βελτιστοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας το Rapidform XOR3.



Εικόνα 2.11: (α) παράδειγμα κατακόρυφης λωρίδας λήψης, (β) μοντέλο με υφή βασισμένο στις εικόνες, (γ) μπροστινή ορθοεικόνα (Fregonese et al., 2015).

Για τη δημιουργία καλύτερων ορθοεικόνων από άποψη ποιότητας (συνοχή φωτός και σκιάς στις προσόψεις), δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες οι εικόνες. Εικόνες με ισχυρές χρωματικές διαφοροποιήσεις και κυρίως μη παράλληλες στις επιφάνειες εικόνες απορρίφθηκαν. Για τις ορθοεικόνες των προσόψεων του καμπαναριού έγινε χρήση λιγότερων εικόνων από αυτές που λήφθηκαν: 125 εικόνες για τη νότια πλευρά, 83 εικόνες για την βόρεια, 69 εικόνες για την ανατολική, 99 εικόνες για τη δυτική. Ο ορθοφωτοχάρτης του στρογγυλού ναού έγινε με 154 εικόνες.

Η πρώτη επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή ήταν η ένταξη στο τοπικό σύστημα αναφοράς που έγινε με τοπογραφικές μεθόδους. Τα δεδομένα των σημείων που αποκτήθηκαν από το σαρωτή λείζερ χωρίζονταν σε εσωτερικά δεδομένα (περίπου 1,5 εκατομμύρια σημεία) και εξωτερικά (800 εκατομμύρια σημεία μόνο για το κάτω μέρος του εξωτερικού). Νέφη σημείων και ορθοφωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν μαζί για να πραγματοποιηθεί η ολοκληρωμένη τεκμηρίωση της μετά-σεισμικής κατάστασης. Σχεδιάστηκαν παραδοσιακές αρχιτεκτονικές αναπαραστάσεις, σε κλίμακα 1:50 για κάθε όροφο, τρεις επιπλέον οριζόντιες τομές για τα σημεία με τις μεγαλύτερες ζημιές, δύο κατακόρυφες τομές όλης της κατασκευής, τέσσερις όψεις συμπληρούμενες από τις αντίστοιχες ορθοεικόνες καθώς και τρισδιάστατο μοντέλο του κυκλικού ναού με νέφη τόσο από τον σαρωτή όσο και από το φωτογραμμετρικό λογισμικό (εικόνες 2.12 και 2.13).



Εικόνα 2.12: τρισδιάστατο μοντέλο του κυκλικού ναού (Fregonese et al., 2015).



Εικόνα 2.13: το καμπαναριό της Santa Barbara. Δεδομένα από τον επίγειο σαρωτή, ορθοεικόνα και τελική κατακόρυφη τομή που εξήχθη με την χρήση και των δύο τεχνικών. (Fregonese et al., 2015).

3. ΦΟΡΤΙΑ ΓΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕ UAV

Για τις φωτογραμμετρικές εφαρμογές, δύο είναι οι κρίσιμες συνιστώσες του ωφέλιμου φορτίου ενός UAV: τα συστήματα προσανατολισμού και πλοήγησης και οι φωτογραμμετρικοί αισθητήρες ή αισθητήρες τηλεπισκόπησης. Το κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με τα παραπάνω συστήματα, καθώς και με άλλο βοηθητικό εμπορικό εξοπλισμό (Gimbals, Control Units) κατάλληλο για φωτογραμμετρικές εφαρμογές με UAV. Οι πληροφορίες που παρατίθενται, προέρχονται κυρίως από τα φυλλάδια των κατασκευαστών και σχετικές ιστοσελίδες και παρουσιάζονται σε πίνακες και για τις δύο κατηγορίες.

3.1. Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS)

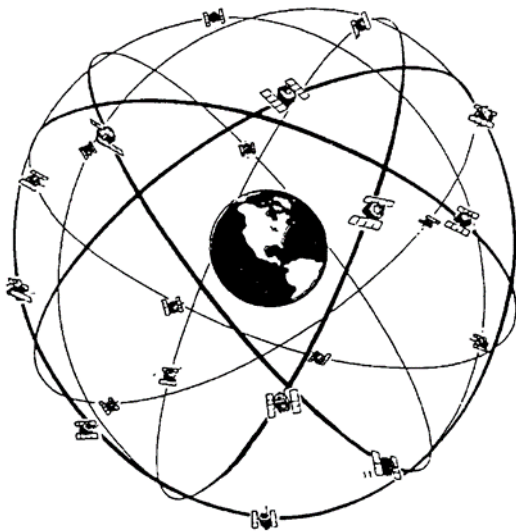
Ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης είναι ένα σύστημα από δορυφόρους που παρέχουν αυτόνομο γεω-χωρικό εντοπισμό με παγκόσμια κάλυψη. Τα μόνα GNSS που, επί του παρόντος, είναι λειτουργικά και μπορούν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη είναι το Αμερικάνικο NAVSTAR GPS και το Ρωσικό GLONASS. Υπό εξέλιξη βρίσκονται το Κινέζικο BeiDou NSS που προς το παρόν παρέχει μόνο εγχώρια κάλυψη και το Ευρωπαϊκό Galileo. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής περιγράφεται το NAVSTAR GPS ως το κυριότερο και περισσότερο γνωστό παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης, το οποίο βρίσκει και μεγαλύτερη εφαρμογή στους τομείς της τοπογραφίας, φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης.

Το NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging, Global Positioning System) ή απλά το GPS, είναι ένα παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης (συντεταγμένες), χρόνου και ταχύτητας, οπουδήποτε στην επιφάνεια της γης ή και πάνω από αυτήν, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή (Φωτίου, Πικριδάς 2006).

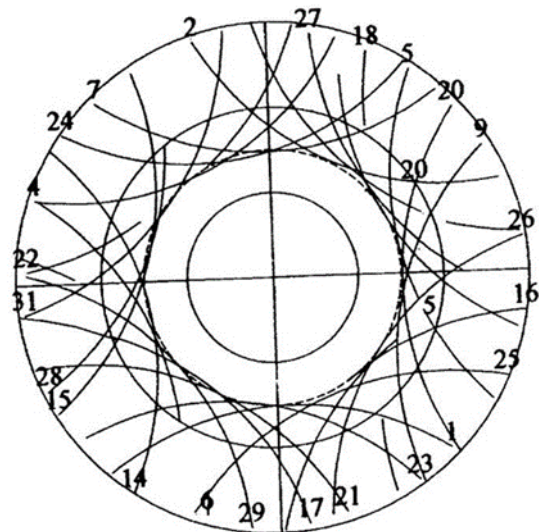
Το σύστημα GPS αποτελείται από "πομπούς σε τροχιά", και συνίσταται από τρία τμήματα: το δορυφορικό, το τμήμα ελέγχου και αυτό που αφορά στον χρήστη. Το δορυφορικό τμήμα του συστήματος αποτελείται σήμερα από 32 δορυφόρους, που κινούνται σε γνωστή τροχιά και σε υψόμετρο περίπου 20.200 km. Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από πέντε μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης, τρεις σταθμούς τηλεπικοινωνιών και έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου. Ο δέκτης, εν προκειμένω, είναι προσαρτημένος (αποσπώμενος ή όχι) στην εναέρια πλατφόρμα και λαμβάνει κύματα ηλεκτρομαγνητικά, που εκπέμπονται και λαμβάνονται από τους ορατούς ως προς τον δέκτη δορυφόρους. Οι δορυφόροι εκπέμπουν σήματα σε δύο συχνότητες $L1 = 154 f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$ με μήκος κύματος $\lambda \approx 19,03 \text{ cm}$ και $L2 = 120 f_0 = 1227,60 \text{ MHz}$ με μήκος κύματος $\lambda \approx 24,42 \text{ cm}$ (Παραδείσης, 2010).

Τα δορυφορικά σήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από το δέκτη, που ισοδυναμούν με αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή. Οι μετρήσεις γίνονται πάνω σε "μετρητικούς" κώδικες ή σε ημιτονοειδή κύματα (φορείς των κωδίκων και του μηνύματος πλοήγησης) και είναι επηρεασμένες από συστηματικά

σφάλματα που οφείλονται στη επίδραση της ατμόσφαιρας στο δορυφορικό σήμα, στην τροχιά του δορυφόρου και στον μη συγχρονισμό των χρονομέτρων του δέκτη και του δορυφόρου. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια του συστήματος και να περιοριστούν τα σφάλματα που την μειώνουν χρησιμοποιείται η μέθοδος του διαφορικού εντοπισμού των σημείων (DGPS). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί και τη δεύτερη συχνότητα λήψης L2 του συστήματος GPS, μέσω της οποίας μοντελοποιείται η επίδραση της ιονόσφαιρας. Έτσι, η μέθοδος αυτή βελτιώνει την ακρίβεια εντοπισμού, από 15 m που είναι η ονομαστική ακρίβεια του GPS σε περίπου 10 cm στην περίπτωση των καλύτερων συνθηκών. (Φωτίου, Πικριδάς 2006). Οι βασικές παρατηρήσεις μέσω συστήματος GPS είναι οι ψευδοαποστάσεις και οι φάσεις. Ο προσδιορισμός της θέσης με GPS, διακρίνεται σε απόλυτο και σχετικό. Στην πρώτη περίπτωση υπολογίζονται οι συντεταγμένες σημείου ως προς ορισμένο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς από παρατηρήσεις ενός δέκτη μόνο, ενώ στην δεύτερη υπολογίζονται οι συντεταγμένες σημείου ως προς άλλο σημείο του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές. Ο προσδιορισμός της θέσης μπορεί ακόμα να διακριθεί σε κινηματικό και στατικό ανάλογα με το αν το αντικείμενο του οποίου προσδιορίζονται οι συντεταγμένες είναι σε κίνηση ή όχι, αντίστοιχα (Παραδείσης, 2010).



Σχήμα 3.1: Σύστημα δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη γη (www.transputer.net)



Σχήμα 3.2: Οι διαδρομές των δορυφόρων GPS, όπως μπορούν να παρατηρηθούν από το διάστημα κοιτώντας προς τον Βόρειο Πόλο (www.what-when-how.com)

Τα GPS, είναι το κλειδί για τον ακριβή και ασφαλή χειρισμό των UAV, είτε αυτά οδηγούνται αυτόνομα είτε χειροκίνητα από το έδαφος. Αν μπορεί να εξασφαλισθεί η επάρκεια των δορυφορικών σημάτων καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής του UAV, οι τεχνικές πλοήγησης με GPS μπορούν να προσφέρουν προσδιορισμό της θέσης με συνεχή-συνεπή ορθότητα. Συχνά το GPS χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με INS, προκειμένου να προσφέρει μία πιο ολοκληρωμένη λύση.

Η πιο κοινή χρήση των GPS στην Φωτογραμμετρία με UAV είναι για την πλοήγηση της εναέριας πλατφόρμας. Με την βοήθεια των συστημάτων GPS μπορεί να υπολογιστεί η θέση του UAV, αλλά υπό προϋποθέσεις και η ταχύτητά του. Οι πληροφορίες που παρέχονται από τα συστήματα αυτά σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνουν την παρακολούθηση του UAV, ενώ μπορούν να χρησιμεύσουν και στην κατεύθυνση, στροφή και σταθεροποίησή του οριζοντιογραφικά ή/και υψομετρικά έναντι των δυνάμεων της βαρύτητας και του αέρος. Δηλαδή, εξοπλισμένο με το σύστημα GPS, ένα UAV μπορεί να προσφέρει όχι μόνο πληροφορίες θέσης που αφορούν στα φωτογραμμετρικά και τηλεπισκοπικά δεδομένα που συλλέγει, αλλά μπορεί να πλοηγηθεί αυτόνομα και ακόμα κυριότερα μπορεί να περιοριστεί ώστε να κινείται εντός προκαθορισμένων κατακόρυφων και οριζόντιων "ορίων", δηλαδή εντός μίας "οριοθετημένης" περιοχής. Διασφαλίζεται έτσι ο απόλυτος έλεγχος της εναέριας πλατφόρμας ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος ατυχημάτων και να γίνεται ευκολότερος ο γρήγορος τερματισμός της πτήσης σε περίπτωση ανάγκης.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, τα UAV χρησιμοποιούνται συχνά για την συλλογή δεδομένων που αφορούν στην επιφάνεια της γης ή σε τρισδιάστατα αντικείμενα, κάνοντας χρήση φωτογραφικών μηχανών και άλλων αισθητήρων που έχουν εγκατασταθεί για αυτόν ακριβώς τον σκοπό. Για την ακριβή γεωγραφική αναφορά των δεδομένων που συλλέγονται, είναι σημαντικό να είναι γνωστή η ακριβής θέση του οχήματος όταν λαμβάνεται μία μετρητική φωτογραφία ή κάποια άλλη μέτρηση. Ένας δέκτης GPS μπορεί να εντοπίσει τη θέση του UAV, συχνά με ακρίβεια εκατοστών. Το ίδιο ισχύει και για τον χρόνο κατά τον οποίο ελήφθη η φωτογραφία ή η μέτρηση. Οι ακριβείς χρονικές σφραγίδες που παρέχονται από το GPS είναι πολύτιμες για την συλλογή αυτών των πληροφοριών.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να γίνει μία σύντομη αναφορά στον κινηματικό προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTK), καθώς η μέθοδος αυτή που αρχίζει και διαδίδεται και στον τομέα των UAV, μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία εικονιστικών προϊόντων, όπως ορθοφωτομωσαϊκά, με απόλυτη ακρίβεια μικρότερη των 5 cm, χωρίς την ανάγκη χρήσης φωτοσταθερών σημείων, γεγονός που σημαίνει λιγότερο χρόνο μετρήσεων και υψηλή ακρίβεια ακόμα και σε περιοχές χωρίς δυνατότητα πρόσβασης. Η μέθοδος RTK, συνίσταται στην εκπομπή δεδομένων από έναν ακίνητο δέκτη γνωστών συντεταγμένων (δέκτης αναφοράς), σε έναν άλλο δέκτη που κινείται (ή μπορεί και να μένει ακίνητος για μερικά δευτερόλεπτα), συνήθως κατά μήκος κάποιας διαδρομής ή ακολουθώντας κάποια σημεία ορισμένων συντεταγμένων. Ο δέκτης αναφοράς, δηλαδή, παίζει το ρόλο ψευδοδορυφόρου εκπέμποντας δεδομένα διόρθωσης στον άλλο δέκτη. Σε αντίθεση με την μέθοδο DGPS που χρησιμοποιεί τις ψευδοαποστάσεις για τον προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο, η μέθοδος RTK χρησιμοποιεί τις φάσεις, προσδιορίζοντας ένα μοντέλο διορθώσεων που ο δέκτης σε κίνηση πρέπει να εφαρμόσει στις δικές του μετρήσεις για να προσδιορίσει την θέση του με καλύτερη ακρίβεια (Φωτίου, Πικριδής 2006).

Η μονάδα GPS αποτελείται από ένα δορυφορικό δέκτη GPS με την σχετική ικανότητα αποκωδικοποίησης. Λόγω του ότι το δορυφορικό σήμα GPS είναι πολύ αδύναμο στην επιφάνεια της Γης, αυτή η ενότητα είναι πολύ ευαίσθητη σε παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές. Σημειώνεται ότι το σήμα του GPS λειτουργεί στην περιοχή 1,2-1,6 GHz,

οπότε πρέπει να ληφθεί μέριμνα για κάθε ραδιοπομπό που λειτουργεί στις εν λόγω συχνότητες. Επίσης, κάθε CPU που λειτουργεί σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων μπορεί αναπόφευκτα να εκπέμπει πολύ μικρά σήματα που όμως παρεμβαίνουν σε αυτά του GPS. Πρέπει να πραγματοποιούνται εκτεταμένες δοκιμές για να εξασφαλισθεί ότι δεν υπάρχουν ραδιοφωνικές παρεμβολές στην μονάδα GPS, ακόμη και αν δεν υπάρχουν άλλες συσκευές μετάδοσης που εκπέμπουν κοντά σε αυτήν τη συχνότητα.

Η μονάδα GPS θα πρέπει να τοποθετείται στο επάνω μέρος του της εναέριας πλατφόρμας, με ανεμπόδιση θέα του ουρανού, ώστε να εξασφαλίζεται η ορατότητα όσων περισσότερων δορυφόρων (τουλάχιστον τεσσάρων) είναι δυνατόν.

3.2. Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης (INS)

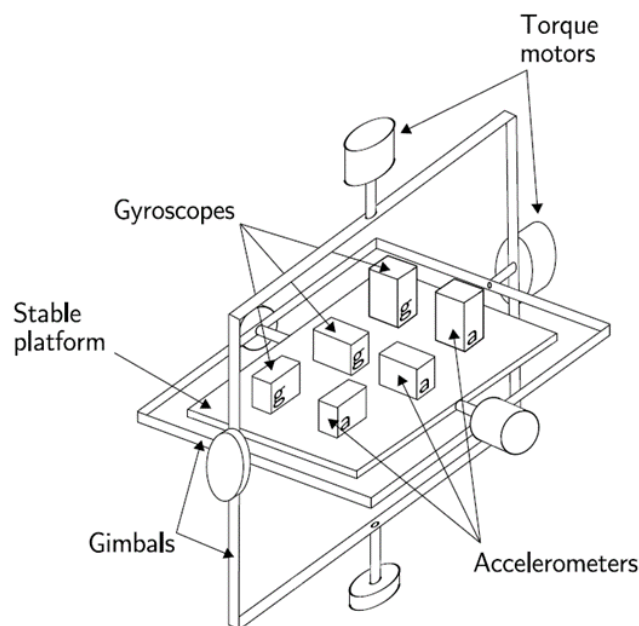
Η αδρανειακή πλοήγηση είναι μία αυτόνομη τεχνική πλοήγησης κατά την οποία μετρήσεις που παρέχονται από επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της θέσης και του προσανατολισμού ενός αντικειμένου σχετικών με την αρχική θέση, προσανατολισμό και ταχύτητα (Woodman, 2007). Τα Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης (INSs) περιέχουν IMUs, που τυπικά έχουν τρία γυροσκόπια και τρία επιταχυνσιόμετρα, που μετρούν τις τρεις συνιστώσες της γωνιακής ταχύτητας και τις τρεις συνιστώσες της γραμμικής (μη βαρυτικής) επιτάχυνσης αντίστοιχα. Με την επεξεργασία των σημάτων από αυτές τις συσκευές τα INS μπορούν να παρακολουθήσουν τη θέση και τον προσανατολισμό ενός οχήματος, όπως ένα UAV. Μία υπολογιστική μονάδα, υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο τη θέση του οχήματος: κατ' αρχάς για κάθε έναν από τους βαθμούς ελευθερίας ($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$), με την πάροδο του χρόνου ενσωματώνει την αισθητή επιτάχυνση με την εκτιμώμενη βαρύτητα, για να υπολογίσει την τρέχουσα ταχύτητα, έπειτα ενσωματώνει την ταχύτητα για να υπολογίσει την τρέχουσα θέση. Οι εφαρμογές της αδρανειακής πλοήγησης έχουν διευρυνθεί τα τελευταία χρόνια, λόγω της κατασκευής των MEMS, που έκαναν δυνατή την κατασκευή αρκετά μικρών και ελαφρών INS.

Η πλειονότητα των INS, εμπίπτει σε μία από τις δύο κατηγορίες που περιγράφονται κατωτέρω. Και οι δύο βασίζονται στις ίδιες βασικές αρχές. Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών αφορά στο πλαίσιο αναφοράς στο οποίο λειτουργούν τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα.

- **Stable Platform Systems:** Στα συστήματα αυτά, οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε μία πλατφόρμα που είναι απομονωμένη από εξωτερικές περιστροφικές κινήσεις. Με άλλα λόγια, η πλατφόρμα στην οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες, είναι συνεχώς ευθυγραμμισμένη παράλληλα με κάποιο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση gimballs που επιτρέπουν στην πλατφόρμα να έχει ελευθερία σε τρεις άξονες. Τα γυροσκόπια ανιχνεύουν τυχόν στροφές της πλατφόρμας, ώστε τα μοτέρ στρέψης των gimballs να μπορούν να τις απαλείψουν, επιστρέφοντας την πλατφόρμα στην αρχική της ευθυγράμμιση με το παγκόσμιο

σύστημα αναφοράς. Για τον υπολογισμό του προσανατολισμού του οχήματος γίνεται μέτρηση των γωνιών μεταξύ των gimbals και για τον υπολογισμό της θέσης τα σήματα από τα επιταχυνσιόμετρα ολοκληρώνονται διπλά. Πριν την εκτέλεση της ολοκλήρωσης είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί από την κάθετη συνιστώσα της μετρημένης επιτάχυνσης η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας. Σημειώνεται, ότι τα gimbals είναι στρεφόμενα υποστηρίγματα που επιτρέπουν την στροφή ενός αντικείμενου γύρω από έναν μόνο άξονα. Ένα σύστημα τριών gimbals, ανά δύο τοποθετημένων με κάθετους άξονες περιστροφής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτρέψει σε ένα αντικείμενο σταθερά αναρτημένο στο εσώτατο gimbal να παραμένει ανεξάρτητο από την περιστροφή της εξωτερικής στήριξής του. Για το λόγο αυτό τα gimbals χρησιμοποιούνται συνήθως σε πυξίδες και αδρανειακά συστήματα.

- **Strapdown Systems:** Στα συστήματα αυτά, οι αισθητήρες του IMU είναι σταθερά συνδεδεμένα με το φέρον όχημα, και επομένως οι ποσότητες που μετρούνται αφορούν στο σύστημα αξόνων του οχήματος και όχι κάποιο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς. Για να υπάρχει συνεχής παρακολούθηση του προσανατολισμού, τα σήματα από τα γυροσκόπια ολοκληρώνονται όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Για την παρακολούθηση της θέσης του οχήματος, γίνεται μετατροπή των σημάτων των επιταχυνσιόμετρων σε συντεταγμένες σε κάποιο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς με τη χρήση του γνωστού προσανατολισμού, όπως προκύπτει από την ολοκλήρωση με τα σήματα των γυροσκοπίων. Στη συνέχεια οι μετρήσεις των επιταχυνσιόμετρων που είναι σε παγκόσμιο σύστημα αναφοράς ολοκληρώνονται όπως συμβαίνει και στον αλγόριθμο για τα Stable Platform Systems. Τα Strapdown systems, χαρακτηρίζονται από μικρότερη μηχανική πολυπλοκότητα και τείνουν να είναι μικρότερα από τα συστήματα σταθερής πλατφόρμας (Woodman, 2007).



Σχήμα 3.3: IMU σταθερής πλατφόρμας (Woodman, 2007)

3.2.1. Γυροσκόπια

3.2.1.1. Μηχανικά

Ένα συμβατικό γυροσκόπιο αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο τοποθετημένο σε δύο gimbals που του επιτρέπουν να περιστρέφεται και στους τρεις άξονες. Ως αποτέλεσμα της διατήρησης της στροφορμής, ο περιστρεφόμενος δίσκος αντιστέκεται στις αλλαγές του προσανατολισμού. Ως εκ τούτου, όταν ένα μηχανικό γυροσκόπιο υποβάλλεται σε περιστροφή ο δίσκος παραμένει σε σταθερό παγκόσμιο προσανατολισμό και οι γωνίες μεταξύ των προσαρτημένων gimbals αλλάζουν. Για τη μέτρηση του προσανατολισμού του οχήματος οι γωνίες μεταξύ των gimbals μπορούν να διαβαστούν χρησιμοποιώντας κάποιες συγκεκριμένες διατάξεις (angle pick-offs). Σημειώνεται ότι ένα συμβατικό γυροσκόπιο μετρά προσανατολισμό. Εν αντιθέσει, όλα τα σύγχρονα γυροσκόπια είναι γυροσκόπια “ρυθμού” (rate-gyros), τα οποία μετρούν γωνιακή ταχύτητα.

3.2.1.2. Οπτικά

Ένα γυροσκόπιο οπτικών ινών (FOG) χρησιμοποιεί την παρεμβολή του φωτός για τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας. Ένα FOG αποτελείται από ένα μεγάλο πηνίο οπτικών ινών. Για τη μέτρηση της περιστροφής εξαπολύονται δύο δέσμες φωτός στο πηνίο σε αντίθετες κατευθύνσεις. Εάν ο αισθητήρας βρίσκεται σε περιστροφή, τότε η δέσμη που ταξιδεύει στην κατεύθυνση της περιστροφής θα βιώσει μακρύτερη διαδρομή προς το άλλο άκρο της ίνας από την ακτίνα που ταξιδεύει ενάντια στην κατεύθυνση της περιστροφής, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.4. Αυτό είναι γνωστό ως το φαινόμενο Sagnac. Όταν οι δέσμες εξέρχονται της ίνας συγχωνεύονται. Η μετατόπιση φάσης που εισάγεται λόγω της επίδρασης του φαινομένου Sagnac αναγκάζει τις δέσμες να συγκρούονται, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια συνδυασμένη δέσμη της οποίας η ένταση εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα. Επομένως, είναι δυνατόν να μετρηθεί η γωνιακή ταχύτητα με την μέτρηση της έντασης της συνδυασμένης δέσμης.

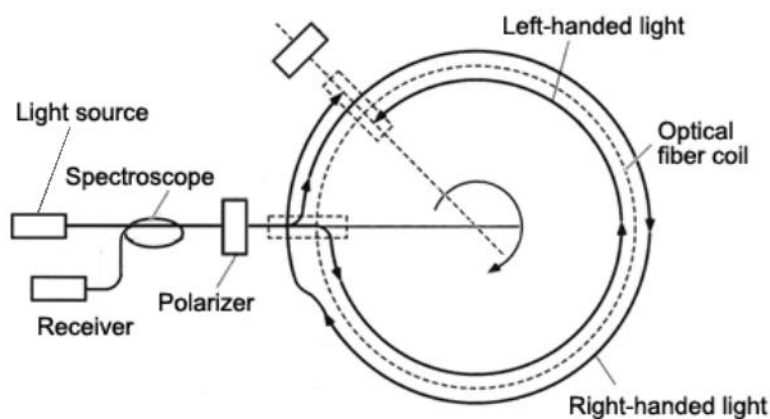
3.2.1.3. Μικροηλεκτρονικά

Τα μικροηλεκτρονικά γυροσκόπια (MEMS), κάνουν χρήση του φαινομένου Coriolis, που περιγράφει ότι αν σε ένα σύστημα αναφοράς που στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω , μία μάζα m κινείται με ταχύτητα u , δέχεται δύναμη: $F_c = -2m(\omega \times u)$.

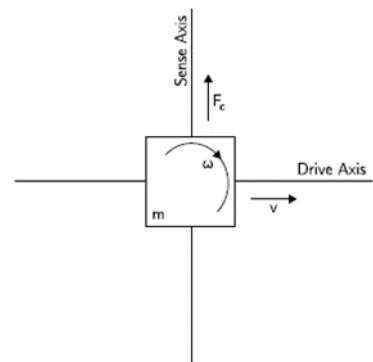
Τα γυροσκόπια MEMS περιέχουν δονούμενα στοιχεία για να μετρήσουν την επίδραση του φαινομένου Coriolis. Υφίστανται πολλές γεωμετρικές δονούμενων στοιχείων. Η απλούστερη γεωμετρία αποτελείται από μια ενιαία μάζα η οποία οδηγείται να δονείται κατά μήκος ενός άξονα μετάδοσης κίνησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5. Όταν το γυροσκόπιο στρέφεται προκαλείται μία δευτερεύουσα δόνηση κατά τον κάθετο άξονα λόγω της δύναμης Coriolis. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί με μέτρηση αυτής της δευτερογενούς στροφής. Προς το παρόν, οι αισθητήρες MEMS δεν μπορούν να φθάσουν τις ακρίβειες των οπτικών

συσκευών, αν και αυτό αναμένεται να γίνει στο μέλλον. Κατωτέρω παρατίθενται τα προτερήματα που παρουσιάζουν οι αισθητήρες MEMS:

- μικρό μέγεθος
- μικρό βάρος
- συμπαγής κατασκευή
- χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- μικρό χρονικό διάστημα για εκκίνηση
- χαμηλό (σχετικό) κόστος αγοράς και συντήρησης



Σχήμα 3.4: Το φαινόμενο Sagnac (www.neubrex.com)



Σχήμα 3.5: Περιστρεφόμενη μάζα γυροσκοπίου (Woodman, 2007)

3.2.2. Γραμμικά επιταχυνσιόμετρα

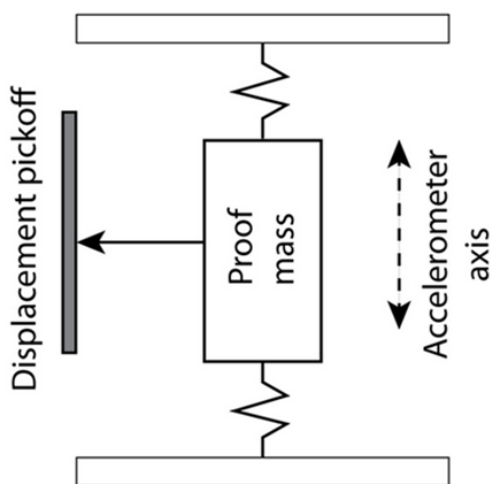
3.2.2.1. Μηχανικά

Ένα μηχανικό επιταχυνσιόμετρο αποτελείται από μία μάζα που συγκρατείται με ελατήρια όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6. Η μετατόπιση της μάζας μετράται με έναν αισθητήρα, που δίνει σήμα ανάλογο προς την δύναμη F που ασκείται στην μάζα κατά την διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα. Στη συνέχεια, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα $F = ma$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης που επενεργεί στην συσκευή.

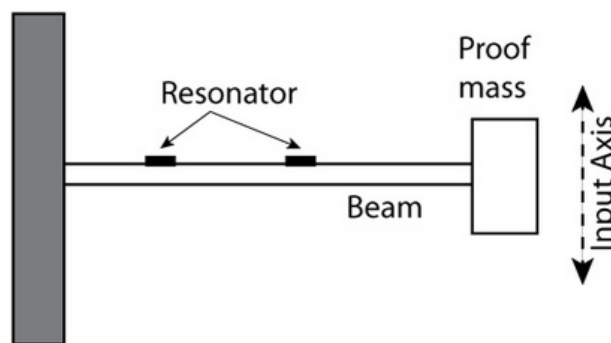
3.2.2.2. Στερεάς κατάστασης

Μπορούν να χωριστούν σε πολλές υποκατηγορίες, όπως επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, κραδασμών, πυριτίου και χαλαζία. Τα επιταχυνσιόμετρα στερεάς κατάστασης είναι μικρά, αξιόπιστα και στερεάς δομής.

Ένα παράδειγμα επιταχυνσιόμετρου στερεάς κατάστασης είναι αυτό των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW). Ένα επιταχυνσιόμετρο SAW, αποτελείται από μία πρόβολο (πακτωμένη προεξέχουσα δοκό) που είναι συντονισμένη σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7. Μία μάζα είναι προσαρτημένη στο ελεύθερο άκρο της δοκού. Όταν εφαρμόζεται κάποια επιτάχυνση κατά τον κατακόρυφο άξονα, η πρόβολος λυγίζει. Αυτό προκαλεί την συχνότητα του επιφανειακού ακουστικού κύματος να αλλάζει αναλόγως προς την εφαρμοζόμενη τάση. Μετρώντας την αλλαγή της συχνότητας είναι δυνατόν να υπολογιστεί η επιτάχυνση που εφαρμόζεται στην συσκευή.



Σχήμα 3.6: Μηχανικό επιταχυνσιόμετρο (work.thaslwanter.at)



Σχήμα 3.7: Επιταχυνσιόμετρο επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (work.thaslwanter.at)

3.2.2.3. Μικροηλεκτρονικά

Τα μικροηλεκτρονικά επιταχυνσιόμετρα (MEMS), κάνουν χρήση των ίδιων αρχών που ισχύουν και στους μηχανικούς και τους στερεάς κατάστασης αισθητήρες. Υπάρχουν δύο κατηγορίες επιταχυνσιόμετρων MEMS. Η πρώτη αποτελείται από μηχανικά που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές MEMS, ενώ η δεύτερη από συσκευές που μετρούν την αλλαγή στην συχνότητα ταλάντωσης ενός στοιχείου που προκαλείται από αλλαγή της τάσης, όπως στα επιταχυνσιόμετρα SAW.

Τα πλεονεκτήματα των συσκευών MEMS που καταγράφονται στην ενότητα 3.2.1.3. ισχύουν τόσο για τα γυροσκόπια όσο και για τα επιταχυνσιόμετρα. Είναι μικρά, ελαφρά και έχουν μικρό χρόνο έναρξης και κατανάλωση ενέργειας. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι επί του παρόντος δεν έχουν τόσο υψηλή ακρίβεια όσο τα επιταχυνσιόμετρα που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές, αν και η απόδοσή τους βελτιώνεται αλματωδώς.

3.2.3. Σφάλματα INS

Τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης είναι αυτόνομα συστήματα και η αποδοτικότητά τους εξαρτάται από τον τύπο της IMU, του επιταχυνσιομέτρου και του γυροσκοπίου. Οι τύποι IMU που χρησιμοποιούνται συχνότερα, είναι οι εξής:

- **Αδρανειακές μονάδες πλοήγησης (navigation IMU):** Αυτός ο τύπος αδρανειακής μονάδας μέτρησης παρέχει χαμηλή ολίσθηση για τα γυροσκόπια, συνεπώς το σφάλμα εντοπισμού θέσης παραμένει μικρό.
- **Αδρανειακές μονάδες τακτικής διαβάθμισης (tactical grade IMU):** Αυτός ο τύπος αδρανειακής μονάδας είναι χαμηλότερης ακρίβειας από αυτές της πλοήγησης, όμως σε συνδυασμό με το σύστημα πλοήγησης GPS παρέχει υψηλή ακρίβεια εντοπισμού θέσης και γωνιών.
- **Αδρανειακές μονάδες μικροηλεκτρικού αισθητήρα (micro-electro-sensor IMU):** Εκτός από τον τύπο της αδρανειακής μονάδας μέτρησης, ο οποίος υπεισέρχεται στο σφάλμα που προκύπτει από το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης, μια άλλη πηγή σφάλματος μπορεί να είναι τα χαρακτηριστικά του αδρανειακού αισθητήρα.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες χαρακτηριστικών των αισθητήρων οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν σφάλματα κατά τη λειτουργία του INS: η εκτροπή του αισθητήρα που προσδιορίζεται με τη διαδικασία του καλιμπραρίσματος (ή μοντελοποιείται με τρόπο στοχαστικό για μεταβολές στο χρόνο), ο συντελεστής κλίμακας – που αφορά στο εκπεμπόμενο και μετρούμενο σήμα από τον αισθητήρα – και το σφάλμα τοποθέτησης του αισθητήρα – που αφορά στην μη ορθογωνικότητα των αξόνων του INS – που επίσης μπορούν να εξαλειφθούν με το καλιμπράρισμα (Μπαράκου, 2010).

3.3. Υβριδικά Συστήματα Πλοήγησης (HNS)

Η σμίκρυνση του φυσικού μεγέθους των δεκτών, των κεραιών, των IMU και εν γένει των αισθητήρων έχει επιτρέψει την δημιουργία υβριδικών μονάδων μέτρησης (HNU), για χρήση σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, των οποίων οι μετρήσεις υπόκεινται σε επεξεργασία, είτε σε πραγματικό χρόνο από ένα υβριδικό σύστημα πλοήγησης (HNS), είτε εκ των υστέρων από ένα υβριδικό σύστημα προσανατολισμού (HOS) (Rehak et al., 2013). Η ορθότητα των αποτελεσμάτων που είναι σε θέση να δώσουν, είναι της τάξης των εκατοστών και αυτό υπαγορεύεται από την ποιότητα των δεκτών GPS και των κεραιών GPS (van Digelen, 2010). Η ορθότητα του τμήματος του προσανατολισμού που αφορά στις στροφές είναι κατά μεγάλο μέρος εξαρτώμενη από την ποιότητα της IMU και την δυναμική της πτήσης και βρίσκεται στο διάστημα $[0,015, 0,02]$ deg για τα $\sigma_{roll,pitch}$ και $[0,03, 0,05]$ deg για το σ_{yaw} (Colomina, Molina, 2014). Προκειμένου να συνοψιστούν οι τρέχουσες ικανότητες των HNU και HOS, λαμβάνοντας υπ' όψη ταυτόχρονα τον ρόλο που παίζει το βάρος του φορτίου για

τα UAV, παρατίθεται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα εμπορικών συστημάτων με βάρη μεταξύ [0,01, 1] kg (Πίνακας 3.1).

Μία HMU 0,9-1,5 kg (περίπου 0,25 kg για την κεραία GNSS πολλαπλών συχνοτήτων, περίπου 0,25 kg για την μονάδα ελέγχου που περιλαμβάνει δέκτη GNSS πολλαπλών συχνοτήτων και 0,4 – 1,0 kg για την IMU), εγγυάται γεωδαιτικής ποιότητας υπολογισμό PVA (Position, Velocity, Position), δηλαδή P: $\sigma_{x,y,z} < 0,05$ m, V: $\sigma_{vx,vy,vz} < 0,005$ m/s, A: $\sigma_{roll,pitch} < 0,015$ deg και $\sigma_{yaw} < 0,030$ deg. Η κατηγορία αυτή από HMUs και HNSs αντιπροσωπεύεται από τη σειρά AP της Applanix (Trimble), την MEMS Interface Card (MIC) της Novatel, το μοντέλο Arogee-N της SBG και το VRU-FQ της iMAR (αν και το βάρος της είναι σημαντικά βαρύτερο).

Για τις φωτογραμμετρικές εφαρμογές, η παραπάνω ακρίβεια είναι συμβατή με άμεσο προσανατολισμό των αισθητήρων (DiSO), δηλαδή άμεση γεωαναφορά (βλ. κεφ. 7), για ύψη μέχρι 50 m από το έδαφος και GSD 2 cm και μεγαλύτερη. Οι απαιτήσεις ακρίβειας στον προσδιορισμό του yaw εξαρτώνται από τη γεωμετρία της μηχανής και για μια εμπορικού τύπου μηχανή περίπου 14 Mpx, για το αναφερθέν ύψος και GSD, μία ακρίβεια της τάξης του $\sigma_{yaw} < 0,06$ deg, είναι αρκετή. Αυτά είναι στοιχεία ακρίβειας, τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη τις υπολειπόμενες ακρίβειες των HNS. Για εφαρμογές χαρτογράφησης, γίνεται η υπόθεση ότι η μηχανή είναι βαθμονομημένη με 0,5 pixel ακρίβεια. Ως εκ τούτου, αν και αυτές οι επιδόσεις είναι πολλά υποσχόμενες για DiSO, είναι καταλληλότερες για διαδικασίες γρήγορου AT και ολοκληρωμένου προσανατολισμού του αισθητήρα (ISO). Σημειώνεται, ότι για DiSO, σημαντική είναι όχι μόνο η ακρίβεια αλλά και η ορθότητα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το μοντέλο Spatial-Dual της Navigation Systems με HMU και HNS που χρησιμοποιούν δύο κεραίες GNSS. Οι δύο δέκτες γεωδαιτικής ποιότητας μετρήσεων, μπορούν να λειτουργούν σε τριπλές συχνότητες δίνοντας την δυνατότητα επεξεργασίας σημάτων GPS, Galileo και BeiDou. Ο σχεδιασμός με διπλή κεραία επιτρέπει ακρίβεια 0,1 deg για το yaw όταν η απόσταση μεταξύ των κεραιών μεγαλύτερη από 1 m. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το Spatial-Dual μπορεί να υπολογίσει θέσεις με ακρίβεια τάξης εκατοστού, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις φάσεων του GNSS, ταχύτητες στο 1cm/s και στροφές στα 0,15 deg με $\sigma_{roll,pitch}$ και σ_{yaw} περίπου στα 0,1 deg. Τα αποτελέσματα αυτά επιτρέπουν τη διενέργεια αεροτριγωνισμού με μειωμένο πλήθος GCP (Colomina, Molina, 2014).

Τα βασιζόμενα σε τεχνολογία MEMS, ελαφρύτερα HMUs, με βάρος της τάξης του 0,1 kg, αντιπροσωπεύονται από τον συνδυασμό της Novatel: του MIC και του ADIS-16488 IMU (της Analog Devices) (0,08 kg χωρίς την κεραία GPS και το προστατευτικό περίβλημα), τις μονάδες iIMU-01 και iVRU-01 της iMAR (0,05 kg χωρίς την κεραία GPS), την HMU Spatial της Advanced Navigation (0,025 kg χωρίς την κεραία GPS), την IG500-E της SBG (0,049 kg χωρίς την κεραία GPS, 0,01 kg χωρίς το προστατευτικό κουτί), και την APX15 της Applanix, (0,06 kg χωρίς την κεραία GNSS).

Πίνακας 3.1: Εμπορικά ΗΜΥ και ΗΝΣ για πλοήγηση μη επανδρωμένων οχημάτων
(Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον πίνακα 3 των Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Βάρος (kg)	Βάρος IMU (kg)	GNSS Φ or ρ	σ_p (m)	$\sigma_{r,p}$ (deg)	σ_h (deg)
Adv. Nav.	Spatial	0.025	Included	Φ	0.60-1.00	0.200	0.200
Adv. Nav.	Spatial-Dual	0.304	Included	ρ	0.01-0.02	0.150	0.100
Applanix	AP LN-200 E	0.250	0.750	Φ	0.05-0.30	0.008	0.025
Applanix	AP20	0.280	0.680	Φ, ρ	0.05-0.10	0.015	0.035
Applanix	AP40	0.280	1.000	Φ, ρ	0.05-0.10	0.008	0.020
Applanix	APX15	0.060	Included	Φ, ρ	0.02-0.05	0.025	0.080
iMAR	ιμ VRU-01	0.050	Included	ρ	1.20-2.00	0.200	<1
iMAR	VRU-FQ	1.750	Included	Φ	0.05-0.30	ΜΔ	ΜΔ
Novatel	MIC ADIS-16488	0.124	0.048	Φ	0.01-0.02	0.040	0.220
Novatel	SPAN-IGM	0.515	Included	Φ	0.10-0.50	ΜΔ	ΜΔ
SBG	Apogee-N	<0.900	Included	Φ, ρ	0.01-0.02	0.005	0.015
SBG	IG500-E (box)	0.049	Included	Φ, ρ	0.05-0.30	0.500	0.500
SBG	IG500-E (OEM)	0.010	Included	Φ, ρ	0.05-0.30	0.500	0.500

Φ : μέτρηση φάσης, ρ : μέτρηση ψευδοαπόστασης, σ_p : ακρίβεια θέσης, $\sigma_{r,p}$: ακρίβεια roll και pitch, σ_h : ακρίβεια heading, ΜΔ: μη διαθέσιμο



Εικόνα 3.1: (αριστερά) το Apogee-N της SBG, και (δεξιά) το SPAN-IGM της Novatel
(unmannedsystemstechnology.com)

3.4. Αισθητήρες για Φωτογραμμετρία και Τηλεπισκόπηση

Η Φωτογραμμετρία με UAV είναι μία περίπτωση εναέριας Φωτογραμμετρίας, και γι' αυτό, αφού αποφασιστούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής της, πρέπει να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός φέροντος σκελετού εναέριου οχήματος και φορτίου φωτογραμμετρικών αισθητήρων. Στην πράξη, το πρώτο από τα ανωτέρω είναι συνήθως προκαθορισμένο, και

επομένως ο προγραμματιστής ή χειριστής αντιμετωπίζει το πρόβλημα του να ταιριάξει το φωτογραμμετρικό φορτίο (με συγκεκριμένο bandwidth, ακρίβεια, ανάλυση) στο UAV με δοθέν μέγεθος, βάρος και προδιαγραφές ενέργειας προκειμένου να εκτελέσει αυτή την εφαρμογή. Η εξεύρεση της σωστής ισορροπίας δεν είναι μόνο δύσκολη, αλλά και περίπλοκη, καθώς το εύρος των διαθέσιμων συστημάτων είναι πολύ μεγάλο, και κυμαίνονται από εμπορικά χαμηλού κόστους, ερασιτεχνικά και επαγγελματικά, έως συστήματα που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για φωτογραμμετρικές εφαρμογές (Colomina, Molina, 2014). Το φωτογραμμετρικό φορτίο συνίσταται από κάποια μηχανή (διάταξη που μπορεί να συνδυάζει και περισσότερους του ενός αισθητήρες), η οποία στην Φωτογραμμετρία με UAV έχει επικρατήσει να είναι ψηφιακή, όπως ισχύει στις επίγειες Φωτογραμμετρικές εφαρμογές.

Οι φωτομηχανές που χρησιμοποιούνται στην Φωτογραμμετρία με UAV είναι κατά κόρον ερασιτεχνικές βαθμονομημένες. Οι φωτομηχανές αυτές πρέπει να βαθμονομούνται πριν την λήψη των εικόνων, εκτός από την περίπτωση που ο ψηφιακός φωτογραμμετρικός σταθμός που θα χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των εικόνων και την δημιουργία κάποιου εικονιστικού προϊόντος υποστηρίζει λειτουργία αυτοβαθμονόμησης.

Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στα εργαλεία για Φωτογραμμετρία που μπορεί να είναι κατάλληλα ως φορτία για micro, mini και tactical UAV και ενώ γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αισθητήρων ορατού φάσματος, κοντινού υπέρυθρου, πολυφασματικών, υπερφασματικών, θερμικών αισθητήρων, LIDAR και SAR.

3.4.1. Φωτομηχανές ορατού φάσματος

Οι ψηφιακές μηχανές ορατού φάσματος κάνουν χρήση αισθητήρων ευαίσθητων στο ορατό φάσμα του φωτός. Οι αισθητήρες διαβάζουν την ένταση του φωτός και οι ψηφιακές συσκευές μνήμης αποθηκεύουν τις ψηφιακές πληροφορίες εικόνας συνηθέστερα ως τιμές χρωμάτων RGB ή σπανιότερα ως ανεπεξέργαστα δεδομένα. Οι δύο βασικοί τύποι αισθητήρων είναι οι CCD και CMOS. Οι μηχανές αυτές είναι είτε DSLR είτε MILC.

Οι φωτομηχανές ορατού φάσματος χρησιμοποιούνται στην Φωτογραμμετρία με UAV κυρίως για εφαρμογές που σχετίζονται με την παραγωγή ορθοεικόνων, ορθοφωτοχαρτών, 3D μοντέλων, μοντέλων επιφανειών και μοντέλων υψομέτρου.

Τα βασικά στοιχεία ενός ψηφιακού φωτογραφικού αισθητήρα που ενδιαφέρουν για την επιλογή του ως κατάλληλου για UAV Φωτογραμμετρία είναι: το είδος του φωτογραφικού αισθητήρα, η ανάλυση, οι διαστάσεις του αισθητήρα, το μέγεθος του pixel, το frame rate, η ταχύτητα κλείστρου, το βάρος του και το εστιακό μήκος του φωτογραφικού φακού που θα χρησιμοποιηθεί.

Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται ενδεικτικά κάποιες κοινές ή/και αντιπροσωπευτικές κάμερες RGB κατάλληλες για Φωτογραμμετρία με UAV. Ορισμένες από αυτές δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε σχετικές δοκιμές αλλά αναφέρονται ως πιθανές υποψήφιες λόγω των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν.

Πίνακας 3.2: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές μηχανές ορατού φάσματος

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Format	Ανάλυση (MPx)	Βάρος (kg)	Διαστάσεις (mm ²)	Μέγεθος pixel (μm)	Frame rate (fps)	Ταχύτητα (s ⁻¹)
Canon	EOS 5DS	FF	CMOS 50.6	0.930	36.0x24.0	4.1	5.0	8000 (fp)
Canon	EOS 7D Mark II	SF	CMOS 20.2	0.910	22.3x14.9	4.1	10.0	8000 (fp)
Hasselblad	H5D-60	MF	CCD 60	1.800	53.7x40.2	6.0	1.1	800 (ls)
Nikon	D750	FF	CMOS 24.0	0.750	36.9x24.0	6.0	6.5	4000 (fp)
Panasonic	Lumix DMC-GH4	SF MILC	CMOS 16.1	0.560	17.3x13.0	3.8	12.0	8000 (fp)
Pentax	K-3 II	SF	CMOS 24.4	0.800	23.5x15.6	3.9	8.3	8000 (fp)
Phase One	iXA 180	MF	CCD 80	1.750	53.7x40.4	5.2	0.7	1600 (ls)
Ricoh	GXR A16	SF	CMOS 16.2	0.550	23.6x15.7	4.8	2.5	3200 (fp)
Sony	Alpha 7R II	FF MILC	CMOS 42.4	0.625	35.9x24.0	4.5	-	8000 (fp)
Sony	Alpha a6000	SF MILC	CMOS 24.3	0.350	23.5x15.6	3.9	3.0	4000 (fp)

fp: focal plane shutter, ls: leaf shutter



Εικόνα 3.2: (αριστερά) η Canon EOS 5DS τοποθετημένη στο Dji Spreading Wings S1000 Octocopter, και (κάτω) εικόνα από αέρος με την Canon EOS 5DS και φακό 28 mm από υψόμετρο 121m (adamtech.com.au)



3.4.2. Πολυφασματικές φωτομηχανές

Οι πολυφασματικές μηχανές συλλαμβάνουν δεδομένα εικόνας σε συγκεκριμένες συχνότητες κατανεμημένες σε όλο το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα μήκη κύματος μπορούν να διαχωρίζονται από τα φίλτρα ή με τη χρήση αισθητήρων που είναι ευαίσθητοι μόνο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, συμπεριλαμβανομένης και της ακτινοβολίας από τις συχνότητες πέραν του ορατού φάσματος του φωτός, όπως π.χ. το υπέρυθρο. Η πολυφασματική απεικόνιση μπορεί να επιτρέψει την εξαγωγή πρόσθετων πληροφοριών, που το ανθρώπινο μάτι αδυνατεί να συλλάβει, με τους υποδοχείς της για το κόκκινο, πράσινο και μπλε και που οι συμβατικές RGB φωτομηχανές δεν μπορούν να καταγράψουν.

Υπάρχουν αρκετές μικρές εμπορικές πολυφασματικές φωτομηχανές που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για Φωτογραμμετρία με UAV. Οι πολυφασματικές φωτομηχανές χρησιμοποιούν συχνά διατάξεις με πολλαπλούς αισθητήρες τροποποιημένους ώστε κάθε ένας να αντιστοιχίζεται σε ένα μόνο κανάλι ακτινοβολίας. Τέτοια είναι και η περίπτωση της σειράς Micro-MCA της Tetracam που είναι διαθέσιμη σε τρία διαφορετικά μοτίβα διάταξης αισθητήρων για να μπορεί να καταγράψει σε τέσσερα, έξι και δώδεκα χωριστά κανάλια της ορατής και εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (Tetracam, 2015). Είναι σε θέση να διακρίνουν φασματική ανακλαστικότητα που αποτελεί σημαντικό δείκτη για εφαρμογές που σχετίζονται με την υγεία της βλάστησης.

Οι πολυφασματικές φωτομηχανές χρησιμοποιούνται στην Φωτογραμμετρία με UAV κυρίως για την παραγωγή ορθοεικόνων, ορθοφωτοχαρτών και 3D μοντέλων, σε εφαρμογές που σχετίζονται με περιβαλλοντολογικές μελέτες, γεωλογία, γεωπονική και δασολογία. Στον Πίνακα 3.3 γίνεται αναφορά σε κάποιες από τις πιο κοινές πολυφασματικές φωτομηχανές που χρησιμοποιούνται στην Φωτογραμμετρία με UAV.

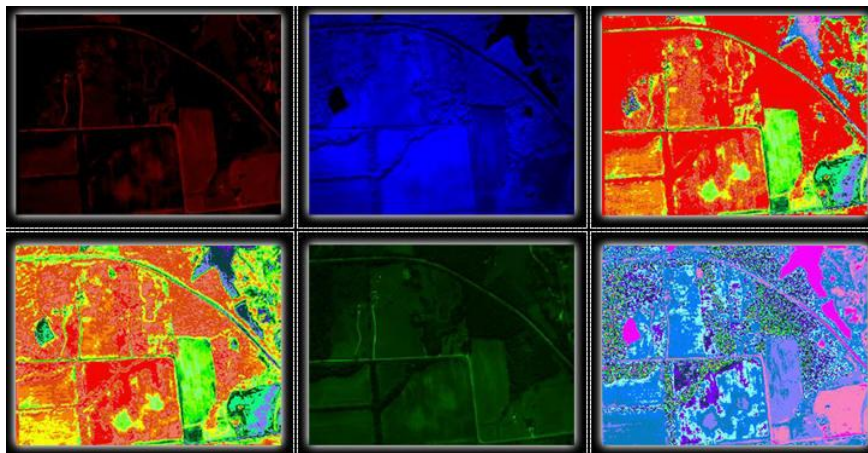
Πίνακας 3.3: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές πολυφασματικές φωτομηχανές για Φωτογραμμετρία με UAV (Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον πίνακα 5 των Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Ανάλυση (MPx)	Βάρος (kg)	Διαστάσεις (mm ²)	Μέγεθος pixel (μm)	Φασματικό εύρος (nm)
FluxData	FD-1665-MS3	3x(CCD 1.4)	1.250	10.2x8.3	6.45x6.45	400-1000
Quest Innovations	Condor3 VNN-285-CL	3x(CCD 1.4)	0.785	10.2x8.3	6.45x6.45	400-1000
Tetracam	ADC Lite	CMOS 3.2	0.200	6.55x4.92	3.2x3.2	520-920
Tetracam	ADC Micro	CMOS 3.2	0.090	6.55x4.92	3.2x3.2	520-920
Tetracam	μ- MCA 4	4x(CMOS 1.3)	MΔ	6.66x5.32	5.2x5.2	400-1000
Tetracam	μ- MCA 6	6x(CMOS 1.3)	MΔ	6.66x5.32	5.2x5.2	400-1000
Tetracam	μ- MCA 12	12x(CMOS 1.3)	MΔ	6.66x5.32	5.2x5.2	400-1000

MΔ: μη διαθέσιμο



Εικόνα 3.3: (αριστερά) η MIni-MCA6 της Tetracam, τοποθετημένη στο md4-1000 της Microdrones, και (κάτω) πολυφασματικές απεικονίσεις από την MIni-MCA6 (tetracam.com)



3.4.3. Υπερφασματικές φωτομηχανές

Η Τηλεπισκόπηση με υπερφασματικές κάμερες ασχολείται με την απεικόνιση στενών φασματικών ζωνών επί ενός συνεχούς φασματικού εύρους, που παράγει τα φάσματα όλων των αντικειμένων που απεικονίζονται στην υπερφασματική εικόνα. Σε αντίθεση, η πολυφασματική Τηλεπισκόπηση παράγει διακριτές ζώνες με μεγαλύτερο εύρος και συνήθως έχει μικρότερη φασματική ανάλυση. Οι υπερφασματικοί αισθητήρες, ως εκ τούτου, εξάγουν πιο λεπτομερείς πληροφορίες από τους πολυφασματικούς επειδή για κάθε pixel αποκτάται ένα ολόκληρο φάσμα.

Οι υπερφασματικοί δέκτες χρησιμοποιούνται στην Φωτογραμμετρία και Τηλεπισκόπηση με UAV, τόσο στην γεωλογία, την γεωπονία και την εξόρυξη μεταλλευμάτων και άλλων φυσικών διαθέσιμων, όσο και στην παρακολούθηση των εκπομπών που παράγονται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποτεφρωτήρες αστικών και επικίνδυνων αποβλήτων, τσιμεντοβιομηχανίες, καθώς και πολλά άλλα είδη βιομηχανικών πηγών βλαβερών ουσιών, στην παρακολούθηση πυρκαγιών και πετρελαιοκηλίδων.

Σε αντίθεση με τις τεχνολογικές εξελίξεις που αφορούν στις φωτομηχανές ορατού φάσματος, οι οποίες έχουν φτάσει σε βάρος λίγων εκατοντάδων γραμμαρίων και ανάλυση δεκάδων megapixels, η διαδικασία σμίκρυνσης των πολλαπλών και των υπερφασματικών

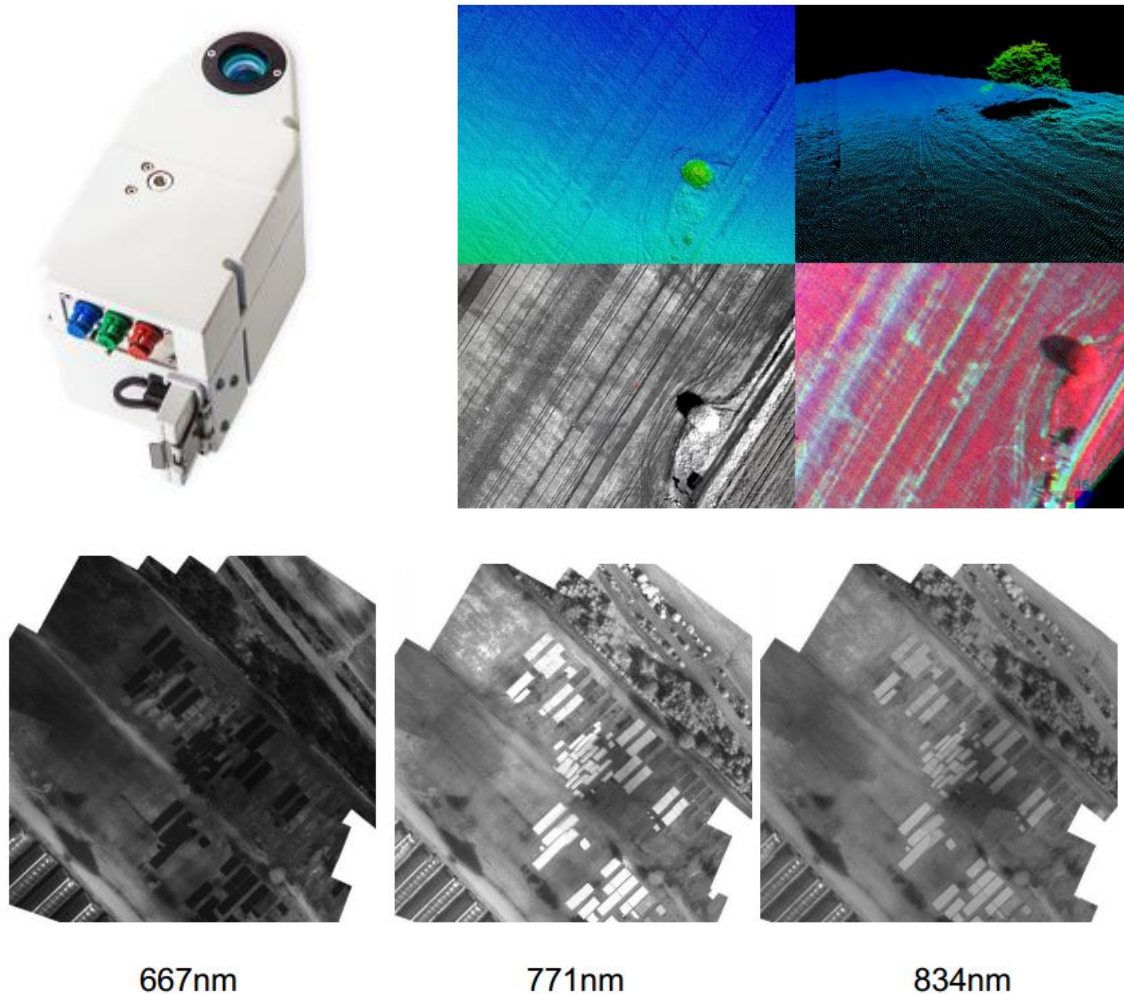
φωτογραφικών μηχανών είναι πιο δύσκολη, τόσο από άποψη οπτικής όσο και από άποψη βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Μικρές και ελαφρές υπερφασματικές φωτομηχανές έχουν αναπτυχθεί, για χρήση με UAV, από την Gubert και την Rikola Ltd, κάνοντας χρήση προσαρμοσμένων δεκτών CCD και CMOS αντίστοιχα. Προσφάτως, η Headwall Photonics ανέπτυξε σειρά υπερφασματικών φωτομηχανών που αντιστοιχούν στα φασματικά εύρη 400-1000 nm (ορατό και εγγύς υπέρυθρο), 900-1700 nm (εγγύς υπέρυθρο) και 550-1650 nm (διευρυμένο ορατό και εγγύς υπέρυθρο), ενώ ορισμένες από αυτές κάνουν χρήση εκτός από αισθητήρες CMOS και CCD, και αισθητήρων InGaAs για το εγγύς υπέρυθρο. Αυτοί οι δέκτες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4. Συνοπτικά, αναφέρεται ότι οι αισθητήρες InGaAs χρησιμοποιούνται στην Τηλεπισκόπηση γιατί λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών τους είναι καλοί ανιχνευτές της υπέρυθρης ακτινοβολίας και συγκεκριμένα προτιμώνται έναντι άλλων αισθητήρων στα μήκη κύματος 1,1 μm – 1,7 μm. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν ταχύτερη απόκριση χρόνου και απόδοση σε αυτές τις φασματικές περιοχές.

Τέλος αξίζει να γίνει αναφορά στην ερευνητική εργασία των Rufino και Moccia (Rufino et. al, 2005), που χρησιμοποίησαν μία θερμική φωτομηχανή, μία πολυφασματική μηχανή τριών καναλιών και δύο υπερφασματικούς αισθητήρες που λειτουργούσαν στο ορατό εγγύς υπέρυθρο, στο πλαίσιο του πειραματισμού της ολοκλήρωσης ενός συνόλου διαφορετικών αισθητήρων τοποθετημένων σε μία μικρή μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα για την καταγραφή και διαχείριση φυσικών καταστροφών και συγκεκριμένα πυρκαγιών σε δάση.

Πίνακας 3.4: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές υπερφασματικές φωτομηχανές για UAV (Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον πίνακα 6 των Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής /μοντέλο	Ανάλυση (MPx)	Βάρος (kg)	Διαστάσεις αισθητήρα (mm ²)	Μέγεθος pixel (μm)	Φασματικό εύρος (nm)	Κανάλια /ανάλυση
Cubert	Si CCD	0.840	-	-	450-950	138
UHD 185						4.0nm
Headwall Photonics	Si CCD	0.68	9.6x9.6	7.4	400-1000	325
Micro-Hyperspec VNIR A-Series						1.9 nm
Headwall Photonics	Sc CCD	0.97	8.4x8.4	6.5	400-1000	370
Micro-Hyperspec VNIR E-Series						1.6 nm
Headwall Photonics	Si CCD	0.67	9.6x9.6	7.4	400-1000	325
Micro-Hyperspec VNIR G-Series						1.9 nm
Headwall Photonics	InGaAs	0.75	-	30	900-1700	67
Micro-Hyperspec NIR X-Series						6.0 nm
Headwall Photonics	InGaAs	0.63	-	25	900-1700	80
Micro-Hyperspec NIR T-Series						5.0 nm
Headwall Photonics	InGaAs	0.75	-	30	550-1650	96
Micro-Hyperspec Ext. VNIR X-Series						6.0 nm
Rikola Ltd.	CMOS	0.720	5.6x5.6	5.5	500-900	40
Hyperspectral Camera						10.0 nm
Surface Optics Corp.	-	1.250	-	9.9	400-1000	120
SOC710-GX Hyperspectral Imager						4.2nm



667nm **771nm** **834nm**
Εικόνα 3.4: (πάνω αριστερά) η Hyperspectral Camera της Ricola Ltd. (ricola.fi), (πάνω δεξιά) υπερφασματικά αποτυπώματα ανακλαστικότητας και νέφη σημείων για γεωπονία ακριβείας (Honkavaara et al., 2012) και (κάτω) μωσαϊκά μεμονωμένων φασματικών καναλιών κατασκευασμένα με το EnsoMOSAIC (vespadrones.com) από δεδομένα του ίδιου δέκτη

3.4.4. Θερμικές φωτομηχανές

Οι θερμικές μηχανές είναι συσκευές που σχηματίζουν εικόνες με τη χρήση αισθητήρων ικανών να ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία, παρόμοια με τις κοινές φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιούν το ορατό φως. Οι θερμικές μηχανές ανιχνεύουν ακτινοβολία συνήθως στην μακρά υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (περίπου 9.000-14.000 νανόμετρα ή 9-14 μm) και παράγουν εικόνες αυτής της ακτινοβολίας, που ονομάζεται θερμογράμματα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπεται από όλα τα αντικείμενα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν σύμφωνα με τον νόμο ακτινοβολίας μαύρου σώματος και καθιστά δυνατή την παρατήρηση του περιβάλλοντος απύσασ αντανάκλασης της ορατής ακτινοβολίας.

Η εμφάνιση και η λειτουργία των σύγχρονων θερμογραφικών φωτογραφικών μηχανών είναι συχνά παρόμοια με μια φωτογραφική μηχανή ορατού φάσματος ή μία βιντεοκάμερα.

Συχνά, η παρακολούθηση του θερμικού αποτυπώματος σε πραγματικό χρόνο αποκαλύπτει με μεγάλη ακρίβεια τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και ως εκ τούτου δεν είναι πάντα απαραίτητα η λήψη θερμογραφίας (και ως συνέπεια αυτού κάποια μονάδα εγγραφής για την ψηφιακή αποθήκευση της θερμογραφίας), παρά μόνο η FPV μέσω monitor ασύρματα συνδεδεμένου με τον αισθητήρα.

Το μεγαλύτερο τμήμα της φασματικής αυαισθησίας των μη εξειδικευμένων αισθητήρων CCD και CMOS, βρίσκεται στο φασματικό εύρος των μηκών κύματος του ορατού φωτός. Ωστόσο, αξιοποιώντας ένα μέρος των ακραίων περιοχών της φασματικής τους ευαισθησίας, δηλαδή το μέρος του υπέρυθρου φάσματος που καλείται εγγύς υπέρυθρο, είναι υπό προϋποθέσεις δυνατή η εξαγωγή θερμογραμμάτων με τους αισθητήρες αυτούς.

Οι εξειδικευμένες μηχανές θερμικής απεικόνισης χρησιμοποιούν συστοιχίες εστιακού επιπέδου (FPAs) που ανταποκρίνονται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (μέσα και μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρο). Οι πιο κοινοί τύποι θερμικών αισθητήρων είναι οι InSb, InGaAs, HgCdTe και QWIP. Οι νεότερες τεχνολογίες χρησιμοποιούν χαμηλού κόστους, ψυχόμενα microbolometers ως αισθητήρες FPA. Η ανάλυσή τους είναι σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη των μηχανών ορατού φάσματος, ως επί το πλείστον 160x120 pixels ή 320x240, μέχρι 640x512 για τα πιο ακριβά μοντέλα. Οι θερμικές κάμερες απεικόνισης είναι πολύ πιο ακριβές από ό,τι οι αντίστοιχες ορατού φωτός, και τα υψηλότερης τεχνολογίας μοντέλα συχνά περιορίζονται στις εξαγωγές γιατί χρησιμοποιούνται για στρατιωτικές εφαρμογές. Οι θερμικοί αισθητήρες που κάνουν χρήση bolometers ή τα περισσότερο ευαίσθητα μοντέλα, όπως τα InSbs απαιτούν κρυογονική ψύξη.

Οι εικόνες από τις υπέρυθρες κάμερες συνήθως έχουν ένα μόνο χρωματικό κανάλι, επειδή εν γένει κάνουν χρήση ενός αισθητήρα εικόνας που δεν διακρίνει διαφορετικά μήκη κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι αισθητήρες έγχρωμης εικόνας απαιτούν πολύπλοκη κατασκευή ικανή να διαφοροποιήσει τα μήκη κύματος, αν και το χρώμα έχει λιγότερη σημασία εκτός του κανονικού ορατού φάσματος, επειδή τα διαφορετικά μήκη κύματος δεν αντιστοιχούν ομοιόμορφα στο σύστημα της όρασης των χρωμάτων που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο.

Μερικές φορές αυτές οι μονοχρωματικές εικόνες εμφανίζονται σε ψευδό-χρώμα, όπου χρησιμοποιούνται περισσότερο οι μεταβολές της απόχρωσης παρά η διαφορές στην ένταση του χρώματος για να αναδειχθούν οι μεταβολές του σήματος. Αυτό είναι χρήσιμο γιατί, ενώ οι άνθρωποι έχουν πολύ μεγαλύτερο δυναμικό εύρος στην ανίχνευση της συχνότητας από το χρώμα συνολικά, η ικανότητα να βλέπει κανείς λεπτές διαφορές στη συχνότητα σε φωτεινές περιοχές είναι αρκετά περιορισμένη. Αυτή η τεχνική ονομάζεται density slicing. Για χρήση σε θερμικές απεικονίσεις, τα φωτεινότερα (θερμότερα) μέρη της εικόνας είναι συνήθως χρωματισμένα κόκκινα, οι ενδιάμεσες θερμοκρασίες κόκκινες και κίτρινες, και τα σκοτεινά (πιο δροσερά) μέρη μαύρα. Μια κλίμακα θα πρέπει να εμφανίζεται δίπλα σε μια ψευδοχρωματική εικόνα, σε σχέση με τις αποχρώσεις που αντιστοιχούν σε κάθε θερμοκρασία.

Στους μη ψυχόμενους θερμικούς αισθητήρες οι διαφορές θερμοκρασίας που αντιστοιχούν σε κάθε ρικελ του αισθητήρα είναι μικροσκοπικές, μια διαφορά 1° C του περιβάλλοντος προκαλεί διαφορά μόνο 0,03° στον αισθητήρα. Ο χρόνος απόκρισης του κάθε ρικελ είναι επίσης αρκετά αργός, της τάξης των δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου. Σημαντικά χαρακτηριστικά για την επιλογή της θερμικής κάμερας που θα τοποθετηθεί σε ένα UAV, είναι το φασματικό εύρος όπου παρουσιάζει ευαισθησία ο θερμικός αισθητήρας, η θερμική του ευαισθησία, οι διαστάσεις του και το βάρος της μηχανής.

Την τελευταία δεκαετία, υπήρξε αξιοσημείωτη πρόοδος στην σμίκρυνση των αισθητήρων θερμικής απεικόνισης. Αισθητήρες με χαμηλό βάρος, και μικρό μέγεθος, όπως εκείνοι που αναπτύχθηκαν από την FLIR, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε στρατιωτικό πλαίσιο για απομακρυσμένη αναγνώριση και είναι όλο και πιο συχνά σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση των δασικών πυρκαγιών (Rufino et al., 2005, Scholtz et al., 2011). Μελέτες αεροτριγωνισμού έχουν επίσης πραγματοποιηθεί με τη χρήση θερμικών εικόνων από UAV (Hartmann et al., 2012). Ο Πίνακας 3.5 συγκεντρώνει ορισμένα από τα υπάρχοντα προϊόντα στην οικογένεια των θερμικών αισθητήρων, κατάλληλα για ελαφρά UAV.

Πίνακας 3.5: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές θερμικές μηχανές για UAV
(Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον πίνακα 7 των Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής /μοντέλο	Ανάλυση (MPx)	Βάρος (kg)	Διαστάσεις (mm ²)	Μέγεθος pixel (μm)	Φασματικό εύρος (nm)	Θερμική ευαισθησία (mK)
FLIR	Uncooled VOx Microbolometer	0.238	ΜΔ	17	7.5-13.5	≤ 50
Quark 2 640	640x512					
FLIR	Uncooled VOx Microbolometer	0.070	10.8	17	7.5-13.5	≤ 50
TAU 2 640	640x512		x8.7			
Optris	FPA Uncooled	0.320	ΜΔ	25	7.5-13.0	≤ 80
PI 400	382x288					
Thermoteknix Systems Ltd.	Amorphous Silicon	0.105	16	25	8.0-12.0	≤ 50
Miricle 307K-25	640x480		x12.8			
Workswell	ΜΔ	0.305	ΜΔ	25	7.5-13.5	≤ 50
Thermal Vision Pro	640x512					

ΜΔ: μη διαθέσιμο

Οι θερμικές κάμερες χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές. Χρήση θερμικών καμερών γίνεται για επιτήρηση, παρακολούθηση, εντοπισμό και διάσωση ανθρώπων, εντοπισμό εστιών πυρκαγιών, εντοπισμό διαρροών θερμότητας για την βελτίωση απόδοσης ψύξης ή θέρμανσης σε κτίρια, αλλά επίσης είναι δυνατή η λήψη φωτογραφιών για την περεταίρω επεξεργασία των θερμογραφικών δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στον χειριστή την αναθεώρηση των εικόνων μετά την πτήση, και συνακόλουθα τις ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας ανά ρικελ, από όλες τις εικόνες που αποθηκεύτηκαν κατά την διάρκεια της πτήσης.



Εικόνα 3.5: (αριστερά) η Thermal Vision Pro της Workswell και (δεξιά) θερμογραφία (drone-thermal-camera.com)

3.4.5. LiDAR

LiDAR (Light Detection And Ranging), είναι μία μέθοδος καταγραφής, που κάνει χρήση του φωτός με τη μορφή ενός παλμικού laser για τη μέτρηση αποστάσεων προς τη Γη. Αυτοί οι παλμοί φωτός σε συνδυασμό με άλλα δεδομένα που καταγράφονται από το αερομεταφερόμενο σύστημα, παράγουν υψομετρικά δεδομένα (Γεωργόπουλος, 2013)

Ένα σύστημα LiDAR, που λειτουργεί τοποθετημένο σε μία εναέρια πλατφόρμα περιλαμβάνει τυπικά: μία συσκευή εκπομπής laser, έναν αισθητήρα, ένα μηχανισμό σάρωσης, συσκευές μέτρησης του χρόνου, μία IMU που καταγράφει διαρκώς τα διανύσματα των στροφών του εναέριου οχήματος, ένα εξειδικευμένο GPS που καταγράφει την τρισδιάστατη θέση του εναέριου οχήματος και μία διεπαφή υπολογιστή που διαχειρίζεται την επικοινωνία μεταξύ συσκευών και αποθήκευσης δεδομένων. Το σύστημα απαιτεί επίσης ένα σταθμό βάσης που έχει εγκατασταθεί σε γνωστή θέση (σε απόσταση το πολύ 50 km από το όχημα) και λειτουργεί ταυτόχρονα με το δέκτη ώστε αν διορθώνει τα δεδομένα που αποκτώνται από αυτόν και έτσι να βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων του αναέριου GPS. Η συσκευή λέιζερ εκπέμπει παλμούς (ή δέσμες) φωτός για να καθορίσει το εύρος προς έναν μακρινό στόχο. Η απόσταση από τον στόχο προσδιορίζεται με ακριβή μέτρηση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ της εκπομπής του παλμού και του χρόνου ανίχνευσης του ανακλώμενου σήματος (Gatziolis et al., 2008).

Δύο τύποι LiDAR είναι τα τοπογραφικά και τα βυθομετρικά. Τα τοπογραφικά LiDAR τυπικά χρησιμοποιούν ένα εγγύς υπέρυθρο λέιζερ, συνήθως μεταξύ 1040-1065 nm για να χαρτογραφήσουν τη γη, ενώ τα βυθομετρικά χρησιμοποιούν πράσινο φως που διεισδύει στο νερό, για τη μέτρηση του πυθμένα της θάλασσάς ή (εμμέσως) των αυξομειώσεων στις κοίτες των ποταμών. Προσθέτως, τα LiDAR χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή χαρτών υψηλής ανάλυσης, με εφαρμογές στη Γεωπληροφορική, αρχαιολογία, γεωγραφία, γεωλογία, γεωμορφολογία, σεισμολογία, δασοκομία, Τηλεπισκόπηση, φυσική της

ατμόσφαιρας, στη χαρτογράφηση του θερισμού με αερομεταφερόμενο λέιζερ (ALSM), στην υψομετρία λέιζερ και στη χαρτογράφηση των ισούψων καμπυλών (NOAA, 2015).

Τα τοπογραφικά LiDAR χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που διαφοροποιούνται μεταξύ τους στον τρόπο με τον οποίο οι ανακλώμενη ενέργεια ποσοτικοποιείται και καταγράφεται. Στα waveform LiDAR, η ενέργεια που ανακλάται πίσω στον αισθητήρα καταγράφεται ως ένα, περίπου, συνεχόμενο σήμα. Εν αντιθέσει, στα small-footprint LiDARs η ανακλώμενη ενέργεια αναφέρεται σε σημεία προσδιορισμένα στο χώρο και στο χρόνο.

Στα πλεονεκτήματα των LiDAR μπορούν να αναφερθούν, ότι ως μέθοδος υψομετρίας είναι πολύ πιο γρήγορη από τις συμβατικές καθώς παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού χιλιάδων υψομετρικών σημείων ανά ώρα, ενώ παρέχει δεδομένα με πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από την παραδοσιακή χαρτογραφία (Gatziolis et al., 2008).

Οι μετρήσεις των Small-footprint LiDARs, αφορούν σε συντεταγμένες στον τρισδιάστατο χώρο, με κάθε επιστροφή ενέργειας να συνοδεύεται από συγκεκριμένες χαρακτηριστικές τιμές που αφορούν είτε καθ' αυτή την επιστροφή είτε τον εκπεμφθέντα παλμό που την προκάλεσε. Οι χαρακτηριστικές αυτές ποσότητες είναι, η πυκνότητα του παλμού, η πυκνότητα της επιστροφής, η ένταση της επιστροφής, ο αριθμός επιστροφής, η γωνία σάρωσης, καθώς και άλλα μεταδεδομένα που προκύπτουν μετά την επεξεργασία, όπως οι γραμμές πτήσης και ο χρόνος του GPS.

Οι πηγές σφαλμάτων των LiDAR, αφορούν στη συλλογή πρωτογενών δεδομένων (θόρυβος κατά την καταγραφή, αβεβαιότητα μέτρησης απόστασης, σφάλμα καταγραφής γωνίας, επίδραση της ατμόσφαιρας), στην επεξεργασία των δεδομένων (γεωαναφορά, επιλογή σημείων στο έδαφος, φιλτράρισμα) στην παρεμβολή και τέλος στην ανάλυση/ οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (Γεωργόπουλος, 2013).

Τα LiDAR λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών τους και των πλεονεκτημάτων τους βρίσκουν σύμφωνα με τον Μπαλτσαβιά (1999) εφαρμογή στις κατωτέρω περιπτώσεις:

- Χαρτογράφηση περιοχών με ελάχιστη ή καθόλου υφή.
- Χαρτογράφηση δασών ή περιοχών με ψηλή βλάστηση. Τα συστήματα LiDAR που καταγράφουν την πρώτη και την τελευταία, ή ακόμη και περισσότερες από δύο επιστροφές του κάθε παλμού, μπορούν πιο εύκολα να παρέχουν το ύψος του δέντρου και το ύψος του εδάφους ενώ εκείνα με περισσότερες από δύο επιστροφές μπορούν, επιπλέον, να παρέχουν ένα κατακόρυφο προφίλ του αντικείμενου, επιτρέποντας έτσι παραγωγή άλλων σημαντικών παραμέτρων όπως η εκτίμηση της βιομάζας, το είδος δέντρου, κ.λπ. Βέβαια για μεγάλες γωνίες σάρωσης οι παλμοί παγιδεύονται στην βλάστηση και για τα σημεία αυτά δεν μπορεί να παραχθεί DEM (Γεωργόπουλος 2013).
- Χαρτογράφηση μακρών και λεπτών χαρακτηριστικών. Αυτό αφορά σε χάραξη ή χαρτογράφηση δρόμων και σιδηροδρομικών γραμμών, σχεδιασμό και παρακολούθηση δικτύων ενέργειας, παρακολούθηση της διάβρωσης των ακτών, διαχείριση παράκτιων ζωνών, συμφόρηση και μεταφορές, διαχείριση ποταμών και λοιπών υδάτινων πόρων, οπτικές ίνες, αγωγούς, φράγματα.

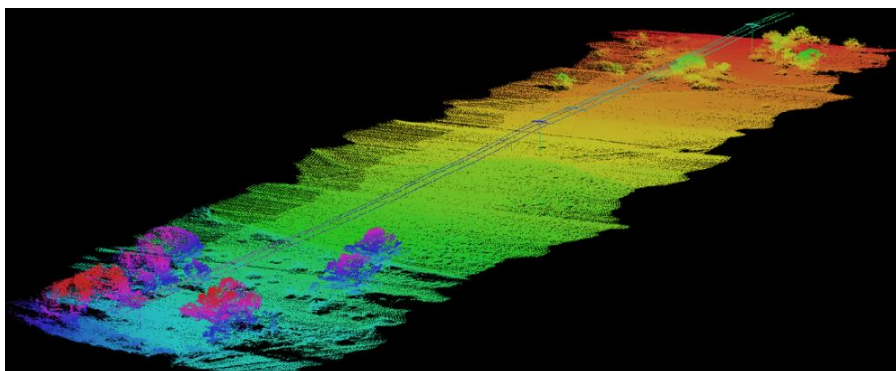
- Παραγωγή DSM σε αστικές περιοχές, για αστικό σχεδιασμό.
- Μεγάλης πυκνότητας σημεία και υψηλής ακρίβειας χαρτογραφικές εφαρμογές, όπως παρακολούθηση ορυχείων, χλωματερών, πλημμυρών και αναζήτηση φυσικών διαθέσιμων.
- Εφαρμογές που επιβάλλουν γρήγορη απόκριση. Τα LiDAR παρέχουν μετρήσεις αποστάσεων που μπορούν να μετατραπούν γρήγορα σε 3D συντεταγμένες. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών.

Η χρήση των σαρωτών laser (ή LiDAR) και των φωτομηχανών μεγάλου format είναι πλέον αρκετά κοινή στην παραδοσιακή Φωτογραμμετρία, όχι όμως και στην Φωτογραμμετρία με UAV, λόγω κυρίως της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης που συνδέει την απόδοση και το μέγεθος ή κόστος του σαρωτή laser είτε της σημαντικής επίδρασης της δυναμικής της πτήσης στη διαδικασία μέτρησης (Colomina, Molina, 2014).

Στον Πίνακα 3.6. παρουσιάζονται ορισμένοι αισθητήρες LiDAR που έχουν πρόσφατα ενσωματωθεί σε UAV. Πρόσφατες ενσωματώσεις περιλαμβάνουν το octocopter TerraLuma, το οποίο είναι εξοπλισμένο με ένα σύστημα Ibeo LUX LiDAR αυτοκινήτων (Wallace et al., 2012), ή το 3D flash LiDAR που περιγράφεται στο Zhou et al. (2012), βελτιστοποιημένο ως προς το μέγεθος και το βάρος του UAV του οποίου έγινε χρήση, παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα για προσομοιώσεις πτήσεων σε υψόμετρο 300 m. Επιπλέον, το HDL-32E της Velodynes έχει ενσωματωθεί με επιτυχία στο Phoenix AL-2 UAV πολλαπλών στροφείων της Phoenix Aerial Systems αλλά και στο LidarPod της Vulcan, και ο υδρογραφικός σαρωτής VQ-820-GU της RIEGL, έχει χρησιμοποιηθεί στο CamCopter S-100 της Schiebel.

Πίνακας 3.6: κοινοί και/ή αντιπροσωπευτικοί σαρωτές laser (Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής /μοντέλο	Μοτίβο σάρωσης	Βάρος (kg)	Εύρος (m)	Γωνιακή αν. (deg)	FOV (deg)	Laser class /λ (nm)	Συχνότητα (kp/s)
ibeo Automotive Systems	4 scanning	1	200	(H) 0.125	(H) 110	Class A	22
IBEO LUX	parallel lines			(V) 0.8	(V) 3.2	905	
RIEGL	1 scanning	-	≥ 1000	(H) 0.01	(H) 60	Class 3B	200
VQ-820-GU	line			(V) N/A	(V) N/A	532	
Velodyne	32 laser/detector	2	100	(H) -	(H) 360	Class A	700
HDL-32E	pairs			(V) 1.33	(V) 41	905	

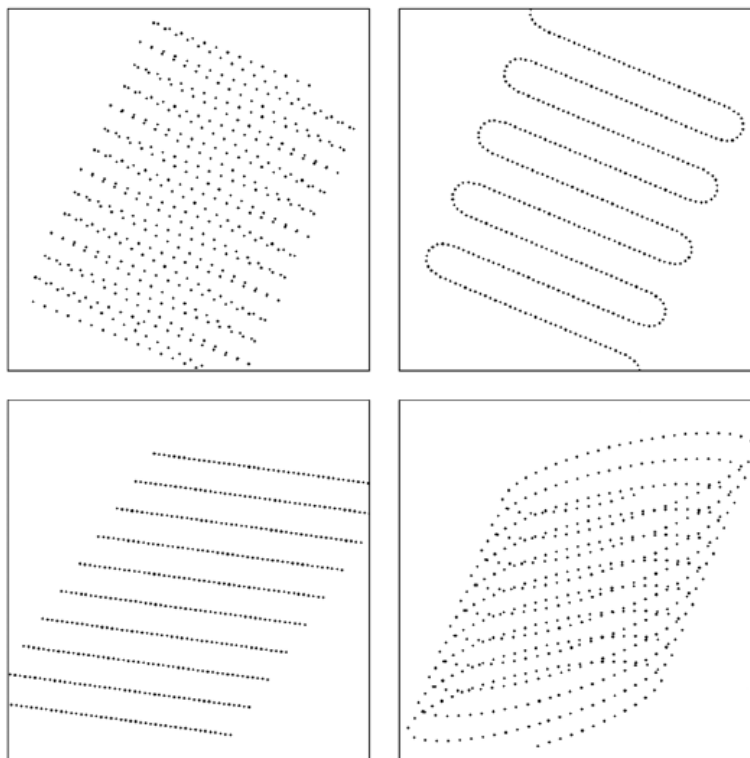


Εικόνα 3.6: απεικόνιση από μετρήσεις του IBEO LUX (ibeo-as.com)

3.4.5.1. Χαρακτηριστικά των LiDAR

α) **Συχνότητα σάρωσης:** Είναι ο αριθμός των παλμών ή δεσμών από ακτίνες που εκπέμπονται από το laser σε 1 s. Η συχνότητα σάρωσης συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα των διακριτών επιστροφών που καταγράφονται. Δηλαδή, μεγαλύτερη συχνότητα σάρωσης θα έχει ως συνέπεια και μεγαλύτερο αριθμό επιστροφών. Συνακόλουθα, μία συσκευή laser υψηλής συχνότητας μπορεί να παράγει επιστροφές επιθυμητής πυκνότητας ούσα τοποθετημένη σε εναέριο όχημα που πετά ψηλότερα και γρηγορότερα, από ότι μία χαμηλής συχνότητας συσκευή laser τοποθετημένη σε εναέριο όχημα που πετά χαμηλότερα και πιο αργά, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον χρόνο πτήσης και τα κόστη της συγκεκριμένης διαδικασίας (Baltsavias, 1999).

β) **Μοτίβο σάρωσης:** Είναι η χωρική κατανομή της δέσμης των επιθυμητών επιστροφών από μία επίπεδη επιφάνεια και εξαρτάται από τον μηχανισμό του οποίου γίνεται χρήση, προκειμένου να κατευθυνθούν οι παλμοί κατά μήκος της γραμμής πτήσης. Από τα τέσσερα μοτίβα σάρωσης που εν γένει χρησιμοποιούνται, το ταλαντευόμενο μοτίβο σάρωσης και το σταθεροποιημένο ισοδύναμό του, είναι τα πιο κοινά. Υπάρχουν όμως και κάποια μοτίβα πιο περίπλοκα, όπως κάποια που ακολουθούν ημιτονοειδείς καμπύλες (Wehr, 1999).



Σχήμα 3.8: Ναδρική άποψη θεωρητικών μοτίβων σάρωσης των συσκευών LiDAR (από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά), α. ταλαντευόμενο, β. σταθεροποιημένο ταλαντευόμενο, γ. παράλληλο, δ. ελλειπτικό (Gatziolis et al., 2008)

γ) **Απόκλιση δέσμης:** Οι τροχιές των φωτονίων που εκπέμπονται από μία συσκευή LiDAR αποκλίνουν ελαφρώς από τον άξονα διάδοσης της δέσμης και σχηματίζουν ένα στενό κώνο. Ο όρος απόκλιση της δέσμης αναφέρεται στην αύξηση της διαμέτρου της δέσμης που εμφανίζεται καθώς η απόσταση, μεταξύ της συσκευής laser και του επιπέδου που τέμνει τη δέσμη, αυξάνεται (Gatziolis et al., 2008).

δ) **Γωνία σάρωσης:** Είναι η γωνία που σχηματίζεται καθώς ο άξονας της δέσμης απομακρύνεται από το "εστιακό" επίπεδο της συσκευής LiDAR. Δεν πρέπει να συγχέεται με την γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα της δέσμης και του εναέριου οχήματος σε οριζόντια θέση, επειδή αυτή η γωνία επηρεάζεται από τις στροφές του εναέριου οχήματος. (Gatziolis et al., 2008). Η γωνία σάρωσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις 18° από το ναδίρ, καθώς μεγαλύτερες από αυτήν γωνίες μπορεί να οδηγήσουν σε παραμορφωμένα ανεπεξέργαστα δεδομένα (Γεωργόπουλος, 2013). Ο συνδυασμός της γωνίας σάρωσης και του ύψους πτήσης καθορίζει το πλάτος της λωρίδας σάρωσης.

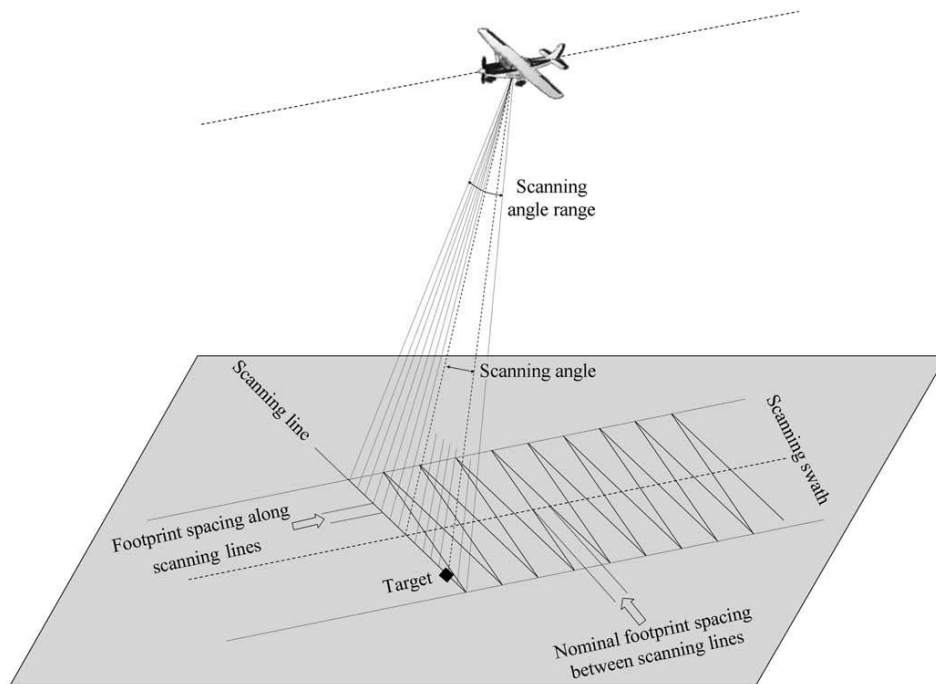
ε) **Διάμετρος αποτυπώματος:** Είναι η διάμετρος της δέσμης όταν αυτή τέμνεται από κάποιο επίπεδο τοποθετημένο κάθετα στον άξονά της σε μία απόσταση από την συσκευή laser ίση με το ονομαστικό ύψος πτήσης. Είναι επομένως συνάρτηση τόσο της απόκλισης της δέσμης όσο και του ύψους πτήσης πάνω από το αντικείμενο-στόχο που σαρώνεται. Η κατανομή της ενέργειας του παλμού δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια του αποτυπώματος. Μειώνεται ακτινικά από το κέντρο και μπορεί να προσεγγιστεί από μία δισδιάστατη γκαουσιανή κατανομή (Wehr, 1999).

στ) **Μήκος παλμού:** Είναι η διάρκεια του παλμού σε νανοδευτερόλεπτα (ns). Μαζί με τις ρυθμίσεις ψηφιοποίησης, καθορίζει την ανάλυση του εύρους του παλμού για πολλαπλές επιστροφές ή την χρονική απόσταση μεταξύ διαδοχικών επιστροφών από έναν παλμό (Gatziolis et al., 2008).

ζ) **Αριθμός επιστροφών (ανά δέσμη/παλμό):** Είναι ο μέγιστος αριθμός μεμονωμένων επιστροφών που μπορούν να αποσπαστούν από μία δέσμη/παλμό.

η) **Απόσταση αποτυπωμάτων:** Είναι η ονομαστική απόσταση μεταξύ των κέντρων των διαδοχικών δεσμών κατά μήκος και μεταξύ των γραμμών σάρωσης, η οποία, μαζί με την απόκλιση της δέσμης, καθορίζει την χωρική ανάλυση των δεδομένων LiDAR. Η απόσταση μεταξύ των αποτυπωμάτων είναι συνάρτηση της συχνότητας σάρωσης, του ύψους πτήσης και της ταχύτητας του εναέριου οχήματος.

θ) **Ρυθμίσεις ψηφιοποίησης:** Είναι προδιαγραφές αναπόσπαστες προς την επεξεργασία της οπισθοσκεδαζόμενης ενέργειας ενός παλμού, και είναι απαραίτητες για τον εντοπισμό μεμονωμένων επιστροφών. Ελέγχουν την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται προκειμένου ο παλμός να παραγάγει επιστροφή, και μαζί με το μήκος κύματος του παλμού, καθορίζουν την ελάχιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών επιστροφών από τον ίδιο παλμό.



Σχήμα 3.9: Απεικόνιση των χαρακτηριστικών σάρωσης κατά την συλλογή δεδομένων από σύστημα LiDAR. Το αεροσκάφος πετάει παράλληλα στο έδαφος και γίνεται χρήση ταλαντευόμενου μοτίβου (Gatziolis et al., 2008).

3.4.6. SAR

Ένα SAR (Synthetic-Aperture Radar), είναι ένα συνεκτικό, κυρίως εναέριο ή δορυφορικό, σύστημα radar που χρησιμοποιεί τη διαδρομή της πτήσης της πλατφόρμας για να προσομοιώσει μία εξαιρετικά μεγάλη κεραία ή συνθετικό άνοιγμα σε ηλεκτρονική μορφή, προκειμένου να παραγάγει υψηλής ανάλυσης απεικονίσεις που περιέχουν πληροφορία του αναγλύφου της περιοχής που καλύπτουν (radartutorial.eu, 2015). Τα SAR είναι ενεργητικοί δέκτες απεικόνισης, που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην περιοχή των μικροκυμάτων [0,01, 1] m, τα οποία περνούν μέσα από την ατμόσφαιρα, δέχονται το τμήμα της ακτινοβολίας που ανακλάται από το αντικείμενο, καταγράφουν την ένταση και τον χρόνο επιστροφής, μετρήσεις που με την κατάλληλη επεξεργασία δίνουν δισδιάστατες απεικονίσεις με τρισδιάστατη πληροφορία (Γεωργόπουλος, 2013). Συνεπώς, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μέρα και νύχτα, όντας δέκτες ενεργητικοί, και ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών, αφού εκπέμπουν μικροκυματική ενέργεια η οποία μπορεί να διαπερνά τα σύννεφα (USGS, 2015).

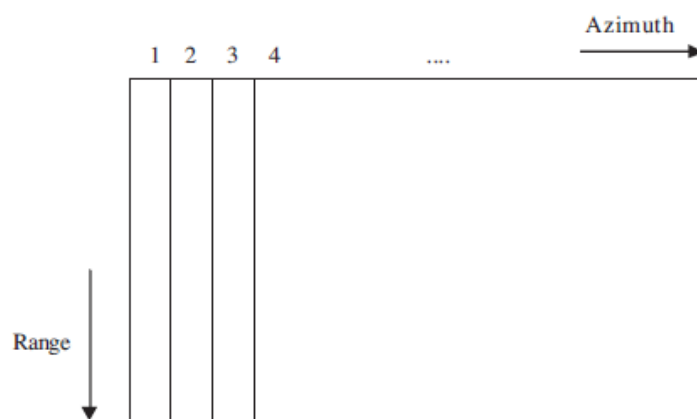
Τα SAR λειτουργούν με την ίδια αρχή που λειτουργούν τα SLAR, αλλά επιτυγχάνουν πολύ μεγαλύτερη ανάλυση με την βοήθεια της ψηφιακής επεξεργασίας των πολλαπλών καταγραφών (Γεωργόπουλος, 2013).

Ένα SLAR (Side-Looking Airborne Radar), είναι ένα εναέριο ή δορυφορικό radar απεικόνισης, και αντλεί το όνομά του από το γεγονός ότι η εκπομπή της δέσμης/ηλεκτρομαγνητικού

παλμού γίνεται από τα πλάγια της πλατφόρμας κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων (USGS, 2015). Οι εικόνες που σχηματίζονται από τα SLAR, είναι φτωχές σε αξιμουθιακή ανάλυση. Όσο μικρότερο είναι το αξιμουθιακό εύρος δέσμης, τόσο καλύτερη η αξιμουθιακή ανάλυση. Προκειμένου να παραχθούν υψηλής ανάλυσης εικόνες με ένα SLAR, πρέπει να χρησιμοποιηθεί υπερβολικά μεγάλη, από πρακτικής άποψης, κεραία ή μήκη κύματος πολύ μικρά, πράγμα πρακτικά αδύνατο γιατί τότε η εξασθένισή τους από την ατμόσφαιρα γίνεται σημαντική. Άλλωστε, στις εναέριες εφαρμογές και ιδιαίτερα όσον αφορά στα UAV, το μέγεθος και το βάρος της κεραίας είναι περιορισμένα. Έτσι τα SAR, δίνουν τη λύση στο ανωτέρω πρόβλημα, αφού είναι ένας τρόπος να επιτευχθεί καλύτερη ανάλυση μέσω της επεξεργασίας του σήματος (Chan, Koo, 2008).

Για την εκτέλεση μετρήσεων, τα SAR, ολοκληρώνουν μία σειρά από επιμέρους κύκλους εκπομπής/λήψης (PRT's), με τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτούς να αποθηκεύονται ηλεκτρονικά. Η επεξεργασία των σημάτων χρησιμοποιεί το μέγεθος και την φάση των λαμβανόμενων σημάτων κατά τη διάρκεια των διαδοχικών παλμών από τα στοιχεία του συνθετικού ανοίγματος. Μετά από ένα δεδομένο αριθμό κύκλων, τα αποθηκευμένα δεδομένα ανασυνδυάζονται για τη δημιουργία μίας εικόνας υψηλής ανάλυσης του εδάφους πάνω από το οποίο γίνεται η πτήση (radartutorial.eu, 2015).

Ο κύριος στόχος της επεξεργασίας σημάτων στα SAR είναι ο υπολογισμός συντεταγμένων (εύρος και αξιμούθιο) των στόχων που βρίσκονται σε ένα "χάρτη" με λωρίδες. Ο χώρος των δεδομένων SAR είναι μία εννοιολογική συλλογή δεδομένων SAR οργανωμένων κατά σειρά εύρους (1, 2, 3, 4, ...), με το πρώτο σημείο δεδομένων από κάθε γραμμή στην κορυφή και το τελευταίο σημείο δεδομένων από κάθε γραμμή στο κάτω μέρος. Μια γραμμή εύρους είναι μια καταγραφή όλων των ανακλάσεων από έναν ενιαίο εκπεμπόμενο παλμό. Αυτός ο χώρος δεδομένων φαίνεται στην εικόνα 3.10 (Chan, Koo, 2008).



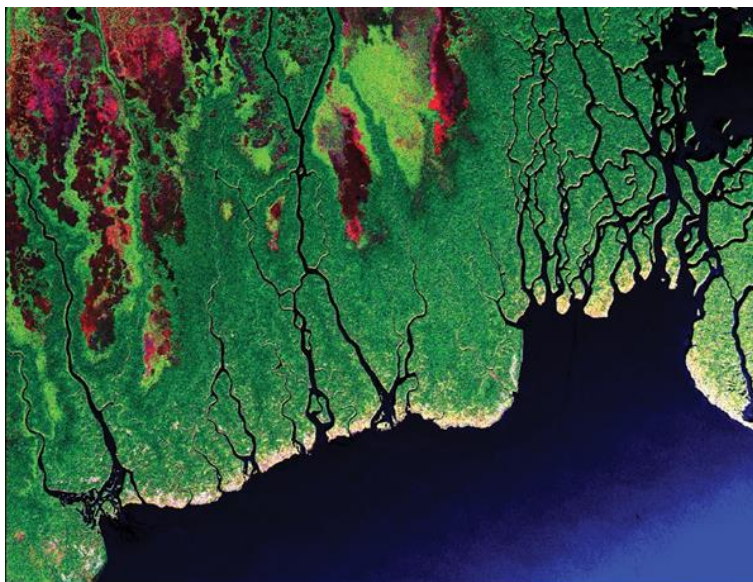
Σχήμα 3.10: Δισδιάστατος χώρος δεδομένων SAR (Chan, Koo, 2008)

Γενικά, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την επεξεργασία δεδομένων SAR, ο Δισδιάστατος Αλγόριθμος και ο Αλγόριθμος Επεξεργασίας Εύρους Doppler. Ο πρώτος επεξεργάζεται δεδομένα που αφορούν σε εύρη και αξιμούθια ταυτόχρονα, ενώ ο δεύτερος εφαρμόζει επεξεργασία συμπίεσης για τα εύρη που ακολουθείται από επεξεργασία συμπίεσης για τα

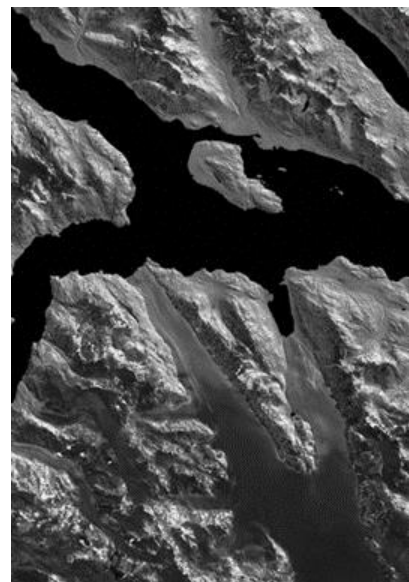
αζιμούθια. Ωστόσο, ο Δισδιάστατος Αλγόριθμος απαιτεί μεγαλύτερη μνήμη και υπολογιστική ισχύ (USGS, 2015).

Τα ραδιοκύματα είναι των SAR είναι πολωμένα. Διαφορετικά υλικά ανακλούν τα κύματα του ραντάρ με διαφορετικές εντάσεις, αλλά ανισότροπα υλικά όπως το γρασίδι συχνά ανακλούν διαφορετικές πολώσεις με διαφορετικές εντάσεις. Μερικά υλικά μετατρέπουν επίσης μια πόλωση σε μία άλλη. Εκπέμποντας ένα μίγμα πολώσεων και χρησιμοποιώντας κεραιές λήψης με μια συγκεκριμένη πόλωση, αρκετές εικόνες μπορούν να συλλέγονται από την ίδια σειρά παλμών. Η τεχνική αυτή ονομάζεται **πολωσιμετρία**. Συχνά τρεις πολώσεις (HH-pol, VV-pol, VH-pol) χρησιμοποιούνται ως τα τρία κανάλια χρώματος σε μια εικόνα που συντίθεται. Η ερμηνεία των προκύπτων χρωμάτων απαιτεί σημαντική δοκιμή των γνωστών υλικών (Vasile, Besic, 2013 και uavsar.jpl.nasa.gov, 2015).

Αν είναι διαθέσιμες δύο παρατηρήσεις του ανάγλυφου από πολύ κοντινές θέσεις, τότε είναι δυνατό να εκτελεστεί η σύνθεση ανοίγματος, προκειμένου να παρέχει ανάλυση αντίστοιχη με σύστημα SAR που απαιτείται και για τις δύο χωριστές παρατηρήσεις μαζί (Chan, Koo, 2008). Αν δύο παρατηρήσεις λαμβάνονται ταυτόχρονα (ίσως με την τοποθέτηση δύο κεραιών στο ίδιο αεροσκάφος, σε κάποια απόσταση μεταξύ τους), τότε κάθε διαφορά φάσης θα περιέχει πληροφορίες σχετικές με τη γωνία από την οποία επέστρεψε η ηχώ του ραντάρ (χρήση αρχών της συμβολομετρίας). Συνδυάζοντας αυτό με τις πληροφορίες απόστασης, μπορεί κανείς να προσδιορίσει τη θέση σε τρεις διαστάσεις του εικονοστοιχείου. Μπορεί δηλαδή να εξαχθεί υψόμετρο του ανάγλυφου, όπως επίσης και ανακλαστικότητα, παράγοντας DEM με ένα μόνο πέρασμα του αεροπλάνου. Η τεχνική αυτή καλείται **συμβολομετρία** με SAR ή IfSAR (Γεωργόπουλος, 2013).

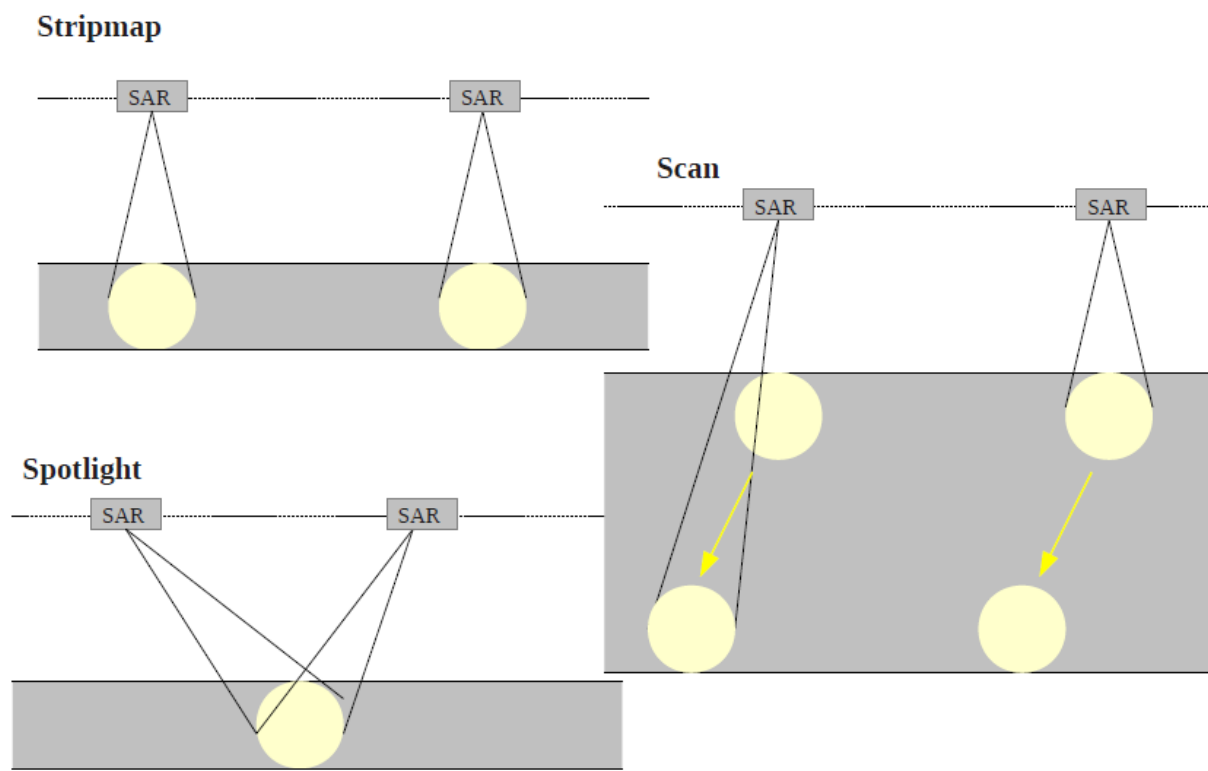


Εικόνα 3.7: πολωσιμετρική εικόνα τμήματος της Αλάσκα από το σύστημα UAVSAR, Μάιος 2012) (asf.alaska.edu)



Εικόνα 3.811: εικόνα IfSAR του Glacier Bay National Park and Preserve, Αύγουστος 2012 (lta.cr.usgs.gov)

Οι συνήθεις τεχνικές SAR εικονοληψίας είναι οι: Stripmap (ανάλυση ~3m, κάλυψη ~30km x 50km), scan (ανάλυση ~20m, κάλυψη ~100km x 150km), spotlight (ανάλυση ~2m, κάλυψη ~10km x 10km), που απεικονίζονται και στην εικόνα 3.14. Στις εικόνες SAR οι λείες επιφάνειες που ανακλούν σχεδόν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία εμφανίζονται σχεδόν μαύρες (ποτάμια, θάλασσες, δρόμοι), ενώ οι τραχείες (βλάστηση) με φωτεινές μεταβολές στην επιφάνειά τους, λόγω διάχυσης της ακτινοβολίας. Μεταβολές μεγάλης έκτασης στην γήινη επιφάνεια τείνουν να εμφανίζονται φωτεινές από τη μία πλευρά(πλευρά που ακτινοβολείται) και σκοτεινές από την άλλη. Κτίσματα με γωνιακή κατασκευή λειτουργούν σαν ανακλαστήρες και εμφανίζονται φωτεινά (Γεωργόπουλος, 2013).

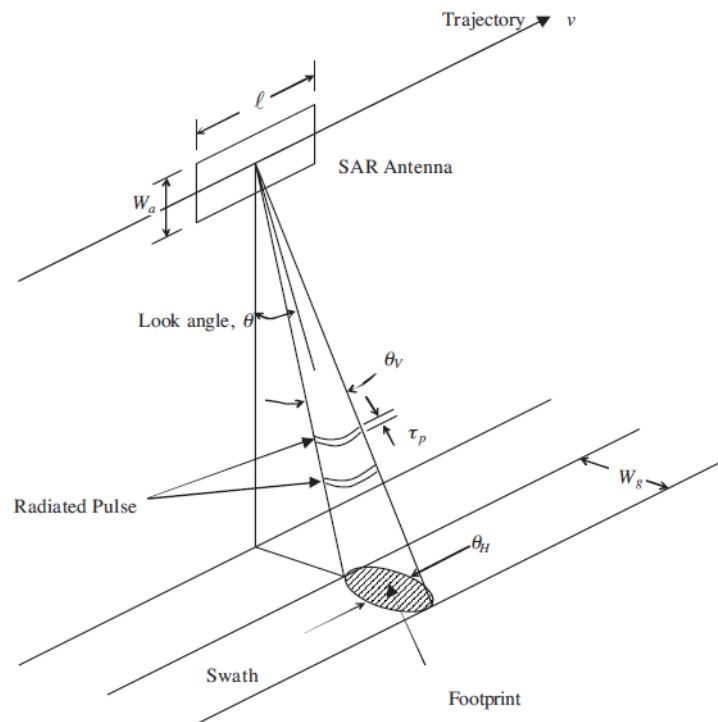


Σχήμα 3.11: Τεχνικές SAR εικονοληψίας (Γεωργόπουλος, 2013)

Όσον αφορά στη χρήση των SAR για την Τηλεπισκόπηση, είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για χώρες με τροπικό κλίμα. Με κατάλληλη επιλογή συχνότητας λειτουργίας, το σήμα μικροκυμάτων μπορεί να διαπεράσει σύννεφα, ομίχλη, βροχή και καπνό με πολύ μικρή εξασθένιση, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία σε αντίξοες καιρικές συνθήκες που εμποδίζουν τη χρήση ορατών/ υπέρυθρων φωτομηχανών. Τα SAR έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ χρήσιμα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων της παρακολούθησης των θαλασσών και των πάγων, της εξόρυξη, της παρακολούθησης της πετρελαϊκής ρύπανσης, της ωκεανογραφίας, της ταξινόμηση των εδάφους (Chan, Koo, 2008), της αποτύπωσης και παραγωγής DEM, του εντοπισμού κινούμενων στόχων και του ελέγχου στην κυκλοφορία

των οχημάτων, και τέλος, της παρακολούθησης μικρομετακινήσεων, κτισμάτων, χρήσεων γης, φυσικών καταστροφών και παράκτιων περιοχών (Γεωργόπουλος, 2013).

Τα κύρια χαρακτηριστικά των SAR που ενδιαφέρουν για την επιλογή μίας τέτοια συσκευής ως φορτίου για PaRS με UAV, είναι η γωνία θέασης (ή το αντίστοιχο αζιμούθιο), το αποτύπωμα, το πλάτος της λωρίδας σάρωσης, η χωρική ανάλυση των δεδομένων SAR, η εκπεμπόμενη ισχύς, τα φασματικά κανάλια στα οποία λειτουργεί η συσκευή και το βάρος.



Σχήμα 3.12: η γεωμετρία του radar απεικόνισης SAR (Chan, Koo, 2008)

Η προσαρμογή των SAR για τα UAV (σμίκρυνση σε σχέση με τις επιδόσεις) δεν έχει ακόμη επιλυθεί. Ωστόσο, υπάρχει κάποια βιβλιογραφία σχετικά με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, και παγκοσμίως έχουν αναφερθεί λίγες προσπάθειες ενσωμάτωσης σε UAV. Πράγματι, η καλή απόδοση των SAR ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών είναι ένα πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, όχι μόνο για τις στρατιωτικές εφαρμογές, οι οποίες παραδοσιακά προέκριναν την τεχνολογία SAR, αλλά και για τις εφαρμογές PaRS (Colomina, Molina 2014). Ο Remy et al. (2012) περιγράφει ένα νέο σύστημα για UAV, με βάση το συνδυασμό ραντάρ των X- και P-ζωνών (~2,5 – 3,8 cm και ~30 – 100 cm μήκη κύματος αντίστοιχα) για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους και υψομέτρων σε δασώδεις περιοχές. Ο Essen et al. (2012), χρησιμοποίησε μία συσκευή SAR της W-ζώνης (~2,7 – 4 mm μήκος κύματος) ενσωματωμένη στο UAV τύπου ελικόπτερου, NEO S300, για να παρατηρήσει μικρής έκτασης χαρακτηριστικά έως 15 cm. Ο Schulz (2011), ανέπτυξε μία

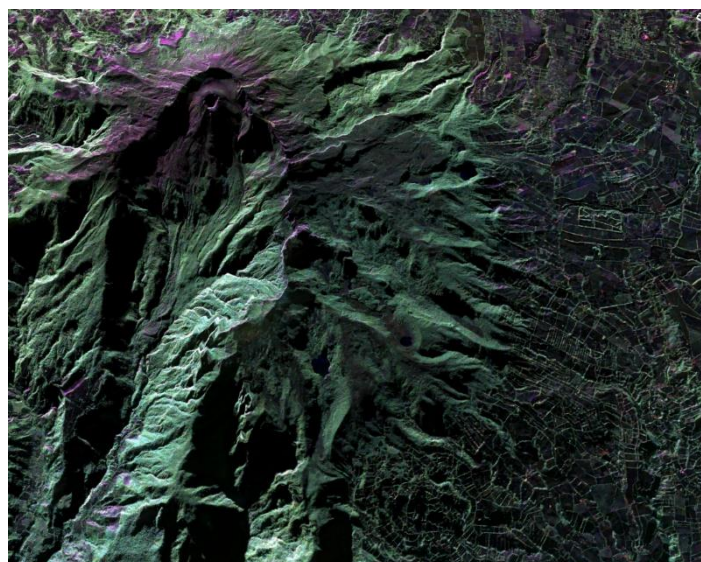
πλατφόρμα βασισμένη στο NEO S-350 της SwissUAV που παρουσιάζεται μαζί με την ενσωμάτωση ενός SAR με πομπό μικροκυμάτων, μήκους κύματος της τάξης των χιλιοστών.

Στον πίνακα 3.7 συγκεντρώνονται οι σύγχρονοι δέκτες SAR που έχουν ενσωματωθεί σε UAV. Το σύστημα UAVSAR, που αναπτύχθηκε από τη NASA JPL (uavsar.jpl.nasa.gov, 2015), είναι ενσωματωμένο στο Global Hawk UAV. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την ενσωμάτωση αυτή δόθηκαν στη Διάσκεψη για Ωφέλιμα φορτία UAS στην Ουάσιγκτον, στις 19 Ιουνίου, 2012. Το PicoSAR της SELEX Galileo έχει επίσης ενσωματωθεί σε ένα Integrator UAS, της InSitu (Colomina, Molina 2014).

Πίνακας 3.7: κοινές και/ή αντιπροσωπευτικές συσκευές SAR για UAV (Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής /μοντέλο	Φασματικά κανάλια	Βάρος (kg)	Εκπεμπόμενη Ισχύς (W)	Ανάλυση (m)
Fraunhofer FHR	W	-	0.1	0.15
MIRANDA				
IMSAR	X and Ku	1.58	1.0	[0.3, 5.0]
NanoSAR B				
NASA JPL UAVSAR	L	200	2000	2.00
SELEX Galileo	X	10	-	1.00
PicoSAR				

Στο βάρος του NanoSAR B, δεν περιλαμβάνεται η κεραία και η IMU.



Εικόνα 3.912: ψευδοχρωματική εικόνα του ηφαιστείου Galeras στην Κολομβία, που συλλέχθηκε με τον UAVSAR, στις 13 Μαρτίου 2013 (nasa.gov)

3.4.7. Βοηθητικός εξοπλισμός

3.4.7.1. Gimbals

Στις εφαρμογές Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης με UAV, και κυρίως στα πολλαπλών στροφείων, όταν το φορτίο των αισθητήρων δεν έχει επιλεγεί από τον κατασκευαστή (και η μηχανή δεν έχει σταθερή θέση όπως στα περισσότερα UAV σταθερών πτερυγίων), γίνεται χρήση gimbals για την σταθεροποίηση των φωτομηχανών ή των radar κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα gimbals αυτά, χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές λειτουργίας με εκείνα των stable platform system INS, κάνουν δυνατή την ελεγχόμενη κίνηση της φωτομηχανής ή του δέκτη γενικότερα, ενώ ταυτόχρονα βοηθούν και τη μείωση των κραδασμών κατά τη διάρκεια της πτήσης, ώστε οι μετρητικές εικόνες που παράγονται να έχουν περιορισμένες θολούρες, θόρυβο, μεταβολές κλίμακας από την απαιτούμενη και να μπορεί ευκολότερα να γίνει επεξεργασία ή μετεπεξεργασία τους.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες gimbals, τα gimbals 2-αξόνων και τα gimbals 3-αξόνων. Τα gimbals 2-αξόνων σταθεροποιούν την μηχανή στους δύο άξονες (συνήθως Pitch και Roll) και τα gimbals 3-αξόνων σταθεροποιούν την μηχανή και στους 3 άξονες, και δίνοντας τον έλεγχο σε ένα περισσότερο άξονα επιτρέπουν μεγαλύτερη μείωση των κραδασμών. Ο τρίτος άξονας επιτρέπει τον έλεγχο του yaw. Οι κινητήρες στα gimbals, που κάνουν δυνατή τη στροφή γύρω από 2 ή τρεις άξονες μπορεί να είναι servos ή brushless, οι πρώτοι αποτελούν παλιότερη τεχνολογία που επιτρέπει την στροφή περίπου 45 μοίρες προς κάθε κατεύθυνση για κάποιον άξονα, ενώ οι δεύτεροι επιτρέπουν στροφή 360° (περιστροφή) των μηχανών, συχνά παρέχουν δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής ενώ έχουν και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Ο χειρισμός του gimbal σε ένα UAV γίνεται με τη χρήση χειριστηρίου απομακρυσμένου ελέγχου στην περίπτωση της χειροκίνητης λειτουργίας ενός UAV και μέσω κάποιου προγράμματος αυτόματου πιλότου στην περίπτωση της αυτόνομης πτήσης (βλ. ενότητες 4.5.1 και 4.4.3 αντίστοιχα).

Ορισμένα παραδείγματα gimbals που χρησιμοποιούνται σε UAV είναι,

- **2-axis:** το Zenmuse H3-2D της DJI, το T-2D της Tarot και το G-2D της Walkera
- **3-axis:** η σειρά Zenmuse Z-15 της DJI, το 5D-3 axis gimbal της Tarot και η σειρά G-3D της Walkera



Εικόνα 3.10: το Zenmuse 3-axis gimbal της DJI (dji.com)

3.4.7.2. Συστήματα FPV

Η First-Person view (FPV), επίσης γνωστή και ως remote-person view (RPV) ή απλά video piloting, είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ενός τηλεκατευθυνόμενου οχήματος από την άποψη του πιλότου. Πιο συχνά χρησιμοποιείται για την πλοήγηση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων. Το όχημα οδηγείτε από μία προοπτική πρώτου προσώπου μέσω μίας φωτομηχανής τοποθετημένης σε αυτό, τροφοδοτώντας ασύρματα με εικόνα μία οθόνη βίντεο ή FPV γυαλιά.

Υπάρχουν δύο βασικά συστατικά μέρη ενός συστήματος FPV: το αερομεταφερόμενο (on-board) τμήμα και το επίγειο τμήμα. Ένα τυπικό σύστημα FPV αποτελείται από μία κάμερα και ένα πομπό βίντεο αναλογικού σήματος τοποθετημένα στο αεροσκάφος με ένα δέκτη βίντεο και μια οθόνη στο έδαφος. Πιο προηγμένα συστήματα περιλαμβάνουν και ένα μέσο για την καταγραφή της εικόνας που έλαβε μαζί με πιο εξελιγμένες κεραίες για την επίτευξη μεγαλύτερης εμβέλειας και σαφήνειας.

Τα συστήματα FPV χρησιμοποιούνται ευρέως στις Φωτογραμμετρικές εφαρμογές, για την παρακολούθηση σε πρώτο πρόσωπο και την ακριβή μετακίνηση πάνω από το αντικείμενο μελέτης του UAV και του αερομεταφερόμενου εξοπλισμού, προκειμένου οι μετρήσεις που λαμβάνονται, συνήθως εικόνες, να απεικονίζουν το επιθυμητό κομμάτι του αντικείμενου μελέτης υπό κατάλληλη γωνία. Ειδικά στην περίπτωση της χειροκίνητης πτήσης (βλέπε ενότητα 4.5), όπου το UAV δεν παρακολουθείται μέσω του λογισμικού επίγειου ελέγχου όπως στην αυτόματη πτήση (βλέπε ενότητα 4.4), το σύστημα FPV αποτελεί σημαντικό συστατικό στοιχείο του απαιτούμενου εξοπλισμού για τον χειρισμό του εναέριου οχήματος.



Εικόνα 3.11: σύστημα FPV για το Phantom 2 της DJI (uavdirect.com)

3.4.7.3. Μπαταρίες

Η πλειονότητα των εμπορικών UAV τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Υπάρχει μικρός αριθμός βενζινοκινούμενων συστημάτων UAV αλλά αυτά είναι ιδιαίτερα ακριβά, περιορισμένα από τις κείμενες διατάξεις και συγκεκριμένου πεδίου εφαρμογής. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνταν αρχικά ήταν Νικελίου Καδμίου ή άλλου κράματος Νικελίου αλλά πλέον έχουν επικρατήσει οι μπαταρίες Λιθίου, λόγω της μεγάλης τους ενεργειακής πυκνότητας. Οι μπαταρίες αυτές έχουν αρκετή αποθηκευμένη ενέργεια ώστε να επιτρέπουν πτήσεις τουλάχιστων 5-25 λεπτών ανάλογα με το μοντέλο και το φορτίο του εναέριου οχήματος.

Ενώ τα χαμηλού κόστους μικρότερα UAV τείνουν να έχουν περιορισμένη διάρκεια πτήσης, η διάρκειά τους μπορεί να επιμηκυνθεί όταν: χρησιμοποιούνται ελαφροί αισθητήρες, επιλέγεται το κατάλληλο μέγεθος στροφείων (μόνο για τα multicopters), η πτήση πραγματοποιείται σε καλές καιρικές συνθήκες (ιδανικά σε συνθήκες νηνεμίας και όχι πολύ υψηλής θερμοκρασίας), όταν οι μπαταρίες σε κάθε τους χρήση αδειάζουν μόνο κατά 20% - 40% και αποθηκεύονται σωστά.

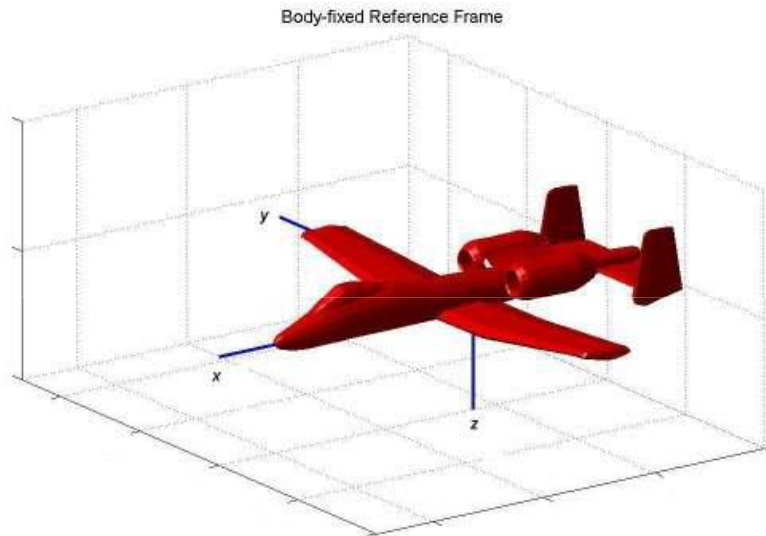
4. ΠΛΟΗΓΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στα στοιχεία της πλοήγησης των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων που ενδιαφέρουν για τις φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά αφ' ενός σε βασικές πληροφορίες που αφορούν στην αεροδυναμική των UAV και αφ' ετέρου στον προγραμματισμό λήψης εικόνων (μόνο όσον αφορά στις φωτομηχανές ορατού φάσματος) και πώς αυτός γίνεται πράξη και στην περίπτωση της αυτόνομης και στην περίπτωση της χειροκίνητης πλοήγησης – μέσα από αναφορά τόσο στον καθ' αυτό προγραμματισμό όσο και στον απαραίτητο εξοπλισμό και τα χρησιμοποιούμενα λογισμικά για κάθε περίπτωση.

4.1. Βασικά Στοιχεία Αεροδυναμικής των UAV

4.1.1. Το σύστημα αναφοράς του εναέριου οχήματος

Η πλοήγηση του εναέριου οχήματος γίνεται στον τρισδιάστατο χώρο, και επομένως είναι απαραίτητος ο έλεγχος των στροφών του και στις τρεις διαστάσεις. Κατά την πτήση, το όχημα στρέφεται γύρω από το κέντρο βάρους του. Είναι δυνατό να οριστεί ένα τρισσορθόγωνιο σύστημα αξόνων με αρχή το κέντρο βάρους του οχήματος. Έτσι μπορεί να οριστεί ο προσανατολισμό του αεροσκάφους από τα διανύσματα των στροφών του οχήματος γύρω από αυτούς τους κύριους άξονες (nasa.gov, 2015). Το σύστημα αυτό, που θα καλείται σύστημα αναφοράς του οχήματος, χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κίνησης του οχήματος, της σχετικής με τη γη. Ένα τέτοιο δεξιόστροφο, ορθογώνιο σύστημα περιγράφεται στο σχήμα 4.1. Η εικόνα παρουσιάζει την συνήθη προσέγγιση που υιοθετείται για τα UAV σταθερών πτερυγίων, όπου η γεωμετρία του σώματος του οχήματος διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή των αξόνων. Για τα εναέρια οχήματα πολλαπλών στροφείων, που, τουλάχιστον ο σκελετός του αεροσκάφους, είναι συνήθως συμμετρικός ως προς οποιοδήποτε σύστημα με αρχή το κέντρο μάζας του, η γεωμετρία του δεν είναι μεγάλης σημασίας για την επιλογή των αξόνων. Για το λόγο αυτό, εδώ επιλέγεται η αναπαράσταση του συστήματος του UAV και των στροφών του με τη χρήση σχημάτων που απεικονίζουν εναέρια οχήματα σταθερών πτερυγίων. Εδώ, ο θετικός άξονας x , ή κατά μήκος άξονας, κατευθύνεται προς τα έξω διαμέσου της μύτης του αεροσκάφους. Ο θετικός άξονας των z κατευθύνεται προς τα κάτω, διερχόμενος από το κάτω τμήμα του οχήματος. Ο θετικός άξονας y , ή εγκάρσιος άξονας, είναι ορθογώνιος στον άξονα x και στον άξονα z και εξελίσσεται περίπου κατά μήκος της δεξιάς πτέρυγας (όπως φαίνεται παρατηρώντας από την ουρά προς τη μύτη) (Mylin, 2007).



Σχήμα 4.1: Σύστημα αναφοράς του οχήματος (Mylin, 2007)

4.1.2. Γωνίες Euler

Ένα άκαμπτο σώμα έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας που αφορούν στην μεταφορική κίνηση και τρεις που αφορούν στην περιστροφική κίνηση. Οποιαδήποτε κίνηση του κάθε σώματος μπορεί να αναλυθεί σε αυτούς τους έξι βαθμούς ελευθερίας. Εδώ, θα εξεταστεί μόνο η περιστροφική κίνηση. Σύμφωνα με το θεώρημα της στροφής του Euler, οποιαδήποτε στροφή μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τρεις γωνίες που αναφέρονται ως γωνίες του Euler. Με άλλα λόγια, ένα σύνολο από τρεις γωνίες του Euler χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον προσανατολισμό ενός στερεού σώματος (mathworld.wolfram.com).

Μία μεμονωμένη γωνία Euler καθορίζει μια στροφή του άκαμπτου σώματος γύρω από ένα δεδομένο άξονα ενός συστήματος συντεταγμένων διαμέσου ενός πίνακα στροφής. Καθώς ο πολλαπλασιασμός πινάκων δεν είναι πράξη αντιμεταθετική, η σειρά των περιστροφών αποτελεί μια μεταβλητή. Ανάλογα με την ακολουθία των στροφών, υπάρχουν δώδεκα διαφορετικά σύνολα από γωνίες Euler. Οι αλληλουχίες των στροφών συνήθως συμβολίζονται με τα ψηφία ένα έως τρία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Εδώ θα αναλυθεί η αλληλουχία στροφών 321. Οι γωνίες ορίζονται ως θετικές σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού για τα δεξιόστροφα συστήματα συντεταγμένων (Mylin, 2007).

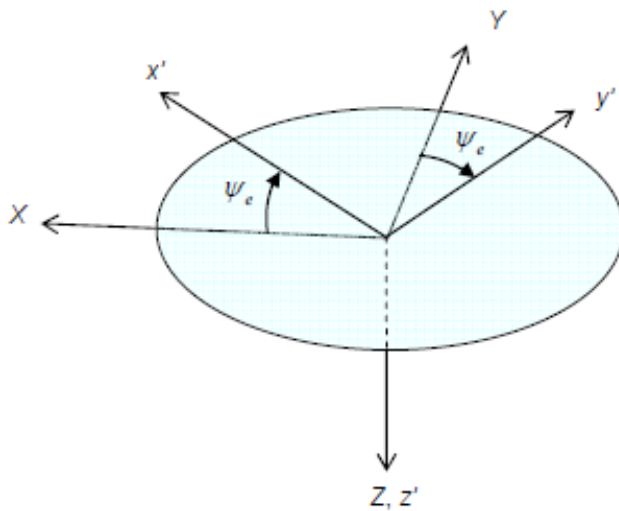
Σειρά	Άξονες	Σειρά	Άξονες	Σειρά	Άξονες
123	x-y-z	212	y-x-y	312	z-x-y
121	x-y-x	213	y-x-z	313	z-x-z
131	x-z-x	231	y-z-x	321	z-y-x
132	x-z-y	232	y-z-y	323	z-y-z

Πίνακας 4.1: οι ακολουθίες των στροφών Euler

4.1.3. Η σειρά στροφών Z-Y-X

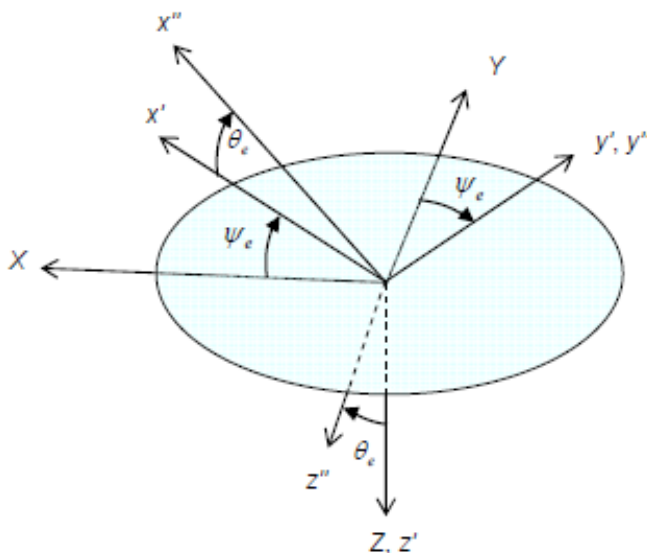
Αυτή η σειρά στροφών του Euler έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην αεροναυσιπλοΐα. Η σειρά θα πρέπει να οριστεί ως οι γωνίες που καθορίζουν τον προσανατολισμό του συστήματος συντεταγμένων xyz ως προς το σταθερό σύστημα αναφοράς του οχήματος. Το σύστημα ορίζεται ως εξής:

- 1) Μία θετική στροφή ψ γύρω από τον άξονα z , που έχει ως αποτέλεσμα το $x'y'z'$



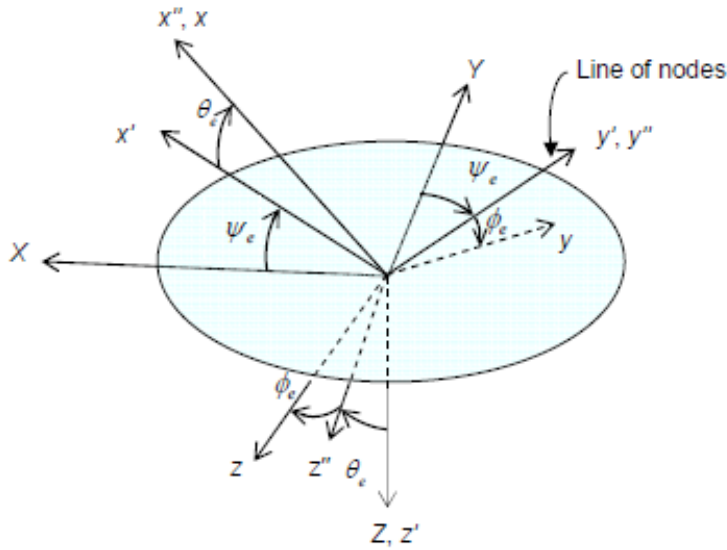
Σχήμα 4.2: Στροφή κατά ψ (Mylin, 2007)

- 2) Μία θετική στροφή θ γύρω από τον άξονα y' , έχει αποτέλεσμα το $x''y''z''$



Σχήμα 4.3: Στροφή κατά θ (Mylin, 2007)

3) Μία θετική στροφή φ γύρω από τον άξονα x'' , έχει αποτέλεσμα το xyz



Σχήμα 4.4: Στροφή κατά φ (Mylin, 2007)

Η σειρά των στροφών παρουσιάζεται προοδευτικά στα σχήματα 4.2 – 4.4. Ο άξονας περί τον οποίο πραγματοποιείται η στροφή θ (άξονας y') είναι γνωστός και ως γραμμή κόμβων (line of nodes), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Οι εξισώσεις των πινάκων που δείχνουν την σειρά των στροφών είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

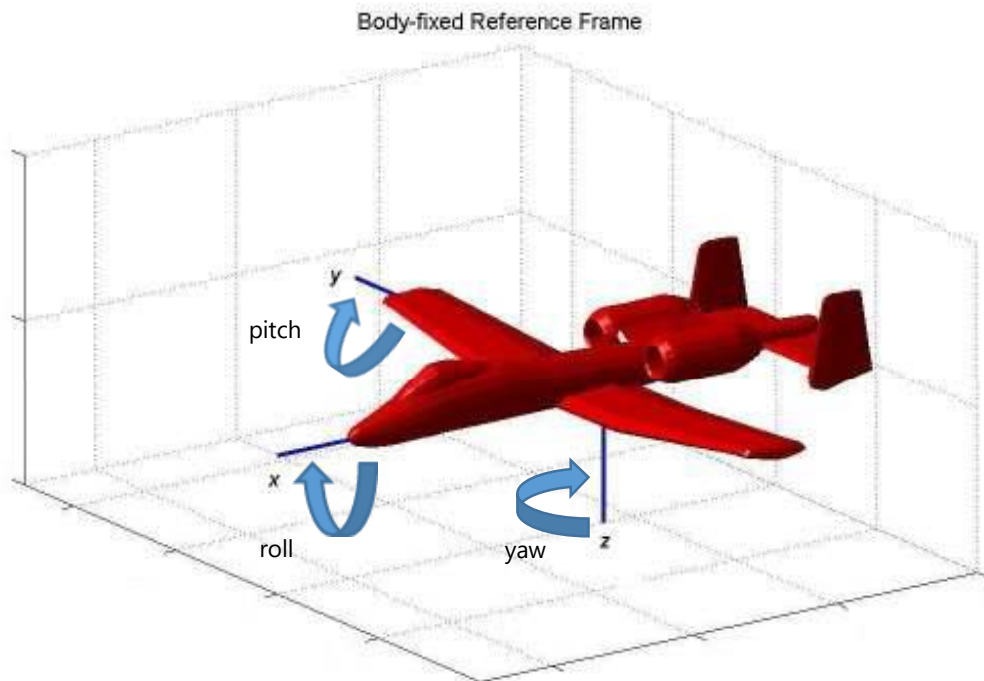
Οι γωνίες Euler περιορίζονται στα εύρη $0 \leq \psi < 2\pi$, $-\pi/2 \leq \theta < \pi/2$, $0 \leq \varphi < 2\pi$.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, η ακολουθία των στροφών Euler ZYX χρησιμοποιείται ευρέως στην αεροναυπηγική. Όταν εφαρμόζονται για την αναπαράσταση του

προσανατολισμού ενός οχήματος που ίπταται, οι γωνίες Euler μπορούν να θεωρηθούν ως στροφές από καθορισμένο με αρχή το κέντρο βάρους πλαίσιο αναφοράς του χώρου, στο σύστημα αναφοράς του οχήματος. Οι γωνίες αυτές, εν γένει αναφέρονται ως ακολούθως :

- η ψ , ή στροφή περί τον z άξονα, καλείται yaw (angle)
- η θ , ή στροφή περί τον y άξονα, καλείται pitch (angle)
- η φ , ή στροφή περί τον x άξονα, καλείται roll (angle)

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η κατεύθυνση της θετικής στροφής για τις γωνίες περί τους άξονες του συστήματος αναφοράς του οχήματος.



Σχήμα 4.5: οι στροφές του οχήματος (Mylin, 2007)

Οι εξισώσεις σχέσεων (4.1)-(4.3) μπορούν να συνδυαστούν σε μία, δίνοντας την

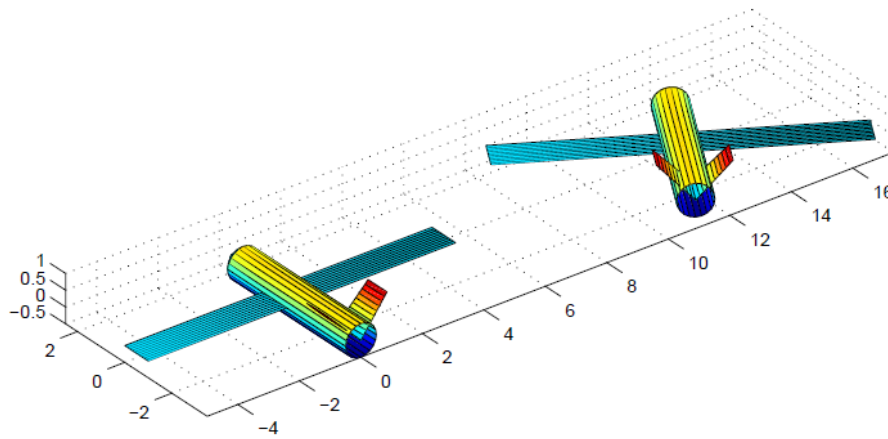
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Απλοποιώντας την σχέση, η (4.4) μπορεί να γραφεί ως

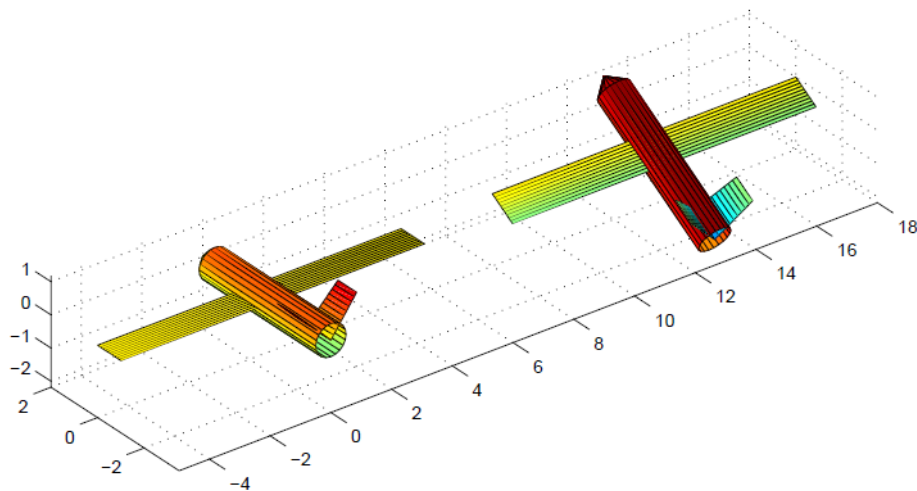
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = [A(\psi, \theta, \varphi)] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

όπου ο $[A(\psi, \theta, \varphi)]$ υποδηλώνει τον συνδυασμένο πίνακα στροφών.

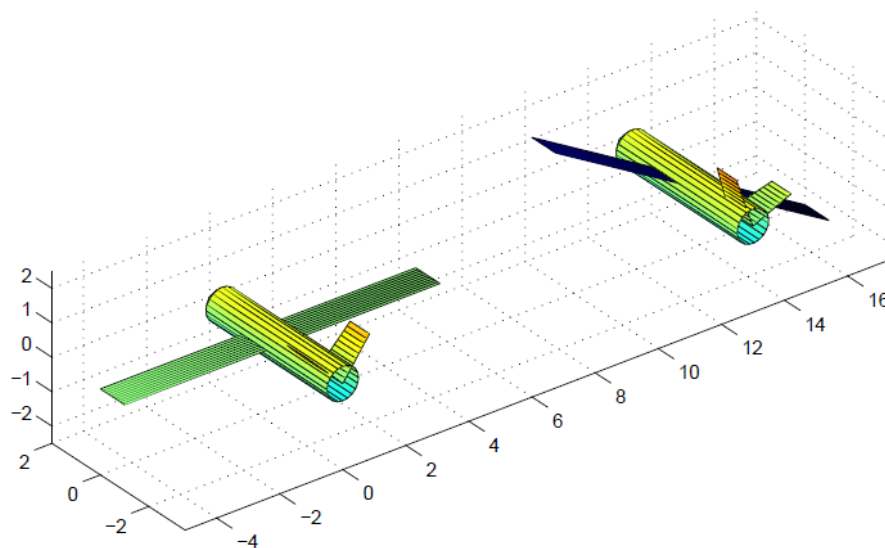
Στα σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8 απεικονίζονται στροφές 30° yaw, roll και pitch αντίστοιχα.



Σχήμα 4.6: 3D οπτικοποίηση yaw 30° (Rönnbäck, 2000)



Σχήμα 4.7: 3D οπτικοποίηση pitch 30° (Rönnbäck, 2000)

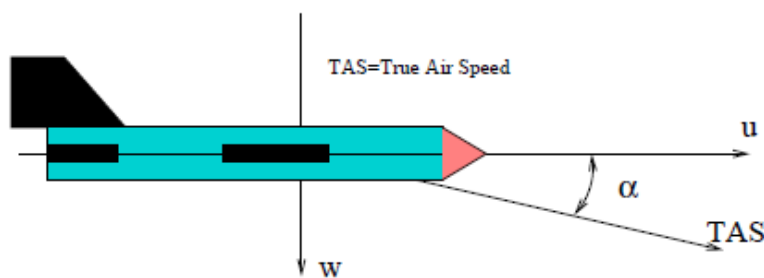


Σχήμα 4.8: 3D οπτικοποίηση roll 30° (Rönnbäck, 2000)

4.1.4. Πραγματικές γωνίες πτήσης

Όταν η κατεύθυνση της πτήσης δεν ακολουθεί την προκαθορισμένη γωνία pitch, υφίσταται μια μικρή διαφορά μεταξύ της διεύθυνσης της πραγματικής και της προγραμματισμένης ταχύτητας του εναέριου οχήματος, κατά το κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την γραμμή πτήσης. Αυτό οφείλεται στην κάθετη στη γραμμή πτήσης συνιστώσα της ταχύτητας του αέρα. Η γωνία αυτή της εκτροπής του οχήματος ονομάζεται α . Η εκτροπή υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (4.6).

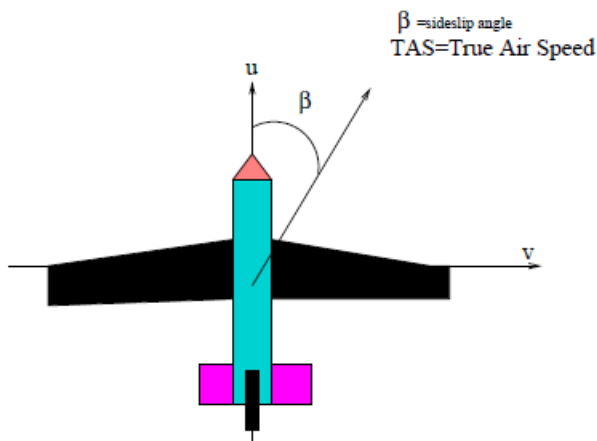
$$\alpha = \theta - \arctan\left(\frac{w}{\sqrt{u^2+v^2}}\right) \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.9: 2D οπτικοποίηση της γωνίας α (Rönnbäck, 2000)

Όταν η κατεύθυνση της πτήσης στο σύστημα αναφοράς του οχήματος διαφέρει από την προκαθορισμένη γωνία yaw, υφίσταται μια πλαγιολίσθηση. Αυτή η πλαγιολίσθηση συχνά οφείλεται στους πλάγιους ανέμους ή την δυναμική του σκελετού του οχήματος. Η γωνία β , καλείται γωνία πλαγιολίσθησης και είναι η διαφορά μεταξύ της προς τα εμπρός κατεύθυνσης του εναέριου οχήματος και της γωνίας yaw.

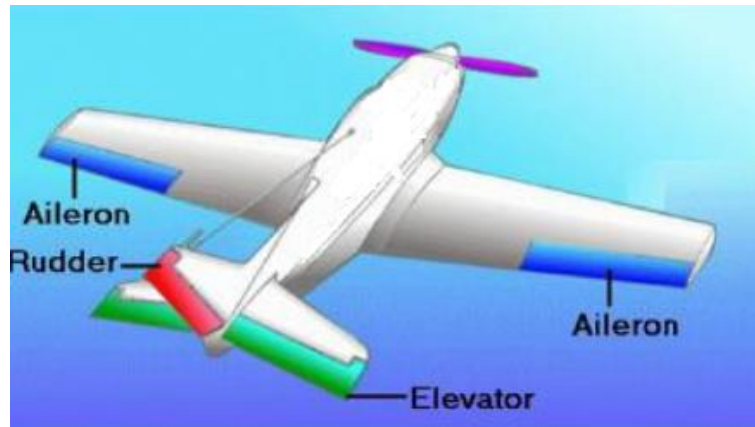
$$\beta = \psi - heading = \psi - \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (4.7)$$



Σχήμα 4.10: 2D οπτικοποίηση της πλαγιολίσθησης (Rönnbäck, 2000)

4.1.5. Αεροδυναμική των σταθερών πτερυγίων

Στα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα σταθερών πτερυγίων το roll ελέγχεται από πηδάλια κλίσεως αέρος (ailerons), τα οποία συνήθως βρίσκονται στα άκρα των πτερυγίων, στο πίσω μέρος αυτών. Το pitch ελέγχεται από ανυψωτήρες (elevators), που εντοπίζονται στο πίσω άκρο της οριζόντιας ουράς του οχήματος. Το yaw ελέγχεται από το πηδάλιο (rudder), το οποίο βρίσκεται στο πίσω μέρος του κάθετου τμήματος της ουράς (learnrobotix.com, 2015).



Σχήμα 4.21: χειρισμοί πτήσης σε ένα εναέριο όχημα σταθερών πτερυγίων βασίζεται στο σχήμα 2.23 του Leasure et al., 2015)

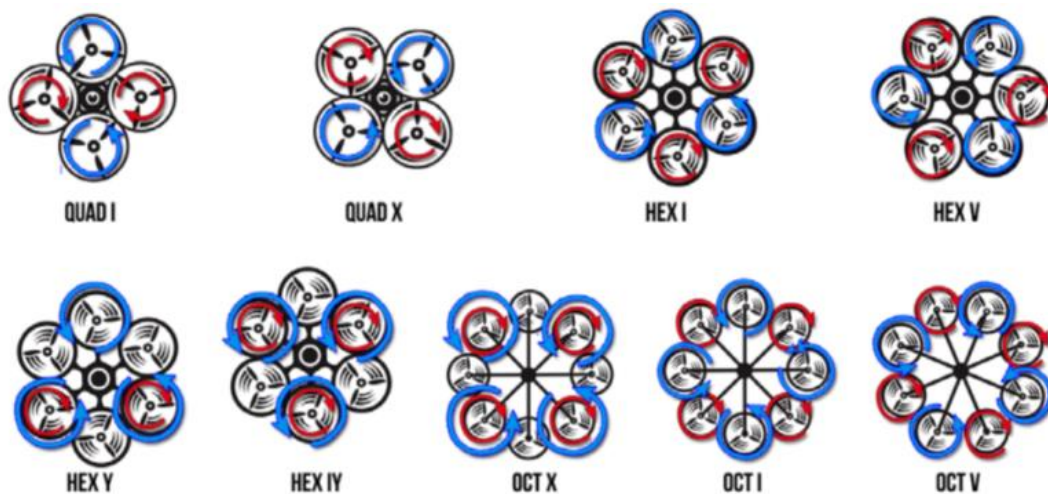
Τα εναέρια οχήματα πρέπει να έχουν επαρκή σταθερότητα για να διατηρήσουν μια σταθερή πορεία πτήσης, ακόμη και όταν ασκούνται πάνω τους δυνάμεις που οφείλονται σε ριπές ανέμου, αναταράξεις, ή μετατόπιση φορτίου. Τα UAV πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να ανταποκρίνονται σε κάθε κίνηση που προκύπτει από τους χειρισμούς πτήσης. Αυτό ονομάζεται έλεγχος πτήσης ή πλοήγηση του εναέριου οχήματος και είναι η πράξη της μετακίνησης χειριστηρίων πτήσης που βρίσκονται τοποθετημένα στο όχημα, παρέχοντας την κατάλληλη αεροδυναμική είτε για να κρατηθεί το όχημα στην τρέχουσα εναέρια πορεία του, είτε για να ανακατευθυνθεί το ίχνος πτήσης του αλλάζοντας τις στροφές γύρω από έναν ή περισσότερους άξονες στο σύστημα αναφοράς του οχήματος. Ο έλεγχος της πτήσης μπορεί να γίνεται είτε αυτόνομα είτε χειροκίνητα (Leasure et al., 2015).

Εν γένει, η κίνηση μίας επιφάνειας χειρισμού και ελέγχου σε ένα εναέριο όχημα αλλάζει την πορεία του αέρα πάνω στην επιφάνεια του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της δύναμης που εφαρμόζεται στις επιφάνειες χειρισμού, προκαλώντας την στροφή του εναέριου οχήματος γύρω από έναν εκ των αξόνων κίνησης (Schmidt, 2011). Τρεις σημαντικοί όροι που αφορούν στη λειτουργία του εναέριου οχήματος είναι η σταθερότητα, η ευελιξία και η ελεγχιμότητα. Η σταθερότητα είναι η ικανότητα του οχήματος να πετάει χωρίς ενεργοποίηση των χειριστηρίων ελέγχου σε μια διαδρομή πτήσης χωρίς εκτροπές και πλαγιολισθήσεις. Ευελιξία είναι η ικανότητα του αεροσκάφους να κατευθύνεται εύκολα

κατά μήκος του επιθυμητού ίχνους πτήσης και να αντέχει σε όλες τις καταπονήσεις που επιβάλλονται κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης. Ελεγχιμότητα είναι η ποιότητα της απόκρισης ενός εναέριου οχήματος στις εντολές του χειριστή (Leasure et al., 2015).

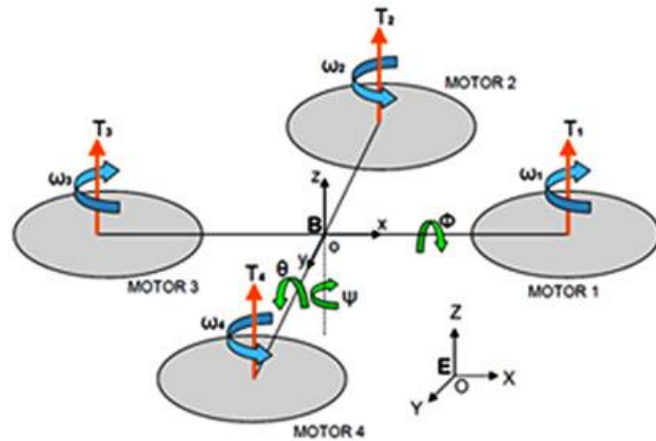
4.1.6. Αεροδυναμική των πολλαπλών στροφείων

Μία από τις βασικές διαφορές που υφίσταται ανάμεσα στα εναέρια οχήματα σταθερών πτερυγίων και στα πολλαπλών στροφείων, είναι ότι τα πρώτα αντλούν την περισσότερη, αν όχι όλη, από την ανύψωσή του από τα φτερά, με την προς τα εμπρός ώθηση να παρέχεται από κάποιον έλικα που έχει πρόσωπο προς τα εμπρός, ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούν στροφέια τόσο για την ώθηση όσο και για την ανύψωση.



Σχήμα 4.12: διαφορετικές διαρρυθμίσεις στροφείων σε UAV πολλαπλών στροφείων (Nolan, 2015)

Η αεροδυναμική και οι χειρισμοί ενός UAV πολλαπλών στροφείων έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά με εκείνους των UAV σταθερών πτερυγίων και των ελικόπτερων, αλλά παρουσιάζουν και ορισμένες μοναδικές ιδιότητες. Μία από αυτές είναι η ικανότητα ακριβούς μεταβολής της ταχύτητας κάθε στροφείου, μεταβάλλοντας έτσι την ώθηση της έλικας (και την προκαλούμενη ροπή), η οποία επιτρέπει της χρήση του UAV πολλαπλών στροφείων ως μίας πλατφόρμας σταθερής αλλά και ελεγχόμενης (Leasure et al., 2015). Στις περισσότερες μικρές τέτοιες πλατφόρμες, οι κινητήρες και τα συναφή στροφέια είναι τοποθετημένα στους διαρθρωτικούς βραχίονες που επεκτείνονται προς τα έξω από τον κεντρικό κόμβο ή «σώμα» του οχήματος. Όταν ένας κινητήρας, και το σχετικό στροφέιο, επιταχύνει ή επιβραδύνει, αυτό αυξάνει ή μειώνει την ώθηση που ασκείται στο συγκεκριμένο βραχίονα. Η ανισορροπία δυνάμεων που προκαλείται στο όχημα έχει ως αποτέλεσμα το pitch προς τα εμπρός, το roll δεξιά ή αριστερά και το yaw, όπως απαιτείται κάθε φορά (Naidoo, 2011 και Schmidt, 2011).



Σχήμα 4.133: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για quadcopter (Naidoo, 2011)

Το pitch και το roll ελέγχονται αλλάζοντας την ταχύτητα των στροφείων στην μία πλευρά του εναέριου οχήματος, με ίση (αλλά αντίθετης κατεύθυνσης) αλλαγή να εφαρμόζεται στο στροφέιο στην άλλη πλευρά του εναέριου οχήματος. Για παράδειγμα, για να αποκτήσει κλίση ένα multicopter προς τα αριστερά, το στροφέιο στη δεξιά πλευρά θα πρέπει να αυξήσει ταχύτητα, αυξάνοντας έτσι την άνοση σε αυτήν την πλευρά του εναέριου οχήματος. Να σηκώσει την μύτη του το multicopter προς τα επάνω, το μετωπικό στροφέιο θα πρέπει να αυξήσει ταχύτητα για τη δημιουργία περισσότερης ανέλκυσης. Η κατακόρυφη επιτάχυνση (ή άνοδος) ή η κάθοδος, επιτυγχάνονται είτε αυξάνοντας ή μειώνοντας την ταχύτητα ισόρροπα, σε όλα τα στροφέια του εναέριου οχήματος ταυτόχρονα (learnrobotix.com, 2015 και Naidoo, 2011).

Ο έλεγχος του yaw είναι λίγο διαφορετικός. Τα στροφέια του UAV περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις όπως φαίνεται από άνωθεν. Κάθε κινητήρας εξουδετερώνει τις δυνάμεις ροπής των άλλων κινητήρων προκειμένου να επιτευχθεί η σταθερότητα της πλατφόρμας. Όταν δύο από τους απέναντι κινητήρες (που περιστρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση) επιβραδύνουν, τότε η ανισοκατανομή των ταχυτήτων που δημιουργείται, επιτρέπει την επίδραση της ροπής από τα δύο ταχύτερα περιστρεφόμενα στροφέια να ξεπεράσει αυτή που παράγεται από τα βραδύτερα περιστρεφόμενα στροφέια και τότε παρουσιάζεται το yaw. Η απαίτηση για σταθερότητα του multicopter υπαγορεύει ότι κάθε κινητήρας θα πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια για να μπορούν να λαμβάνουν χώρα συνεχείς αλλά πολύ μικρές αλλαγές στον προσανατολισμό του οχήματος (Leasure et al., 2015).



Σχήμα 4.14: hover, forward pitch, right yaw (Leasure et al., 2015)

4.2. Προγραμματισμός Φωτογραμμετρικής Πτήσης

Αν η διαδικασία λήψης Φωτογραμμετρικών εικόνων με UAV οριστεί με αυστηρό τρόπο ως –εναέριο όχημα, σταθμός ελέγχου και ζεύξη δεδομένων–, σε αυτό τον ορισμό δεν υπάρχει σαφής αναφορά στην προετοιμασία και την εκτέλεση της αποστολής για την λήψη εικόνων (Colomina, Molina, 2014). Στην πραγματικότητα, όμως, ο προγραμματισμός της πτήσης πριν από την λήψη εικόνων, είναι θεμελιώδης ώστε να πραγματοποιηθεί ο προσανατολισμός των αεροφωτογραφιών και η παραγωγή φωτογραμμετρικών προϊόντων (He et al., 2012). Μια προσεκτική σχεδίαση της πορείας του αεροσκάφους (waypoints, ύψη, λωρίδες, ταχύτητες, στροφές κ.λπ.) καθώς μία ευέλικτη, σε πραγματικό χρόνο, ικανότητα διαχείρισης της αποστολής (ρύθμιση των παραμέτρων των αισθητήρων, πράξεις ενεργοποίησής τους, διευθύνσεις πτήσης, κλπ.) είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη παραγωγικών και ασφαλών φωτογραμμετρικών αποστολών (Colomina, Molina, 2014).

Παρά το γεγονός ότι ο σχεδιασμός της πτήσης και η διαχείριση σε πραγματικό χρόνο είναι στοιχεία ενσωματωμένα με τα σύγχρονα εμπορικά UAV (π.χ., το Horizon της Micropilots ή το QGroundControl που χρησιμοποιείται από το ArduPilot), υπάρχουν ανοιχτά ζητήματα που εξακολουθούν να οδηγούν τους χρήστες να επαναλάβουν πολλές φορές από την αρχή αποστολές λήψης εικόνων, λόγω λανθασμένου προγραμματισμού ή εκτέλεσης της αποστολής. Προφανώς, η “εύκολη” λειτουργία των micro-και mini-UAV αν θα έπρεπε να μετριάσει την ταλαιπωρία αυτή. Στην πραγματικότητα, όμως, τα οχήματα αυτά είναι πολύ μικρά, ευαίσθητα στον άνεμο και στις ριπές του αέρα και περιορισμένης αυτονομίας. Ένα συνηθισμένο χαρακτηριστικό, για παράδειγμα, των αποστολών για UAV Φωτογραμμετρία είναι η μεγάλη κατά μήκος (80%) και κατά πλάτος (60- 80%) επικάλυψη για να αντισταθμίσει την αστάθεια των εναέριων οχημάτων. Ένα σπάνιο χαρακτηριστικό, για παράδειγμα, της διαχείρισης της αποστολής, είναι να συμπεριλάβει πραγματικές συνθήκες ανέμου για τον προγραμματισμό της αποστολής, και την αναδιαμόρφωσή του κατά την διάρκεια της πτήσης. Ο σχεδιασμός της φωτογραμμετρικής αποστολής και τα υποσυστήματα για την σε πραγματικό χρόνο διαχείριση της αποστολής είναι το κλειδί για την ανταγωνιστική αξιοποίηση της UAV Φωτογραμμετρίας. Ειδικά για τα micro-και mini-UAV, βέβαια, όσο οι τεχνολογίες MEMS είναι υπό εξέλιξη, ο παραδοσιακός προγραμματισμός της φωτογραμμετρικής αποστολής για την λήψη εικόνων, είναι προς το παρόν απαραίτητος.

4.2.1. Παράμετροι πτήσης και σχέσεις υπολογισμού τους

Οι σημαντικότερες παράμετροι και σχέσεις που αφορούν στον προγραμματισμό πτήσης μίας εναέριας μελέτης περιγράφονται κατωτέρω και εντοπίζονται στην βιβλιογραφία (μεταξύ άλλων στους Eisenbeiss, 2009 p. 62-64, Kraus, 2007 p. 131-140, Πατιά, 1991 σ. 166-178). Οι κύριες παράμετροι που απαιτούνται, προκειμένου να αποφασιστεί η διαδρομή της πτήσης του εναέριου οχήματος, καταγράφονται στον πίνακα 4.2. Στη συνέχεια δίνεται ένα τυπολόγιο υπολογισμού των παραμέτρων προγραμματισμού πτήσης του οχήματος.

συντελεστής κλίμακας εικόνας

$$m_b = \frac{H_g}{f} \quad (4.8)$$

κάλυψη εικόνας

$$S = \frac{s' \times H_g}{f} \quad (4.9)$$

μήκος βάσης λήψης με $p\%$ κατά μήκος επικάλυψη

$$B = S_1 \left(1 - \frac{p}{100} \right) \quad (4.10)$$

απόσταση γραμμών πτήσης με $q\%$ κατά πλάτος επικάλυψη

$$A = S_2 \left(1 - \frac{q}{100} \right) \quad (4.11)$$

αριθμός μοντέλων ανά λωρίδα

$$N_{m/s} = \frac{L_p}{B} + 1 \quad (4.12)$$

αριθμός λήψεων ανά λωρίδα

$$N_{i/s} = N_{m/s} + 1 \quad (4.13)$$

αριθμός λωρίδων

$$N_s = \frac{L_q}{A} + 1 \quad (4.14)$$

αριθμός λήψεων

$$N_i = N_{i/s} \times N_s \quad (4.15)$$

χρόνος μεταξύ λήψεων

$$\Delta t = \frac{B}{V} \quad (4.16)$$

Η αναμενόμενη υψομετρική ακρίβεια μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της μετρητικής οριζοντιογραφικής ακρίβειας s_x και του λόγου του ύψους πτήσης προς τη βάση λήψης στην εικόνα, ενώ το s_x υπολογίζεται μέσω της μεθόδου μέτρησης και του μεγέθους του pixel. Τα χειροκίνητα μετρημένα σημεία μπορεί να οριστεί ότι έχουν ακρίβεια της τάξης των 0.5 pixel, ενώ αυτόματες μέθοδοι μέτρησης επιτρέπουν ακρίβειες μέχρι και 0.1 pixel για φυσικούς στόχους σε επίπεδο έδαφος με καλή υφή. Σε ορεινές περιοχές η ακρίβεια των μετρήσεων σημείων περιορίζεται σε 0.5 pixel. Ωστόσο, για εικόνες από UAV πρέπει να αναμένονται ακρίβειες περίπου 0.5 pixel. Οι ακρίβειες υπολογίζονται ως εξής:

$$s_x = s_{x(Mes)} \times p_x \quad (4.17)$$

$$s_z = s_x \times \frac{H_g}{b} \quad (4.18)$$

Περιγραφή	Παράμετρος
Συντελεστής κλίμακας εικόνας	m_b
Εστιακή απόσταση	f
Ύψος πτήσης	H_g
Διαστάσεις του αισθητήρα της φωτομηχανής	s'
Διαστάσεις του pixel	p_x και p_y
Διαγώνιος του αισθητήρα	d
Διαστάσεις εικόνας στο έδαφος	S
Κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη	p και q
Βάση λήψης στο έδαφος	B
Απόσταση γραμμών πτήσης στο έδαφος	A
Εμβαδόν ενός στερεομοντέλου	F_m
Περιοχή που μπορεί να εξετασθεί στερεοσκοπικά	F
Μήκος και πλάτος της περιοχής που θα καλυφθεί	L_p και L_q
Αριθμός μοντέλων ανά λωρίδα	$N_{m/s}$
Αριθμός λήψεων ανά λωρίδα	$N_{i/s}$
Αριθμός λωρίδων	N_s
Αριθμός λήψεων	N_i
Θέση της περιοχής	$P_{1...4} (X, Y)$
Μέσο ύψος εδάφους	H_T
Οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια	s_x και s_y
Ακρίβεια μετρήσεων	$S_{x(Mes)}$
Ταχύτητες του UAV (μεταφορική και περιστροφική)	$V_{x,y,z}$ και $V_{\psi,\theta,\varphi}$
Κίνηση εικόνας	w
Ταχύτητα κλείστρου	dT
Χρονική απόσταση μεταξύ δύο σημείων λήψης	Δt
Θέση του σημείου λήψης	$P (X, Y, Z)$

Πίνακας 4.2: Παράμετροι πτήσης για τον προγραμματισμό λήψης εικόνων με UAV

Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον πίνακα 4-1 του Eisenbeiss, 2009.

Πριν από την πτήση του μη επανδρωμένου οχήματος, κρίνεται σκόπιμο να συλλέγονται πληροφορίες για τα τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα και τις καιρικές συνθήκες. Γενικά, πρέπει κατά τις μέρες που επιλέγονται να μην υπάρχει κίνδυνος βροχόπτωσης ή άνεμοι. Σύμφωνα με υπάρχοντες τοπογραφικούς χάρτες μπορούν να συλλεχθούν κρίσιμα στοιχεία για την τοπογραφία της υπό μελέτη περιοχής. Σε κάθε περίπτωση όμως η επί τόπου διερεύνηση της περιοχής που θα καλυφθεί είναι απαραίτητη, διότι κατά το στάδιο του προγραμματισμού της πτήσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψη όλα τα φυσικά και τεχνητά εμπόδια που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ασφαλή εκτέλεση της πτήσης. Εάν δε αυτά τα εμπόδια είναι σημαντικά σε αριθμό, η σχεδίαση κάποιου σχετικού σκαριφήματος είναι αναγκαία προϋπόθεση για τον προγραμματισμό λήψης των εικόνων. Οι διαδρομές με εμπόδια θα πρέπει να αποφεύγονται και τα ύψη πτήσης να τηρούν τις κείμενες διατάξεις.

4.2.2. Ανάλυση των παραμέτρων πτήσης και σχετικές ρυθμίσεις

Κατά τη διάρκεια της πτήσης, για να εξασφαλιστεί ότι η εστιακή απόσταση f , καθώς και άλλες παράμετροι, παραμένουν σταθερές, η φωτομηχανή του UAV πρέπει να φωτογραφίζει με την τεχνική fixed-focus. Η λειτουργία του φακού τίθεται στο άπειρο ώστε να εξασφαλιστεί ότι μπορεί να πάρει το ευρύτερο του βάθους πεδίου, κάνοντας να φαίνονται καθαρά τα πιο μακρινά αντικείμενα, ανεξαρτήτως ελλείψεων του πεδίου εφαρμογής στο βάθος του πεδίου (He et al., 2012).

GSD (Ground Sampling Distance), είναι η απόσταση των κέντρων των pixel στο έδαφος και με άλλα λόγια η διάσταση του pixel στο έδαφος. Το GSD (ως ενδεικτική ποσότητα της δειγματοληψίας) είναι ένα μέτρο της χωρικής ανάλυσης (ground resolution). Αυτή η ποσότητα είναι η ελάχιστη απόσταση προκειμένου να γίνουν διακριτοί δύο στόχοι σε μία εικόνα, αλλά δεν σημαίνει το ελάχιστο μέγεθος που απαιτείται να έχει είναι αντικείμενο για να γίνει διακριτό στην εικόνα. Για παράδειγμα, ένας στόχος με μέγεθος 5 cm στο έδαφος, είναι ένα μόνο pixel για εδαφοψηφίδα 5 cm, ανεξαρτήτως του πόσες φορές θα γίνει zoom στην εικόνα. Επομένως, χρειάζονται αρκετά pixel που θα το απεικονίζουν, για να μπορέσει ένας στόχος/αντικείμενο να εντοπιστεί στην εικόνα. Εν γένει, το μέγεθος του μικρότερου διακριτού στόχου στην εικόνα θα πρέπει να αντιστοιχεί σε 5 – 10 φορές το μέγεθος του GSD. Το GSD εξαρτάται από την εστιακή απόσταση, το ύψος πτήσης και το μέγεθος του pixel. Και μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις:

$$GSD = \frac{H_g}{f} \mu \quad (4.19)$$

$$\mu = \frac{W}{S_W} = \frac{H_g}{S_H} \quad (4.20)$$

όπου μ το μέγεθος του pixel (μm), W το πλάτος του CCD (mm), H το ύψος του CCD, S_W ο αριθμός των pixel για το W και S_H ο αριθμός των pixel για το H (He et al., 2012).

Γίνεται φανερό από τις παραπάνω σχέσεις, ότι όσο το ύψος πτήσης μεγαλώνει, τόσο η περιοχή που καλύπτεται μεγαλώνει αλλά το GSD μικραίνει.

Σημειώνεται ότι για την επιλογή του GSD, και συνακόλουθα του ύψους πτήσης, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη και το μέγεθος του pixel της ορθοφωτογραφίας (P_0) όταν αυτό είναι το ζητούμενο εικονιστικό παράγωγο της φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Συνήθως το P_0 υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$P_0 = P_a \frac{1.5 k_a}{k_0} \quad (4.21),$$

όπου k_a, P_a είναι η κλίμακα και το μέγεθος της εικόνας και k_0, P_0 είναι η κλίμακα και το μέγεθος pixel της ορθοεικόνας. Συνεπώς προκύπτει η (4.22):

$$P_0 = \left(\frac{30\% \sigma_g}{k_a} \right) \left(\frac{1.5 k_a}{k_0} \right) = \left(\frac{0.3 \sigma_g k_0}{k_a} \right) \left(\frac{1.5 k_a}{k_0} \right) = 0.3 * 0.0002 * 1.5m = 0.00009m \leq 100\mu\text{m}$$

Αφού αποφασιστούν το GSD και το ύψος πτήσης, πρέπει να αποφασιστεί το ποσοστό της κατά μήκος επικάλυψης p και το ποσοστό της κατά πλάτος επικάλυψης q . Επειδή ο προσανατολισμός του αεροσκάφους στον αέρα δεν είναι σταθερός και επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, οι προκαθορισμένες τιμές των επικαλύψεων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από εκείνες που θα χρησιμοποιούνταν στην ίδια περίπτωση, εάν αντί για μη επανδρωμένο όχημα χρησιμοποιούνταν ένα επανδρωμένο αεροσκάφος.

4.2.3. Μετρήσεις φωτοσταθερών σημείων

«Τα φωτοσταθερά είναι σημεία του αντικειμένου, γνωστών συντεταγμένων, τα οποία χρησιμοποιούνται στη φωτογραμμετρική διαδικασία για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού μίας αεροφωτογραφίας ή ενός στερεοζεύγους» (Πατιάς, 1991). Οι συντεταγμένες τους υπολογίζονται συνήθως από τοπογραφικές μετρήσεις με τη χρήση ενός μικρού τριγωνομετρικού δικτύου. Οριζοντιογραφικά φωτοσταθερά τοποθετούνται κυρίως στα άκρα του φωτογραμμετρικού μπλοκ, ενώ υψομετρικά ομοιόμορφα καταναμημένα περισσότερο στο κέντρο του και λιγότερα στα άκρα.

Εκτός όμως από τα φωτοσταθερά σημεία, για την εκτέλεση του τριγωνισμού απαιτούνται και άλλα σημεία σύνδεσης. Η γεωμετρία της κατανομής των σημείων σύνδεσης που χρησιμοποιούνται για εναέριες μελέτες, είναι κυρίως αυτή του Gruber, με έξι καλά καταναμημένα σημεία σε κάθε εικόνα, τουλάχιστον 3 κοινά για το αριστερό στερεομοντέλο και 3 για το δεξιό, και 2 κοινά σημεία μεταξύ γειτονικών λωρίδων λήψης.

Στην περίπτωση των μη επανδρωμένων οχημάτων συχνά απαιτούνται περισσότερα φωτοσταθερά σημεία και σημεία σύνδεσης προκειμένου να εξασφαλισθεί η επάρκειά τους, ακόμα και στις περιπτώσεις που οι διπλανές εικόνες παρουσιάζουν μεγάλες σχετικές στροφές μεταξύ τους, ώστε να μπορεί να εκτελεσθεί ο φωτογραμμετρικός τριγωνισμός με επιτυχία, χωρίς να απαιτούνται συμπληρωματικές πτήσεις του οχήματος για την λήψη επιπλέον εικόνων που απεικονίζουν τα σημεία αυτά.

Προκειμένου να αναγνωρίζονται τα φωτοσταθερά και τα σημεία σύνδεσης που έχουν επισημανθεί στο έδαφος (ή στο υπό μελέτη αντικείμενο), ο στόχος κάθε τέτοιου σημείου πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά και να έχει το κατάλληλο μέγεθος και σχήμα, ενώ ταυτόχρονα, η αντίθεση ανάμεσα στο προσκήνιο και το φόντο θα πρέπει να είναι υψηλή.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η θέση των προσημασμένων σημείων δεν μετακινήθηκαν κατά τη διάρκεια της φωτογραμμετρικής λήψης και της διαδικασίας μέτρησης των φωτοσταθερών, πρέπει να σημαδεύεται η θέση τους και μετά τη διαδικασία μετρήσεων να ελέγχεται αν έχουν μετακινηθεί. Σε τέτοια περίπτωση φωτοσταθερά που έχουν μετακινηθεί δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στον τριγωνισμό. Είναι προτιμότερο η τοποθέτηση των φωτοσταθερών να μην γίνεται σε περιοχές όπου κινδυνεύουν να καταστραφούν ή να μετακινηθούν (He et al., 2012).

4.3. Έλεγχοι και Ρυθμίσεις πριν την Πτήση

Πριν την πραγματοποίηση της πτήσης με σκοπό τη συλλογή μετρητικών δεδομένων, είναι απαραίτητο να γίνεται μία σειρά ελέγχων και ρυθμίσεων σχετικών με τον εξοπλισμό που είναι τοποθετημένος στην εναέρια πλατφόρμα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιτυχία και η ασφάλεια της αποστολής.

Αρχικά, πριν την προετοιμασία του εξοπλισμού για την πτήση και την πραγματοποίησή της είναι απαραίτητο να διαβάζονται οι οδηγίες των κατασκευαστών κάθε ενός εξαρτήματος του UAV, και ειδικά τα εγχειρίδια που αφορούν στα βασικά στοιχεία σχετικά με την πραγματοποίηση της πτήσης και το λογισμικό πλοήγησης.

Ακολούθως πρέπει να ελέγχεται ότι ο εξοπλισμός πλοήγησης, οι απαραίτητοι αισθητήρες με το σχετικό βοηθητικό εξοπλισμό, η μονάδα τροφοδοσίας και οι μπαταρίες, είναι τοποθετημένα σωστά, με τις κατάλληλες συνδέσεις πάνω στην εναέρια πλατφόρμα. Επίσης πρέπει να ελέγχεται ότι δεν υπάρχουν φθορές στην προπέλα ή τα στροφέια της πλατφόρμας, και ότι αυτά έχουν τοποθετηθεί στην σωστή κατεύθυνση. Σε περίπτωση φθοράς σε κάποια έλικα του οχήματος αυτή πρέπει να αντικαθίσταται. Σημαντική είναι η σύνδεση του RC, με τις απαραίτητες ρυθμίσεις για τον αποτελεσματικό έλεγχο του οχήματος με την χρήση του χειριστηρίου απομακρυσμένου ελέγχου. Προσθέτως οι μπαταρίες του UAV και του χειριστηρίου πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένες και η πλατφόρμα να μην είναι υπερφορτωμένη.

Όπως γίνεται αντιληπτό στην περίπτωση των UAV σταθερών πτερυγίων, απαραίτητη προϋπόθεση πριν την έναρξη της πτήσης, είναι η ύπαρξη ενός επιμήκους διαδρόμου απογείωσης ελεύθερου από εμπόδια και με ιδανικές συνθήκες αέρος (άνεμοι < 60km/h κατά την διεύθυνση της απογείωσης). Ειδικά για τα UAV που απαιτούν τη χρήση εκτοξευτήρα για την απογείωση, η γωνία εκτόξευσης πρέπει συνήθως να βρίσκεται μεταξύ κάποιων τιμών, που δίνονται από τον κατασκευαστή. Στην περίπτωση δε των πολλαπλών στροφείων, εκτός από το ότι πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη ο χώρος απογείωσης, στο όχημα πρέπει να τοποθετούνται τεχνητά πέλματα στα άκρα του σκελετού, τα οποία ακουμπούν το έδαφος, προκειμένου κατά την προσγείωση να αποφεύγονται ισχυροί κραδασμοί και τυχόν φθορές.

Στην περίπτωση της αυτόματης πτήσης, υπάρχει και ένα επιπλέον βήμα πριν την πτήση, που αφορά στην εγκατάσταση και ρύθμιση του εξοπλισμού αυτόματης πλοήγησης, στην ρύθμιση του λογισμικού, στην πραγματοποίηση ελέγχων σχετικά με το λογισμικό και τέλος στη βαθμονόμηση της πυξίδας, που είναι ένα από τα πιο κοινά στοιχεία αυτού του εξοπλισμού.

Η εγκατάσταση του εξοπλισμού, συνίσταται στην εγκατάσταση στην εναέρια πλατφόρμα με τις κατάλληλες επιμέρους συνδέσεις των τμημάτων του on-board αυτόματου πιλότου

και των datalinks (βλέπε ενότητα 4.4.2.2.). Η κατάλληλες φωτεινές ενδείξεις του εξοπλισμού βεβαιώνουν τη σωστή λειτουργία του.

Η ρύθμιση του λογισμικού, περιλαμβάνει: την εγκατάστασή του και ενημέρωσή του, την εντός του λογισμικού επιλογή του κατάλληλου τύπου UAV, την επιλογή του μπροστινού μέρους του στην περίπτωση των πολλαπλών στροφείων, την επιλογή του κέντρου βαρύτητας του αεροσκάφους, αφού αυτό μετρηθεί (όταν δεν είναι προ-ρυθμισμένο από τον κατασκευαστή, και συνηθέστερα όταν πρόκειται για UAV που έχει συναρμολογηθεί από τον χειριστή), την επιλογή του προσανατολισμού της IMU σχετικά με το μπροστινό μέρος του οχήματος, την επιλογή του χειριστηρίου και της διαρρύθμισης των μοχλών και των κουμπιών του, τη ρύθμιση της λειτουργίας FailSafe, την επιλογή της διαρρύθμισης της σύνδεσης των συσκευών του αυτόματου πιλότου, το καλιμπράρισμα της IMU, τη ρύθμιση των χαρτών και των επιλογών που αφορούν στην διεπαφή και την προβολή ενδείξεων-διαγνωστικών μηνυμάτων (diagnostics) στην οθόνη. Μετά τη ρύθμιση του λογισμικού πρέπει να γίνεται έλεγχος ότι όλες οι τιμές που εισήχθησαν στο σύστημα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και το UAV λειτουργεί κανονικά.

Οι έλεγχοι των ρυθμίσεων μέσα στο λογισμικό αναφέρονται στα εξής:

- την αρτιότητα και τη σωστή τοποθέτηση του εξοπλισμού αυτόματης πλοήγησης
- τον προσανατολισμό της IMU
- τη διαρρύθμιση του σκελετού του UAV
- την ορθότητα του τύπου του χειριστηρίου
- τη λειτουργία της έλικας ή των στροφείων
- τα μεγέθη των roll, pitch, yaw, vertical speed σε στάση και αιώρηση
- τα κανάλια της απομακρυσμένης σύνδεσης, δηλαδή το κατά πόσο ανταποκρίνεται το UAV με τις κινήσεις του στις κινήσεις των μοχλών του τηλεχειριστηρίου, το κατά πόσο ανταποκρίνεται το gimbal του UAV με τις κινήσεις του στις κινήσεις των μοχλών του τηλεχειριστηρίου, την εναλλαγή χειροκίνητης και αυτόματης λειτουργίας από το χειριστήριο, τις λειτουργίες FailSafe και αυτόματης επιστροφής στην αφετηρία
- τη βαθμονόμηση της πυξίδας

Η βαθμονόμηση της πυξίδας που βρίσκεται σε πολλά εμπορικά UAV, είναι απαραίτητη, διότι η πυξίδα μπορεί να υποβοηθήσει το σύστημα GPS στον υπολογισμό της θέσης. Η πυξίδα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, που μπορεί να προκαλέσουν ανωμαλίες στα δεδομένα που προέρχονται από την πυξίδα και να οδηγήσουν σε κακή απόδοση πλοήγησης ή ακόμη και αποτυχία πτήσης. Η βαθμονόμηση της πυξίδας είναι απαραίτητη, τουλάχιστον την πρώτη φορά που θα πραγματοποιηθεί πτήση, αλλά συνίσταται να πραγματοποιείται και κάθε φορά που γίνεται πτήση σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή που πραγματοποιήθηκε η προηγούμενη βαθμονόμηση. Η βαθμονόμηση της πυξίδας πρέπει να γίνεται σε εξωτερικό χώρο και σε σημείο που η μονάδα ελέγχου να δέχεται σήμα από τουλάχιστον 6-7 δορυφόρους ανάλογα με το μοντέλο. Η τακτική βαθμονόμηση οδηγεί σε βέλτιστη λειτουργία της πυξίδας.

Για τις αποστολές με σκοπό την λήψη μετρητικών πληροφοριών και δη εικόνων, πριν την πτήση πρέπει επιπλέον να ελέγχεται ο φωτογραφικός εξοπλισμός, τα αποθηκευτικά μέσα, τα gimbals, καθώς και ο on-board και επίγειος εξοπλισμός που επιτρέπει την FPV.

Για την ομαλή πραγματοποίηση της πτήσης, υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις που σχετίζονται με το περιβάλλον και τις συνθήκες και πρέπει σε γενικές γραμμές να τηρούνται:

- (1) Πριν την πτήση ο χειριστής του UAV, ακόμα και σε περίπτωση πλήρως αυτόνομης πτήσης, θα πρέπει να έχει λάβει κάποια βασική εκπαίδευση σχετικά με τον χειρισμό του σε συνθήκες χειροκίνητης λειτουργίας (πχ. με την χρήση ενός προσομοιωτή πτήσης σε συνδυασμό με το χειριστήριο που θα χρησιμοποιηθεί στην πραγματική πτήση και οδηγιών από κάποιον έμπειρο στην πλοήγηση μη επανδρωμένων οχημάτων), γιατί ακόμα και τότε μπορεί να υπάρξει κάποια βλάβη στο σύστημα αυτόματης πλοήγησης και να πρέπει να επέμβει για την αποφυγή σύγκρουσης.
- (2) Πρέπει να μελετάται η τοπογραφία της περιοχής, ώστε να εξασφαλίζεται η ορατότητα προς το UAV σε κάθε περίπτωση και να μην παρεμποδίζεται η σύνδεση τηλεμετρίας με το όχημα.
- (3) Πρέπει να διερευνώνται εναλλακτικές τοποθεσίες προσγείωσης.
- (4) Δεν πρέπει να πραγματοποιούνται πτήσεις με κακές καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι (μεγαλύτεροι από 4 Beaufort), ομίχλη, βροχή ή χιόνι, ούτε με ιδιαίτερα υψηλή ή χαμηλή θερμοκρασία.
- (5) Το πεδίο της πτήσης θα πρέπει να είναι ελεύθερο από ψηλά κτήρια και λοιπά εμπόδια. Ειδικά τα κτήρια μεταλλικής κατασκευής έχουν ως αποτέλεσμα ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που επηρεάζουν τη πυξίδα.
- (6) Το εναέριο όχημα πρέπει να διατηρείται σε ασφαλή απόσταση από ανθρώπινα πλήθη, εμπόδια, γραμμές ενέργειας, δέντρα και υδάτινους όγκους.
- (7) Πρέπει να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ του τηλεχειριστηρίου και άλλων ασύρματων συσκευών (διατήρηση μεγάλης απόστασης από σταθμούς βάσης ή μεγάλες κεραίες).
- (8) Τα συστήματα αυτόματου πιλότου δεν λειτουργούν στο Βόρειο και τον Νότιο Πόλο.
- (9) Ο χειριστής του UAV θα πρέπει να συμμορφώνεται με όλες τις διατάξεις της νομοθεσίας που αφορά στα μη επανδρωμένα οχήματα.

Τέλος πριν την πραγματοποίηση μιας αποστολής, και κυρίως για τα UAV πολλαπλών στροφείων πρέπει να πραγματοποιείται και ένας βασικός έλεγχος πτήσης στο πεδίο. Ένας τυπικός τέτοιος έλεγχος ξεκινάει με την επίτευξη σήματος από τουλάχιστον 6 δορυφόρους, στη συνέχεια ακολουθεί ενεργοποίηση των κινητήρων και απογείωση, έλεγχος απόκρισης του σε εντολές για μεταβολή των throttle, yaw, roll και pitch από το τηλεχειριστήριο, αιώρηση σε σταθερό υψόμετρο και προσγείωση.

4.4. Αυτόματη Πτήση

Σε ένα τυπικό UAV, το λογισμικό του αυτόματου πιλότου διαβάζει επανειλημμένα τη θέση, την ταχύτητα και τις στροφές (tPVA, όπου t χρόνος), του εναέριου οχήματος από το σύστημα πλοήγησης (NS) και χρησιμοποιεί τις παραμέτρους αυτές για να τροφοδοτήσει το σύστημα ελέγχου πτήσης (FCS) για την καθοδήγηση του οχήματος. Ειδικά για τις φωτογραμμετρικές εφαρμογές, ένα σύστημα προσανατολισμού (OS) είναι επίσης σε θέση να εκτιμήσει τις ίδιες παραμέτρους, αλλά όχι κατ' ανάγκη σε πραγματικό χρόνο, π.χ. για να υπολογίσει εκ των υστέρων τον προσανατολισμό του φωτογραμμετρικού αισθητήρα. Σε ένα "ιδανικά" σχεδιασμένο για φωτογραμμετρικές εφαρμογές UAV, οι αισθητήρες του συστήματος πλοήγησης (NS) – η αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU), ο δέκτης GPS, το βαροαλτίμετρο, η πυξίδα και πιθανόν οι άλλοι αισθητήρες – θα μοιράζονταν τα δεδομένα που υπολογίζουν μέσω του λειτουργικού συστήματος ή θα αξιοποιούσαν κατάλληλα την περίσσεια των μετρήσεων που προκύπτουν από τους αισθητήρες, για να παράγουν καλύτερους υπολογισμούς. Στην πράξη, τις περισσότερες φορές, το NS και το λειτουργικό σύστημα διαχωρίζονται ή το NS του αυτόματου πιλότου παρέχει τη λύση tPVA για το λειτουργικό σύστημα. Στη δεύτερη περίπτωση το σύστημα προσανατολισμού έχει μία ασήμαντη λειτουργία – input/output – και οι παράμετροι του προσανατολισμού δεν χρησιμοποιούνται για τον εναέριο έλεγχο, αλλά ως προσεγγιστικές τιμές για την αυτόματη παραγωγή σημείων σύνδεσης ή για την υποβοήθηση των φωτογραμμετρικών διαδικασιών (Colomina, Molina, 2014). Το σύστημα αυτόματης πλοήγησης ή αυτόματος πιλότος αποτελείται από το on-board σύστημα και το επίγειο σταθμό ελέγχου.

4.4.1. Συστήματα αυτόματου πιλότου

Πίνακας 4.3: Παραδείγματα συστημάτων αυτόματου πιλότου
(Ο πίνακας αυτός βασίζεται στον πίνακα 2 των Colomina, Molina 2014)

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Αισθητήρες	Βάρος (kg)	Διαστάσεις (cm)	Πλατφόρμα	Κόστος (κ€)
3DRobotics	ArduPilot Mega 2.5	INS/MM/BA	0.017	6.7x4x1	Fixed-wing, VTOL	≤ 0.2
Airware	osFlexPilot	INS/GPS/AS/MM	0.200	11x5.5x2.8	Fixed-wing, VTOL	≤ 5.5
Airware	osFlexQuad	INS/GPS/AS/MM	0.032	6.73x6.73x2	Multi-rotor	≤ 4.0
CloudCap Technologies	Piccolo II	INS/GPS/BA/AS	0.226	14.2x4.6x6.2	Fixed-wing, VTOL	-
CloudCap Technologies	PiccoloNano	GPS/AS/BA	0.065	4.6x7.6x2	Small Platforms	-
DJI	A2	INS/GPS/BA	0.224	5.4x3.9x1.49	Multi-rotor	≤ 1.2
DJI	Ace One	INS/GPS/BA	0.150	6.1x3.96x15.8	VTOL	≤ 3.5
DJI	Naza-M V2	INS/GPS/BA/MM	0.095	4.55x3.25x1.85	Multi-rotor	≤ 0.3
MicroPilot	MP2028	INS/GPS/BA/AS	0.028	10x4x1.5	Fixed-wing, VTOL	≤ 4.5
MicroPilot	MP2128	INS/GPS/BA/AS	0.024	10x4x1.5	Fixed-wing, VTOL	≤ 4.4
UAV Navigation	VECTOR	INS/GPS/MM/BA/AS	0.180	-	Mini and Tactical	-
weControl	wePilot1000	INS/GPS/MM/BA/AS	-	12x15.4x12.5	Helicopt., Multi-rotor	-

AS: airspeed sensor, BA: baroaltimeter, MM: magnetometer

Το ArduPilot Mega 2.5 δεν περιλαμβάνει δέκτη GPS, μονάδα τροφοδοσίας και μονάδα τηλεμετρίας

Τα συστήματα που αναφέρονται στον Πίνακα 4.3, είναι μόνο μερικά παραδείγματα από το ευρύ φάσμα των αυτόματων πιλότων για UAV. Σημειώνεται, ότι τα βάρη των αυτόματων πιλότων δεν περιλαμβάνουν τις κεραίες GPS (που μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας βάρους για τα micro-UAV). Επίσης, σημειώνεται ότι τα συστήματα που παρουσιάζονται μπορούν να δεχθούν επιπλέον αισθητήρες και τότε να έχουν διαφορετικές /επιπλέον δυνατότητες.

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.3, ένα (on-board) σύστημα αυτόματου πιλότου μπορεί να περιλαμβάνει συνδυασμό ορισμένων από τους κατωτέρω αισθητήρες:

- GPS, υπολογίζει την θέση.
- INS, υπολογίζει τον προσανατολισμό.
- Airspeed Sensor, χρησιμοποιεί αισθητήρες πίεσης για τον υπολογισμό της σχετικής με τον άνεμο ταχύτητας του εναέριου οχήματος. Οι μετρήσεις αυτές βοηθούν στην καλύτερη ενοποίηση των συστημάτων GPS και INS.
- Baroaltimeter, μετρά τις μεταβολές πίεσης του αέρα, για τον καθορισμό του ύψους σε σχέση με κάποιο σημείο αναφοράς (συνήθως το μηδενικό σημείο έναρξης της πλοήγησης). Λόγω της αλλαγής των καιρικών συνθηκών, ο αισθητήρας αποκτά κάποιο drift με την πάροδο του χρόνου. Για το λόγο αυτό μπορεί να απαιτείται εκ νέου βαθμονόμησή του σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- Magnetometer, εντοπίζει την ένταση και το μέγεθος των μαγνητικών πεδίων και είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί ως πυξίδα. Λόγω του ότι είναι επιρρεπές σε παρεμβολές που προκύπτουν από συσκευές όπως το GPS, τα δύο αυτά συστήματα συνήθως συνδυάζονται σε ένα ενιαίο.
- Range Finder, υπολογίζει το ύψος του εναέριου οχήματος πάνω από το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση ως «έδαφος» εννοούνται όλα τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά όπως δέντρα και κτήρια που διαμορφώνουν μια επιφάνεια. Τα δεδομένα αυτού του αισθητήρα χρησιμοποιούνται για τον ακριβή έλεγχο του ύψους του UAV που μπορεί να επιτρέψει στο όχημα να ακολουθεί το ανάγλυφο, δηλαδή να κινείται σε σταθερό ύψος από το έδαφος, επιτρέποντας την λήψη εικόνων με σταθερή κλίμακα. Προσθέτως, ο αισθητήρας αυτός είναι χρήσιμος στην προσγείωση του οχήματος, όπου για μικρά υψόμετρα, το βαροαλτίμετρο και το GPS συχνά δεν μπορούν να δώσουν ικανοποιητική ακρίβεια.
- Power Meter, μετρά την τάση και την ένταση του ρεύματος στα διάφορα ηλεκτρικά συστήματα του οχήματος. Στην συνήθη περίπτωση, όπου το UAV τροφοδοτείται από on-board μπαταρία, η συσκευή αυτή είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της υπολειπόμενης χωρητικότητας της μπαταρίας. Επιπλέον, είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση της σταθερότητας της τάσης του ρεύματος που παρέχεται στον αεροηλεκτρονικό εξοπλισμό του εναέριου οχήματος.

Επιπλέον το σύστημα αυτόματου πιλότου περιλαμβάνει τον ακόλουθο on-board εξοπλισμό και λογισμικό:

- Radio Modem (Datalink), για την τηλεμετρία και τον τηλεχειρισμό (datalink) του UAV μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε συσκευή που δύναται να παρέχει σειριακή σύνδεση. Γενικά συνίσταται αμφίδρομη επικοινωνία, αλλά δεν είναι απαραίτητη σε πολύ ειδικές εφαρμογές. Η πιο συνηθισμένη συσκευή ζεύξης δεδομένων είναι αυτή της σειράς XBee. Άλλα τέτοια συστήματα ζεύξης δεδομένων περιλαμβάνουν πομπούς ραδιοκυμάτων μεγάλου βεληνεκούς, όπως οι μονάδες Digi 9XTend, επικοινωνίες κυψελοειδών δικτύων ή δορυφορικές επικοινωνίες. Το τμήμα τηλεμετρίας της ζεύξης (από το UAV στο έδαφος), χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών σχετικών με την κατάσταση του UAV, για να βοηθήσει τον χειριστή και στην παρακολούθηση της προόδου της αποστολής, καθώς παρέχει και ορισμένα στοιχεία που αφορούν στο ωφέλιμο φορτίο. Η ζεύξη δεδομένων ή τμήμα απομακρυσμένου ελέγχου της ζεύξης (από το έδαφος στο UAV) χρησιμοποιείται για την αποστολή εντολών στο αεροσκάφος και την αλληλεπίδραση με το ωφέλιμο φορτίο. Για παράδειγμα, η τηλεμετρία παρέχει την τρέχουσα θέση του αεροσκάφους που μπορεί να προβληθεί σε ένα χάρτη GCS σε πραγματικό χρόνο, ενώ το datalink επιτρέπει σε ένα χρήστη να μετακινήσει σε πραγματικό χρόνο ένα waypoint στο έδαφος για να τροποποιήσει τη διαδρομή που το UAV θα ακολουθήσει.
- RC Receiver (Safety Link), χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πομπού και δέκτη ραδιοκυμάτων προκειμένου να παρασχεθεί η επιλογή του χειροκίνητου ελέγχου του UAV. Ο αερομεταφερόμενος εξοπλισμός και το λογισμικό υποστηρίζουν τη σύνδεση με ένα τυπικό δέκτη ραδιο-ελέγχου. Ο αυτόματος πιλότος διαβάζει το output από τον onboard δέκτη R/C και αποφασίζει την επιθυμητή λειτουργία ελέγχου. Στη χειροκίνητη λειτουργία, ένας χειριστής ασφαλείας στο έδαφος μπορεί να χρησιμοποιήσει τον πομπό R/C για να ελέγξει το αεροσκάφος (βλ. ενότητα 4.4). Στην περίπτωση των UAV πολλαπλών στροφείων, είναι συνήθως απαραίτητο κάποιο επίπεδο ελέγχου από τον υπολογιστή για να διατηρηθεί η σταθερότητα στην πτήση, ακόμη και κάτω από το "χειροκίνητο" έλεγχο. Αν και το safety link δεν είναι απαραίτητο για μία, κυριολεκτικά, αυτόνομη πτήση, ωστόσο μπορεί να βοηθήσει κατά τη διάρκεια της ρύθμισης ενός νέου αεροσκάφους και συνήθως θεωρείται ως ένα σημαντικό μέτρο ασφαλείας.
- Airborne Software, είναι το αερομεταφερόμενο τμήμα του λογισμικού που τρέχει στον κεντρικό πίνακα ελέγχου του αυτόματου πιλότου.

Το σύστημα αυτόματου πιλότου που χρησιμοποιείται για την αυτόματη πλοήγηση ενός UAV, βρίσκεται σε συνεχή αλληλεπίδραση με τον επίγειο σταθμό ελέγχου. Τα δύο αυτά συστήματα μπορούν να θεωρηθούν ως υποσυστήματα ενός ενιαίου συστήματος, του συστήματος αυτόματης πλοήγησης. Γίνεται λοιπόν κατανοητό, ότι ο επίγειος σταθμός ελέγχου θα πρέπει να υποστηρίζει όλες τις λειτουργίες του on-board συστήματος αυτόματου πιλότου, τόσο εκείνες που αφορούν στην καθ' αυτό αυτόματη πλοήγηση, όσο και εκείνες που αφορούν τον "χειροκίνητο" έλεγχο, και αφορούν κυρίως σε διάφορες ενέργειες ασφαλείας.

4.4.2. Επίγειοι σταθμοί ελέγχου

Ένας επίγειος σταθμός ελέγχου (GCS), είναι μία σταθερή ή μεταφερόμενη συσκευή για την παρακολούθηση και την πλοήγηση του μη επανδρωμένου οχήματος. Οι GCSs είναι πιθανότατα εξίσου σημαντικοί με το ίδιο το UAV και το ωφέλιμο φορτίο του, καθώς επιτρέπουν την “επικοινωνία” με τον χειριστή. Κάθε αλλαγή στη διαδρομή της εναέριας πλατφόρμας και οποιαδήποτε ενέργεια σχετίζεται με το φορτίο των αισθητήρων, προγραμματίζεται και είναι ορατή με τη βοήθεια αυτών των συστημάτων (Colomina, Molina 2014). Ένας GCS αποτελείται συνήθως από έναν επίγειο υπολογιστή, ένα λογισμικό ελέγχου, το επίγειο μέρος του datalink και το επίγειο μέρος του safety link.

Παρόλο που σε γενικές γραμμές, τα εμπορικά UAV, όπως εκείνα που αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο, είναι μη διαχωρίσιμα από την ενότητα που συνιστούν το UAV και GCS, υπάρχουν κάποιες εξελίξεις σε γενικής χρήσης UAV που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αυτοτελείς λύσεις, όπως ο Portable Ground Control Station, της UAV Factory.

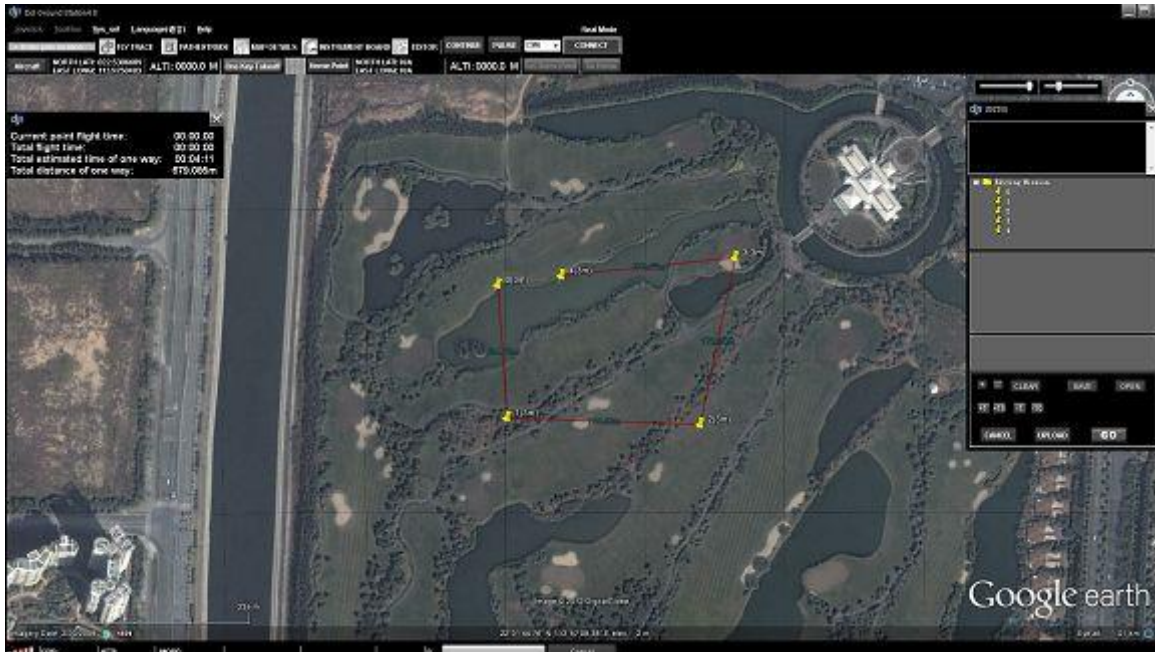
4.4.2.1. Επίγειο λογισμικό ελέγχου

Ίσης σημασίας με το αερομεταφερόμενο τμήμα του λογισμικού που τρέχει στον κεντρικό πίνακα ελέγχου του αυτόματου πιλότου, είναι το αντίστοιχο λογισμικό στον GCS, παρέχοντας την ανθρώπινη διεπαφή για την διαμόρφωση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της πτήσης του UAV. Οι **λειτουργικές απαιτήσεις**, ή άλλως οι συνηθέστερες λειτουργίες και χαρακτηριστικά που παρέχουν τα επίγεια λογισμικά ελέγχου, προκειμένου να αντιμετωπίσουν βασικά ζητήματα που αφορούν στην πτήση του UAV περιγράφονται εξαντλητικά κατωτέρω:

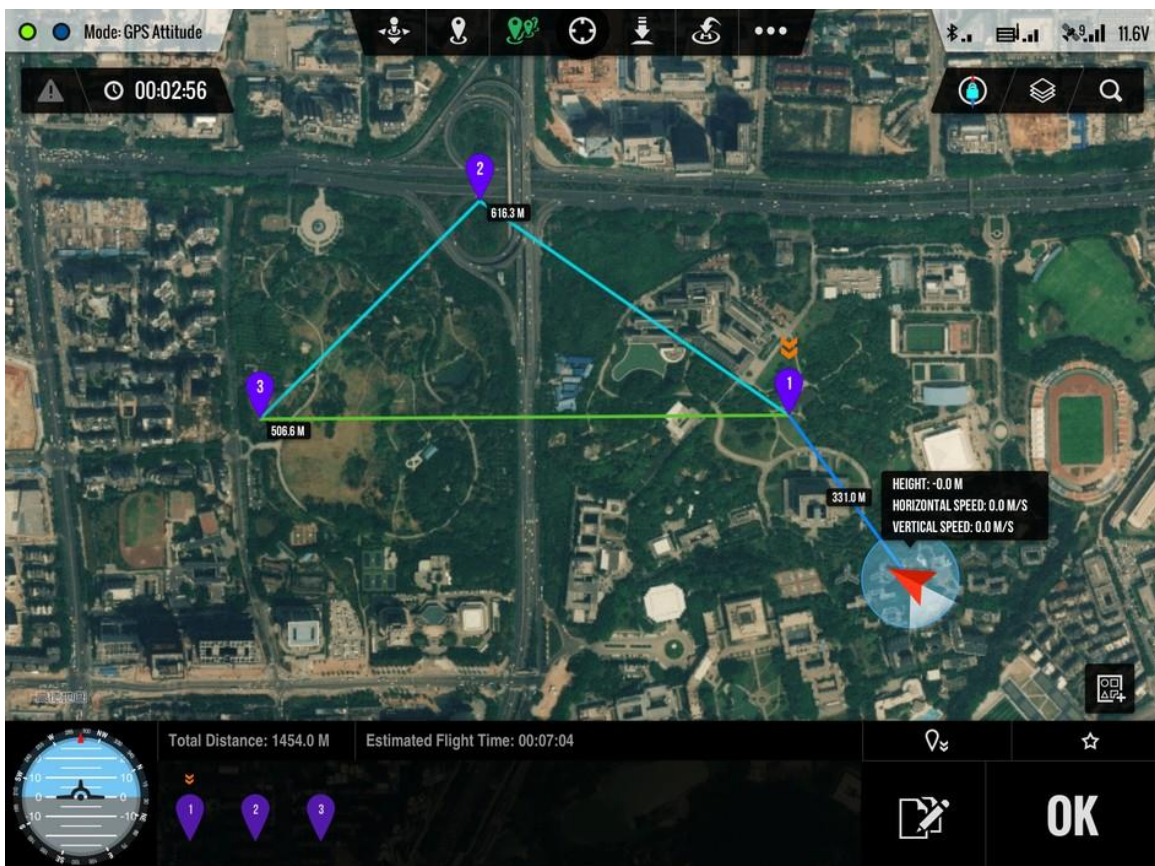
α. Χειρισμός εναέριου οχήματος

Η λειτουργία αυτή αναφέρεται στην ικανότητα αποτελεσματικού ελέγχου της εναέριας πλατφόρμας κατά τη διάρκεια της αποστολής. Συνεπάγεται την ύπαρξη των κατάλληλων ζεύξεων δεδομένων, που επιτρέπουν την εκτέλεση διαφόρων εντολών από το UAV. Η λειτουργία αυτή αναφέρεται ουσιαστικά, σε όλες εκείνες τις ενέργειες που το επίγειο λογισμικό ελέγχου επιτρέπει, τις σχετικές με τον καθ’ αυτό σχεδιασμό και την υλοποίηση της πτήσης, καθώς περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, την διενέργεια εντολών που υποβοηθούν την όλη αποστολή.

Ο χειρισμός του εναέριου οχήματος και η παρακολούθηση της αποστολής γίνονται, με τη βοήθεια του κατάλληλου λογισμικού, μέσω την διεπαφής που προσφέρει, στον επίγειο υπολογιστή (ή το tablet). Τα επίγεια λογισμικά ελέγχου προφέρουν κάποιο plug in ώστε στην οθόνη του υπολογιστή να εμφανίζεται ο χάρτης της περιοχής όπου θα γίνει η πτήση (συνήθως μέσω google maps) και να είναι ευκολότερος ο σχεδιασμός της.



Εικόνα 4.1: το interface του DJI Ground Station Software για PC (dji.com)

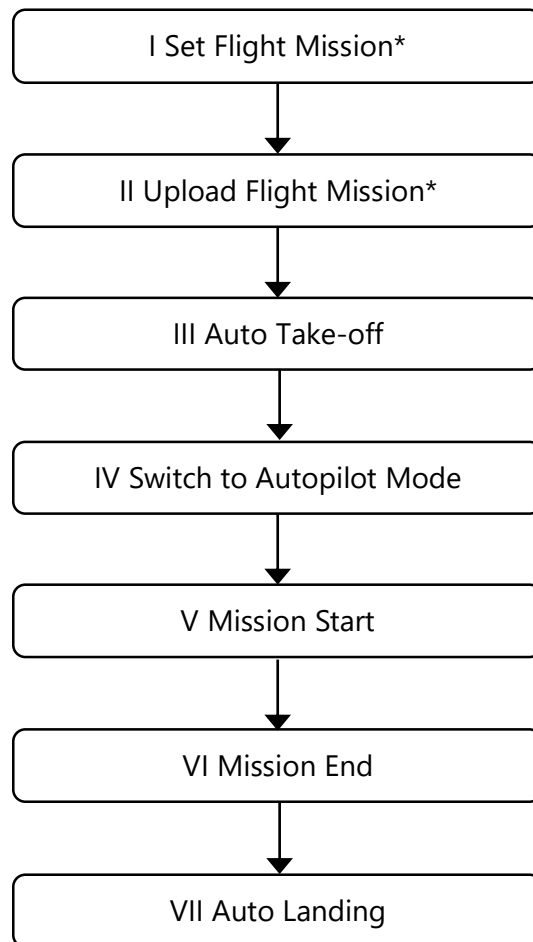


Εικόνα 4.2: το interface του DJI Ground Station Software για iPad (dji.com)

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής μίας αυτοματοποιημένης αποστολής, με όλα τα βήματα που προηγούνται και έπονται του σχεδιασμού της πτήσης, και αποτελούν μεμονωμένες εντολές προς το UAV, που θα αναλυθούν κατωτέρω. Οι

εντολές αυτές εντοπίζονται στα περισσότερα εμπορικά λογισμικά αυτόματης πλοήγησης UAV, αλλά και σε εκείνα που είναι ανοιχτού κώδικα.

(Τα βήματα με (*), ως τμήμα του καθ' αυτού σχεδιασμού πτήσης περιγράφονται στην επόμενη λειτουργία.)



Σχήμα 4.15: διάγραμμα ροής μίας τυπικής αυτοματοποιημένης αποστολής UAV

(III) Αυτόματη απογείωση

Η εντολή αυτόματης απογείωσης παρέχει εντολές για μία αυτόνομη ακολουθία απογείωσης. Τα UAV πολλαπλών στροφείων, σε αυτόματη λειτουργία, δεν απογειώνονται πάντα κατακόρυφα αλλά μπορεί να ακολουθούν κάποιο σπειροειδές μοτίβο – δηλαδή μπορεί να μην κινούνται μόνο κατακόρυφα κατά την αυτόματη απογείωση – και επομένως πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη ο απαιτούμενος χώρος απογείωσης. Τα UAV σταθερών πτερυγίων, όταν απογειώνονται με η χρήση εκτοξευτήρα, πρέπει να προγραμματίζονται ώστε, ο κινητήρας ο οποίος περιστρέφει την έλικα που βρίσκεται στο μπροστινό ή το πίσω

μέρος του αεροσκάφους να ξεκινά αυτόματα την λειτουργία του αμέσως μόλις γίνει η εκτόξευση. Τα UAV σταθερών πτερυγίων χωρίς εκτοξευτήρα, σε αυτή τη λειτουργία πρέπει να δέχονται αυτόματα εντολές από το λογισμικό, ώστε ενώ αναπτύσσεται μέγιστη ταχύτητα να διατηρούν σταθερό το heading στο διάδρομο απογείωσης (μέσω inputs αφορούν στο πηδάλιο), έως ότου επιτευχθεί η ταχύτητα απογείωσης· στη συνέχεια το αεροσκάφος εκτελεί μία επιμήκη άνοδο έως ότου επιτευχθεί το προβλεπόμενο ασφαλές ύψος που να μπορεί να κάνει στροφή.

(IV) Μετάβαση σε λειτουργία αυτόματου πιλότου

Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση της απογείωσης, το επόμενο βήμα, είναι να δοθεί στο εναέριο όχημα η εντολή για μετάβαση σε κάποια από τις λειτουργίες αυτόματου πιλότου που είναι διαθέσιμες στο λογισμικό (ενδεχομένως και σε ημιαυτόματες λειτουργίες).

(V) Έναρξη αποστολής

Με αυτή την εντολή θα ξεκινήσει η πλοήγηση του UAV αυτόματα, σύμφωνα με τη διαδρομή που έχει οριστεί στο σχεδιασμό της πτήσης.

Σημειώνεται, ότι πολλά από τα εμπορικά λογισμικά επίγειου ελέγχου, προσφέρουν την δυνατότητα επέμβασης στην προγραμματισμένη διαδρομή σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή, ο χειριστής μπορεί κατά τη διάρκεια της πτήσης να αλλάξει τη θέση ορισμένων waypoints, να ρυθμίσει εκ νέου ορισμένες παραμέτρους που αφορούν στην πτήση ή και να την τερματίσει πρόωρα.

(VI) Τερματισμός αποστολής

Με την εντολή αυτή τερματίζεται η πλοήγηση του UAV αυτόματα, μόλις ολοκληρωθεί η διαδρομή που έχει οριστεί στον σχεδιασμό πτήσης.

(VII) Αυτόματη προσγείωση

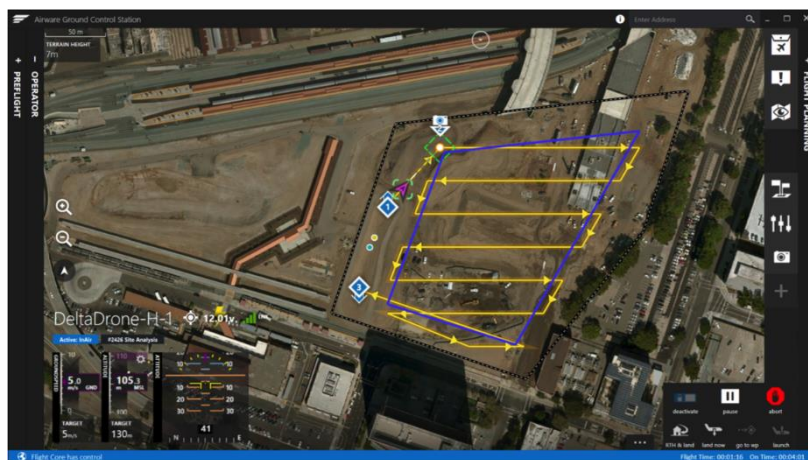
Είναι το τελευταίο βήμα της αποστολής. Παρέχει τις εντολές για μία αυτόνομη ακολουθία απογείωσης. Η προσγείωση καταλαμβάνει συχνά πολύ λιγότερο χώρο από την απογείωση. Η εντολή αυτόματης προσγείωσης δίνεται συνήθως για τα UAV σταθερών πτερυγίων μετά τον τερματισμό της αυτόματης πτήσης, ενώ για τα πολλαπλών στροφειών μετά την επιστροφή στο σημείο που έχει οριστεί ως αφετηρία. Τα πρώτα ακολουθούν μία κίνηση αντίστοιχη εκείνης κατά την απογείωση, ενώ τα δεύτερα μία κατακόρυφη κίνηση. Κατόπιν, οι κινητήρες μπορεί να σταματούν αυτόματα όπως έχει προγραμματιστεί ή χειροκίνητα με τη χρήση χειριστηρίου.

Ένα επιπλέον βήμα της όλης αποστολής, που λαμβάνει χώρα συνήθως πριν την αυτόματη απογείωση, για όλα τα UAV, είναι αυτό του ορισμού ενός σημείου αφετηρίας (Home Point) (βλέπε ενότητα 4.4.3). Πρόσθετα στοιχεία της λειτουργίας χειρισμού του οχήματος μπορεί να αφορούν αυτοματοποιημένες εντολές που δίνονται ανάλογα με την εμπορική εναέρια πλατφόρμα και το σχετικό λογισμικό που παρέχεται, όπως ότι το eBee της sensefly, που σταματάει στιγμιαία τον κινητήρα κατά την λήψη εικόνων για την αποφυγή κουνημένων εικόνων λόγω κραδασμών.

β. Σχεδιασμός πτήσης

Το επίγειο λογισμικό ελέγχου, πρέπει με τη λειτουργία αυτή να δρα βοηθητικά, ώστε να είναι δυνατόν, ο προγραμματισμός της φωτογραμμετρικής πτήσης που έγινε σε προηγούμενο στάδιο, να μετατραπεί σε εντολές για το UAV με κάθε του λεπτομέρεια. Αυτό πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψη τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της εναέριας πλατφόρμας. Η λειτουργία αυτή παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία στον χειριστή για να δημιουργήσει ένα βέλτιστο σχέδιο πτήσης που δεν θα θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια του UAV και με την υλοποίηση του θα παρέχει όλη την απαραίτητη μετρητική πληροφορία και τα σχετικά μεταδεδομένα (Natarajan, 2002). Ο σχεδιασμός της αυτόνομης πτήσης συνίσταται κυρίως στην σχεδίαση μίας διαδρομής που αποτελείται από waypoints και στην ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων που αφορούν τη διαδρομή αυτή.

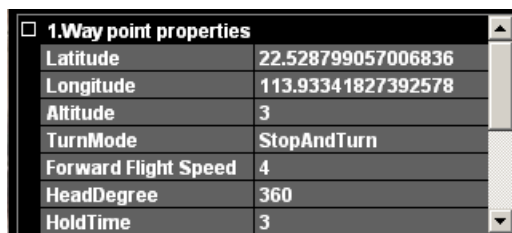
Τα waypoints είναι σημεία στο τρισδιάστατο χώρο, με ορισμένες συντεταγμένες σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Τα σημεία αυτά ορίζονται είτε χειροκίνητα, τοποθετώντας τα άμεσα πάνω στον χάρτη της περιοχής όπου γίνεται η πτήση (υπό μορφή πινέζας, κουκκίδας κ.ά.) ή έμμεσα εισάγοντας τις κατάλληλες συντεταγμένες, είτε αυτόματα με τη χρήση κάποιων έτοιμων προτύπων διαδρομής που υπάρχουν στο επίγειο λογισμικό. Για το έτοιμο πρότυπο της διαδρομής μπορεί να ρυθμιστεί το σχήμα της διαδρομής ή της περιοχής προς κάλυψη, η διεύθυνση που ακολουθούν οι γραμμές πτήσεις κ.α.



Εικόνα 4.3: ορισμός των waypoints στο Airware Ground Control Station με χρήση Pre-Programmed Route Templates (airware.com)

Επιπλέον, τα waypoints μπορούν να τοποθετηθούν και με συντεταγμένες σχετικές ως προς άλλο σημείο, είτε χρησιμοποιώντας τη διαφορά συντεταγμένων κατά x & y, είτε με πολικές συντεταγμένες από το προηγούμενο σημείο.

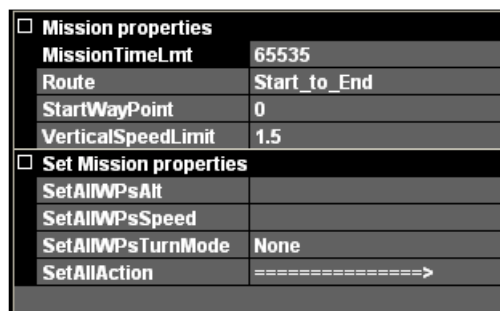
Σε κάθε μεμονωμένο waypoint που προστίθεται στην σχεδιαζόμενη διαδρομή, αντιστοιχούν κάποιες παράμετροι που ο αριθμός τους ποικίλλει ανάλογα με το λογισμικό. Τέτοιες παράμετροι είναι συνήθως: οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του σημείου, το υψόμετρο (σχετικό ή απόλυτο), ο τρόπος με τον οποίο το όχημα ακολουθεί κάποια στροφή της διαδρομής (πχ. αν θα περνά ακριβώς από το σημείο όπου θα σταματά και θα στρίβει στην σωστή διεύθυνση για να βρει το επόμενο, ακολουθώντας μια τεθλασμένη γραμμή ή η διαδρομή του θα γίνει καμπυλόγραμμη, μη περνώντας ακριβώς από το ορισμένο waypoint), η ταχύτητα κίνησης μέχρι το επόμενο σημείο, η διεύθυνση στην οποία πρέπει να κατευθύνεται το όχημα όταν φτάσει στο waypoint και το χρονικό διάστημα που θα αιωρείται πάνω από το συγκεκριμένο waypoint.



1.Way point properties	
Latitude	22.528799057006836
Longitude	113.93341827392578
Altitude	3
TurnMode	StopAndTurn
Forward Flight Speed	4
HeadDegree	360
HoldTime	3

Εικόνα 4.4: επεξεργασία παραμέτρων των waypoints στο DJI Ground Station Software για PC (dji.com)

Προσθέτως, στην σχεδιαζόμενη διαδρομή συνολικά, αντιστοιχούν κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν ενιαία την συμπεριφορά της εναέριας πλατφόρμας για όλα τα waypoints. Τέτοιες παράμετροι είναι συνήθως: το υψόμετρο της διαδρομής, η ταχύτητα, το χρονικό όριο της διαδρομής (αν η αποστολή διαρκέσει περισσότερο από αυτό το ορισμένο χρονικό διάστημα, το UAV επιστρέφει στο σημείο που έχει οριστεί ως αφετηρία), το όριο της κατακόρυφης ταχύτητας, ο τρόπος με τον οποίο το όχημα θα ακολουθεί τις στροφές της διαδρομής και το αν το όχημα θα επιστρέφει το πρώτο waypoint ακολουθώντας κλειστή διαδρομή ή ανοικτή διαδρομή.

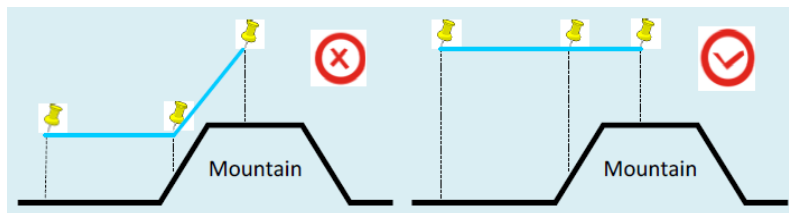


Mission properties	
MissionTimeLmt	65535
Route	Start_to_End
StartWayPoint	0
VerticalSpeedLimit	1.5

Set Mission properties	
SetAIWPsAlt	
SetAIWPsSpeed	
SetAIWPsTurnMode	None
SetAIAction	=====>

Εικόνα 4.5: επεξεργασία παραμέτρων της αποστολής στο DJI Ground Station Software για PC (dji.com)

Σχετικά με τον ορισμό των υψομέτρων των waypoints, πρέπει να δίνεται προσοχή όταν στην περιοχή που λαμβάνει χώρα η αποστολή υπάρχει κάποιο ύψωμα ώστε να υπάρχει αρκετή απόσταση μεταξύ αυτού και του UAV για να αποφευχθεί τυχόν σύγκρουση που οφείλεται στις ταχύτητες του αέρα. Επίσης, προσοχή πρέπει να δίνεται όταν ορίζεται κάποιο waypoint πάνω από έναν υδάτινο όγκο (όπως ποτάμι, λίμνη, θάλασσα), επειδή τα υψόμετρα του χάρτη στα περισσότερα λογισμικά αντιστοιχούν στον βυθό του υδάτινου όγκου.



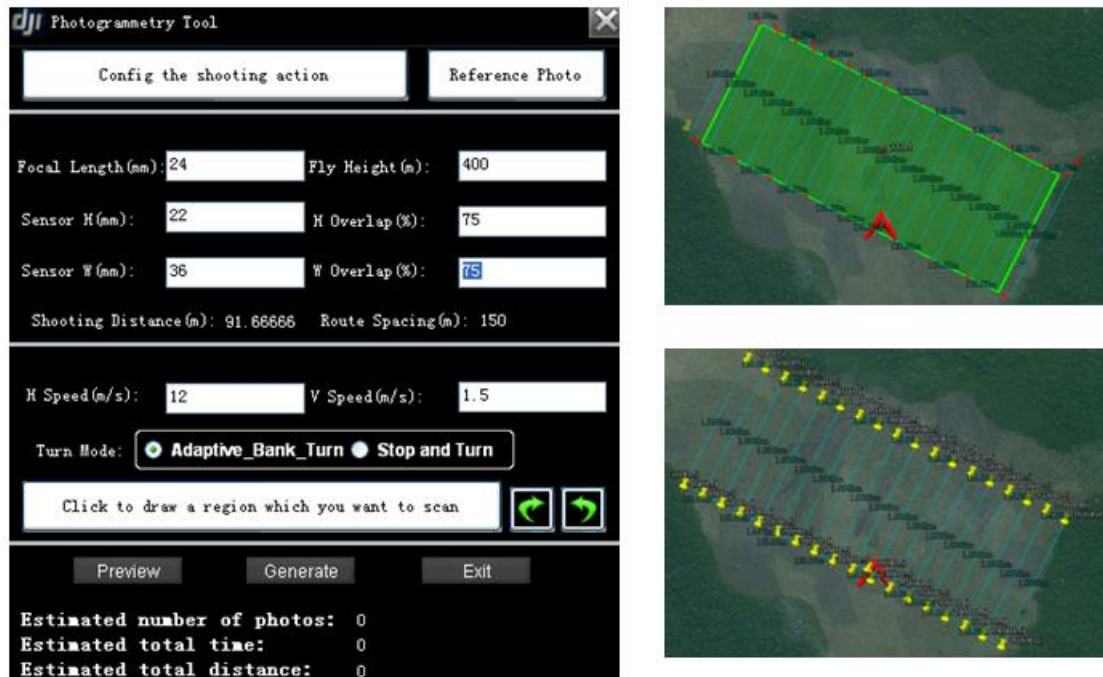
Εικόνα 4.7: τοποθέτηση waypoints σε περιοχή με μη ομαλό υψόμετρο



Εικόνα 4.8: σχεδιασμός της αυτόματης πτήσης στο APM Mission Planner της 3D Robotics (3drobotics.com)

Για τη δημιουργία ορθοφωτοχαρτών με αεροφωτογραφίες, ορισμένα εμπορικά λογισμικά, όπως το DJI Ground Station Software και το APM Mission Planner, διαθέτουν κάποια “φωτογραμμετρικά εργαλεία”, με στόχο την απλοποίηση της ρύθμισης των παραμέτρων της πτήσης, και κατ’ επέκταση της όλης αποστολής. Ουσιαστικά τα εργαλεία αυτά προσφέρουν κάποιους συνδυασμούς ρυθμίσεων που αλλάζουν ανάλογα με τις τιμές των μεταβλητών που θα δοθούν στο λογισμικό και αφορούν το φωτογραμμετρικό μπλοκ

(επιφάνεια κάλυψης, ύψος πτήσης, εστιακό μήκος, διαστάσεις αισθητήρα φωτομηχανής, κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη, οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα αεροσκάφους), προκειμένου να μην απαιτείται προηγούμενος προγραμματισμός της πτήσης αλλά ο προγραμματισμός να γίνεται εντός του ίδιου του επίγειου λογισμικού ελέγχου του εναέριου οχήματος.

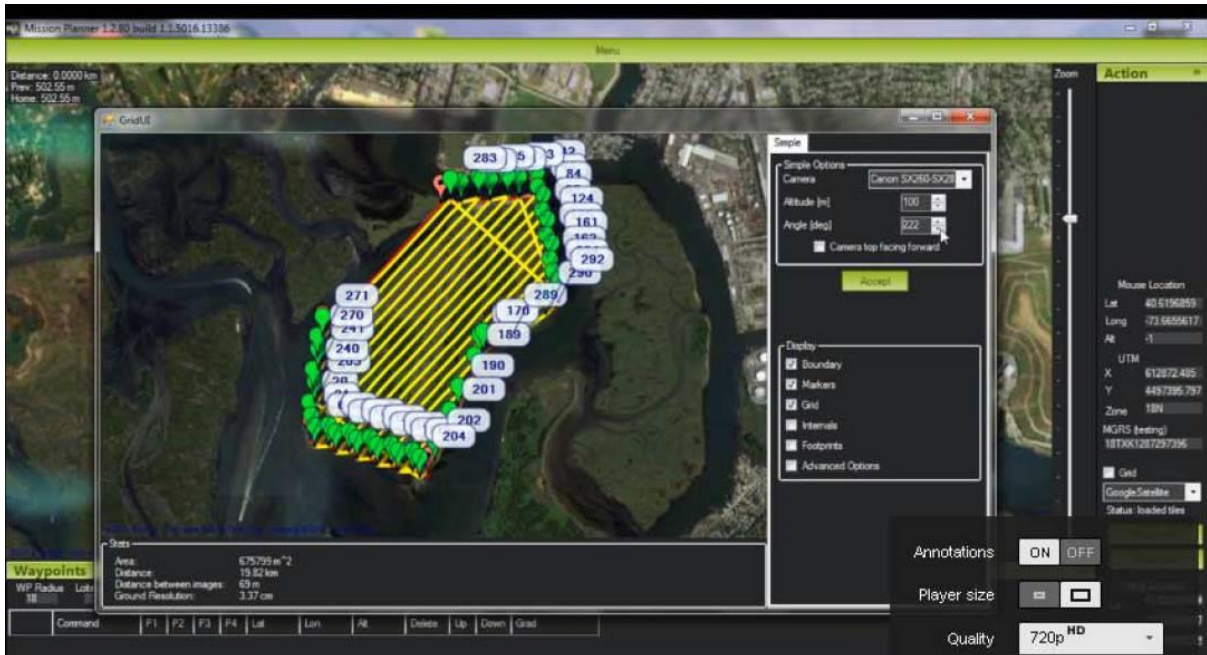


Εικόνα 4.9: αυτοματοποιημένη δημιουργία waypoints - προγραμματισμός πτήσης με το Photogrammetry Tool στο DJI Ground Station Software για PC (dji.com)

γ. Χειρισμός φορτίου

Η λειτουργία αυτή αναφέρεται στην ικανότητα αποτελεσματικού ελέγχου του ωφέλιμου φορτίου της εναέριας πλατφόρμας. Οι τοποθετημένοι στην εναέρια πλατφόρμα αισθητήρες δέχονται εντολές από το έδαφος και τα παράγωγά τους πρέπει να μπορέσουν να αποκτηθούν για να υποστούν επεξεργασία. Αυτός ο χειρισμός απαιτεί αυτοματοποιημένες εντολές που προέρχονται από το επίγειο λογισμικό, φθάνουν στον εναέριο εξοπλισμό μέσω της ζεύξης δεδομένων, εκτελούνται από το ειδικό φορτίο που μεταφέρεται από την πλατφόρμα ώστε να γίνει χρήση των μετρητικών πληροφοριών που λαμβάνονται με τη βοήθεια συσκευών προβολής και επεξεργασίας και αποθηκευτικών μέσων (Natarajan, 2002).

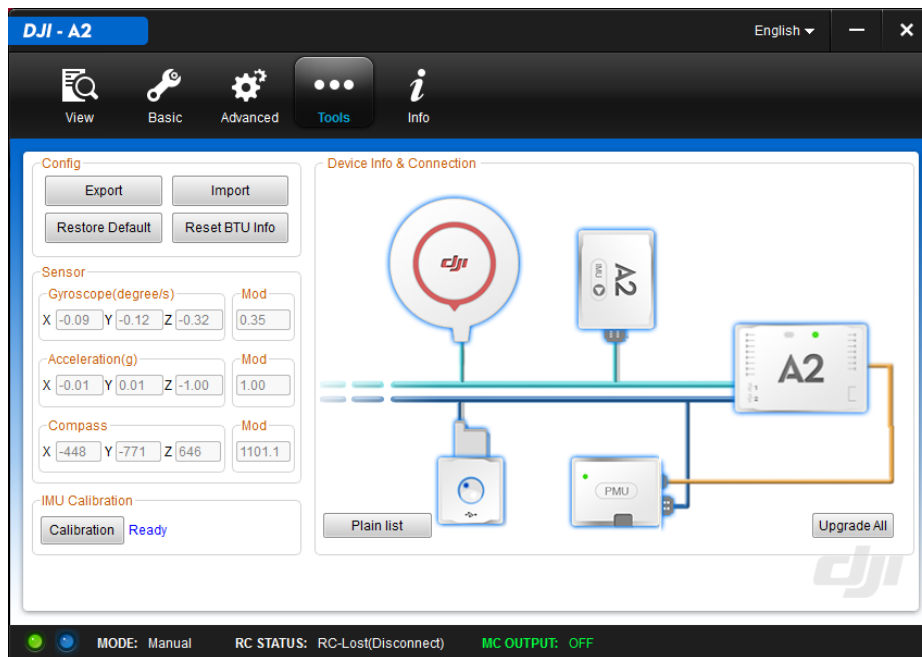
Κάποια λογισμικά αυτόματου πιλότου, όπως τα APM Mission Planner και PX4 της 3D Robotics, επιτρέπουν τον αυτόματο χειρισμό της φωτομηχανής, ρυθμίζοντας σε ποια σημεία θα ενεργοποιείται και πόσες φορές το κλείστρο του φακού, καθώς και υπό ποια γωνία θα γίνεται η λήψη της εικόνας. Αυτό γίνεται στο μενού του "Photogrammetry Tool" ή "Survey Tool" που ενυπάρχει στο λογισμικό.



Εικόνα 4.10: Mapping Camera Automatically Triggered by APM Mission Planner (flightriot.com)

δ. Διαγνωστικά εναέριου οχήματος και φορτίου

Λόγω των λειτουργικών δυνατοτήτων που παρέχονται από το μη επανδρωμένο σύστημα, τόσο η εναέρια πλατφόρμα όσο και ο GCS, τείνουν να είναι πολύπλοκα συστήματα. Για το λόγο αυτό η αποτελεσματική λειτουργία και συντήρησή τους, απαιτεί την ύπαρξη ενδείξεων εντός του λογισμικού, που θα αντιστοιχούν στις παραμέτρους του συστήματος και τα τυχόν προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης.



Εικόνα 4.11: παράμετροι συστήματος στο DJI A2 (dji.com)

Η διάγνωση προβλημάτων κατά την χρήση του μη επανδρωμένου συστήματος διευκολύνεται με την ανάγνωση αρχείων, όπου αποθηκεύονται οι εντολές προς την εναέρια πλατφόρμα κατά τη διάρκεια της πτήσης.

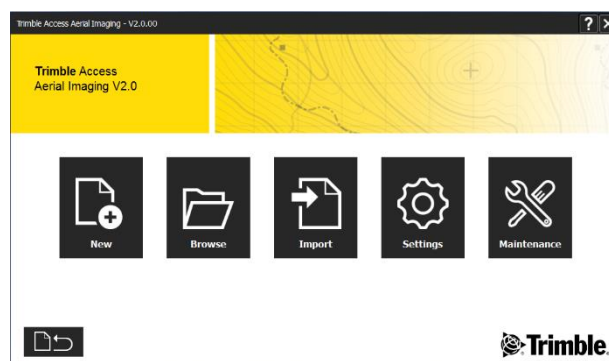
ε. Αποθήκευση δεδομένων

Η λειτουργία αυτή αφορά κυρίως στην αποθήκευση δεδομένων σχετικών με τις παραμέτρους της αποστολής, αφού η πληροφορίες που συλλέγονται από την εναέρια πλατφόρμα αποθηκεύονται σε κάποιο on-board αποθηκευτικό μέσο. Εξαιρέση σε αυτό αποτελεί η περίπτωση της άμεσης γεωαναφοράς (βλέπε κεφάλαιο 6), όπου ορισμένα επιπλέον δεδομένα αποθηκεύονται από το λογισμικό επίγειου ελέγχου (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων), αν και τα δεδομένα αυτά απαιτούν κάποιο επίπεδο μετεπεξεργασίας προκειμένου να αξιοποιηθούν όπως αναλύεται κατωτέρω.

Κάθε σταθμός επίγειου ελέγχου συνδέεται συνήθως με ένα φάκελο καταγραφής δεδομένων, όπου μπορούν να αποθηκευτούν, αφενός διαφορετικές διαδρομές πτήσης (που μπορούν να ανακτηθούν και να υποστούν επεξεργασία ανά πάσα στιγμή) και αφ' ετέρου όλες οι εντολές που εκπέμπονται και από την ράδιο-μονάδα και καταγράφονται κατά τη διάρκεια της αποστολής. Επισημαίνεται ότι τα αρχεία αυτά μπορούν να διαβαστούν σε περίπτωση που αυτό είναι επιθυμητό.

στ. Επεξεργασία συλλεχθέντων δεδομένων

Εν γένει, η πληροφορίες εικόνες που λαμβάνονται από το φορτίο της εναέριας πλατφόρμας χρειάζονται επεξεργασία για την αντιστάθμιση των εξωτερικών συνθηκών που επιδρούν σε αυτές κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η δυνατότητα, επεξεργασίας των εικόνων παρέχεται από ένα υποσύστημα επεξεργασίας εικόνας (βλέπε κεφάλαιο 5) με την απαραίτητη ικανότητα επικοινωνίας με το επίγειο λογισμικό ελέγχου, που αναλύει εξάγει μετρητική πληροφορία και διαδίδει τα δεδομένα στους ενδεχόμενους χρήστες.



Εικόνα 4.12: Trimble Access™ field software
(uas.trimble.com/aerial-imaging)

4.4.2.2. Επίγειο μέρος του Datalink

Το επίγειο μέρος του Datalink είναι αυτό που επιτρέπει την επικοινωνία και την αποστολή εντολών από το επίγειο λογισμικό ελέγχου στο εναέριο σύστημα, προσφέροντας όλες τις δυνατότητες επίβλεψης τις αυτόματης πτήσης από το έδαφος. Συνήθως κάνει χρήση ενός αμφίδρομου ασύρματου μόντεμ που υποστηρίζει τόσο την τηλεμετρία (downlink) όσο και τον τηλεχειρισμό (uplink).

Χάρη σε αυτήν την ζεύξη δεδομένων, οι παράμετροι πτήσης είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο και ο πλήρης έλεγχος της πλοήγησης και η ρύθμιση του εναέριου οχήματος είναι δυνατή από τον επίγειο σταθμό ελέγχου.

4.4.2.3. Επίγειο μέρος του Safety Link

Το επίγειο μέρος της σύνδεσης ασφαλείας συνήθως αποτελείται από ένα τηλεχειριστήριο και έναν πιλότο ασφαλείας. Χρησιμοποιείται για να παρέχει χειροκίνητο έλεγχο στο UAV.

4.4.3. Δικλείδες ασφαλείας

Στα περισσότερα εμπορικά συστήματα αυτόματης πλοήγησης υπάρχει μία λειτουργία ασφαλείας, η οποία συνήθως ονομάζεται Failsafe. Το Failsafe ενεργοποιείται όταν χαθεί το σήμα του χειριστήριου. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα πλοήγησης του εναέριου οχήματος αυτόματα θα πάρει τον έλεγχο, προκειμένου να αποφευχθούν τραυματισμοί ή ζημιές. Σε ορισμένα on-board λογισμικά αυτόματης πλοήγησης, είναι δυνατόν να προγραμματισθεί η λειτουργία Failsafe να ενεργοποιείται και σε περίπτωση χαμηλωμένης μπαταρίας, με την προϋπόθεση να υπάρχει τοποθετημένος στην πλατφόρμα ο κατάλληλος αισθητήρας τάσης/αντίστασης, σε περίπτωση που χαθεί το σήμα GPS (χρήση του INS) ή όταν το UAV απομακρυνθεί εκτός ορισμένων ορίων. Ακόμη, είναι δυνατόν να οριστεί ένα "κουτί περιορισμού" του UAV με βάση την αναμενόμενη περιοχή πτήσης του. Αν το όχημα βγει εκτός της περιοχής αυτής θα σημαίνει ότι δεν ακολουθεί την προγραμματισμένη πτήση και θα πρέπει να επιστρέψει στο Home Point, επομένως ενεργοποιείται το Failsafe. Προσθέτως, σημειώνεται, ότι σε περίπτωση που το λογισμικό αυτόματης πλοήγησης σταματήσει να λειτουργεί, υπάρχουν πολύ περιορισμένες επιλογές λειτουργιών ασφαλείας εκτός από κάποιο εφεδρικό σύστημα πλοήγησης. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι ένα πολύ πιο απλό μικρότερης ακρίβειας αυτόματο σύστημα πλοήγησης που θα επιχειρήσει μια πιο βασική και ίσως ανώμαλη, πλην ελεγχόμενη, προσγείωση ή ένα τηλεχειριστήριο.

Πριν την ενεργοποίηση αυτής της δικλείδας ασφαλείας, απαιτείται ο ορισμός ενός σημείου αφετηρίας (Home Point). Το σημείο αυτό καταγράφεται με ακίνητο το UAV στο έδαφος και ορισμένο αριθμό, από τον κατασκευαστή, δευτερολέπτων ισχυρού σήματος GPS.

Η ρύθμιση του Failsafe είναι αυτή που καθορίζει τι θα συμβεί όταν χαθεί το σήμα του απομακρυσμένου ελέγχου. Συνήθως επιλέγεται αν το UAV θα επιστρέψει στο Home Point ή θα αιωρείται πάνω από αυτό σε προκαθορισμένο υψόμετρο.

Η επιστροφή στο ορισμένο Home Point μπορεί και να ενεργοποιηθεί από το χειριστήριο χωρίς να έχει χαθεί το σήμα (One-Key Go Home), για τη διευκόλυνση του χειριστή στην προσγείωση του UAV. Χρησιμοποιείται δηλαδή και στην χειροκίνητη πτήση. Εάν το Failsafe ενεργοποιηθεί κατά τη διάρκεια της χειροκίνητης ενεργοποίησης του One-Key Go Home από το τηλεχειριστήριο, τότε το UAV δεν θα μπορεί να επιστρέψει σε χειροκίνητη λειτουργία μέχρι την επιστροφή στο Home Point.

4.5. Χειροκίνητη Πτήση

Στην ενότητα αυτή, γίνεται αναφορά στους βασικούς χειρισμούς ενός UAV σε χειροκίνητη λειτουργία, στα τηλεχειριστήρια, στους ελέγχους πριν την χειροκίνητη πτήση, τα προληπτικά μέτρα ασφαλείας και στην αντιμετώπιση των καιρικών συνθηκών. Η αναφορά στους βασικούς χειρισμούς γίνεται εδώ μόνο για τα UAV πολλαπλών στροφείων, καθώς είναι αυτά που κατά κόρον χρησιμοποιούνται σε χειροκίνητη λειτουργία στο πλαίσιο εφαρμογών που απαιτούν την εναέρια λήψη εικόνων. Χρησιμοποιείται συγκεκριμένα το παράδειγμα της πτήσης quadcopter, καθώς για όλες τις διατάξεις βραχιόνων/στροφείων στις πλατφόρμες των UAV οι χειρισμοί είναι εν γένει πανομοιότυποι.

4.5.1. Τηλεχειριστήρια¹

Ένα τηλεχειριστήριο, είναι ένας μεταδότης σήματος που επιτρέπει την πλοήγηση του εναέριου οχήματος και τον απομακρυσμένο έλεγχο του ίχνους της πτήσης του. Όταν γίνεται κάποια αναπροσαρμογή στους μοχλούς του, στέλνεται σήμα στο όχημα που περιλαμβάνει εντολές για το πώς θα κινηθεί. Τα τηλεχειριστήρια ποικίλλουν όσον αφορά στο μέγεθος, στο σχήμα και στο πλήθος των διαφορετικών χειρισμών που μπορούν να υποστηρίξουν, υπάρχουν όμως κάποια στοιχεία που υπάρχουν σε όλα τα τηλεχειριστήρια.

Κατωτέρω δίνεται ένα παράδειγμα που περιγράφει την λειτουργία κάθε μέρους του τηλεχειριστηρίου στην χειροκίνητη πτήση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.13.

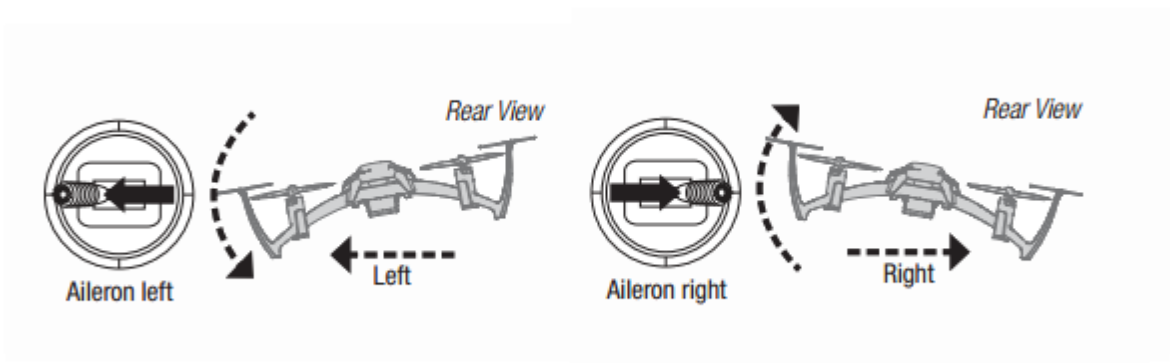
¹ Χάριν ευκολίας, γίνεται η υπόθεση ότι ο αριστερός μοχλός του χειριστηρίου ελέγχει το yaw και το throttle, και το δεξιό το roll και το pitch. Ορισμένα χειριστήρια επιτρέπουν στον χειριστή να αλλάξει αυτούς τους χειρισμούς με βάση το τι τον διευκολύνει περισσότερο στον χειρισμό του UAV.



Εικόνα 4.13: Τα χαρακτηριστικά του WFT06X-A της WFLY (uavcoach.com)

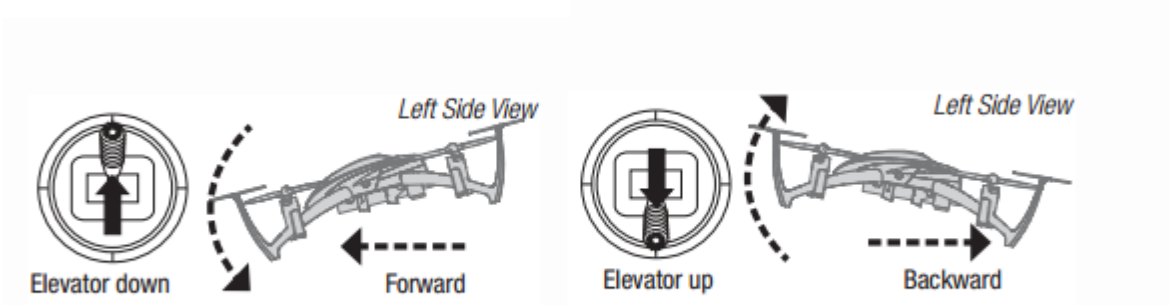
4.5.2. Βασικοί χειρισμοί

Roll (aileron), ελέγχεται κινώντας δεξιά ή αριστερά τον δεξιό μοχλό του τηλεχειριστηρίου. Βοηθά να κινηθεί το όχημα προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά. Για παράδειγμα, μία κίνηση προς τα δεξιά του δεξιού μοχλού του τηλεχειριστηρίου θα έχει ως αποτέλεσμα το όχημα να αποκτήσει κλίση προς τα δεξιά.



Σχήμα 4.16: παράδειγμα quadcopter rolling προς τα δεξιά και προς τα αριστερά (uavcoach.com)

Pitch (elevator), ελέγχεται κινώντας πάνω ή κάτω τον δεξιό μοχλό του τηλεχειριστηρίου. Βοηθά να κινηθεί το όχημα προς τα μπρος ή προς τα πίσω. Για παράδειγμα, μία κίνηση προς τα πάνω του δεξιού μοχλού του τηλεχειριστηρίου θα έχει ως αποτέλεσμα το όχημα να αποκτήσει κλίση προς τα εμπρός.



Σχήμα 4.17: παράδειγμα quadcopter pitching προς τα μπρος και προς τα πίσω (uavcoach.com)

Yaw (rudder), ελέγχεται κινώντας δεξιά ή αριστερά τον αριστερό μοχλό του τηλεχειριστηρίου. Βοηθά στην περιστροφή του οχήματος κατά την φορά ή κατά την αντίστροφη φορά των δεικτών του ρολογιού. Για παράδειγμα, μία κίνηση του αριστερού μοχλού προς τα δεξιά θα έχει ως αποτέλεσμα το μπροστινό μέρος του οχήματος να στρίψει προς τα δεξιά. Επιστάται η προσοχή στο ότι όταν το μπροστινό μέρος του UAV έχει πρόσωπο προς τον χειριστή του και όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση, τότε οι ανωτέρω χειρισμοί αντιστρέφονται.

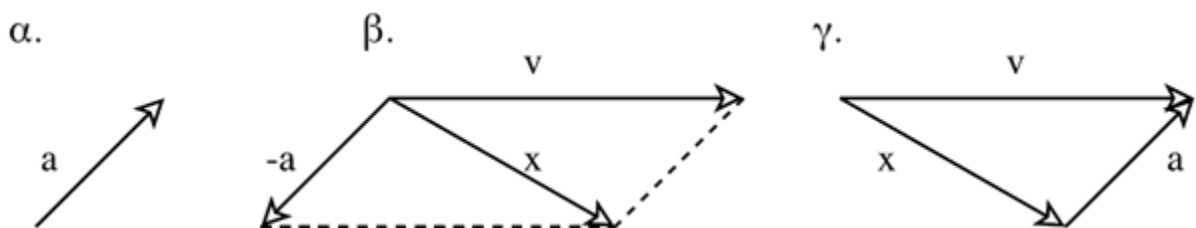
Throttle, ελέγχει την ταχύτητα των στροφειών. Βοηθά σε όλες τις μεταφορικές κινήσεις του οχήματος. Η κίνηση του μοχλού πάνω από ένα προ-ρυθμισμένο σημείο δίνει μεγαλύτερη δύναμη στους κινητήρες που στρέφουν τις έλικες, ενώ η κίνηση κάτω από αυτό δίνει στους κινητήρες μικρότερη δύναμη.

Trim Buttons, βοηθούν στον ευτρεπισμό των τεσσάρων βασικών χειρισμών.

Για την απογείωση και την προσγείωση του οχήματος, ο μόνος χειρισμός που απαιτείται είναι το throttle. Πριν από την απογείωση πρέπει να υπάρχει αρκετή εξοικείωση με την ευαισθησία του μοχλού που χειρίζεται το throttle, ώστε ο χειριστής να γνωρίζει ότι μία μικρή κίνηση του μοχλού πάνω από το προ-ρυθμισμένο σημείο που αναφέρθηκε ανωτέρω θα έχει ως αποτέλεσμα την απογείωση του οχήματος ή την ανύψωσή του με μικρή ταχύτητα, ενώ μια μικρή κίνηση του αριστερού μοχλού κάτω από αυτό το σημείο θα έχει ως αποτέλεσμα το χαμήλωμα του οχήματος. Για την εκτέλεση της προσγείωσης το όχημα θα πρέπει να διατηρείται οριζόντιο και να πραγματοποιούνται σταδιακά μικρές κινήσεις του αριστερού μοχλού προς τα κάτω έως ότου τα στροφεία σταματήσουν να περιστρέφονται εντελώς. Στη συνέχεια με κάποιο συνδυασμό κινήσεων των μοχλών, που διαφέρει σε κάθε χειριστήριο, σταματά και η λειτουργία των κινητήρων.

4.5.3. Αντιμέτωπιση των καιρικών συνθηκών

Κατά την χειροκίνητη πτήση οι καιρικές και οι άλλες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο εκτελείται η πτήση του UAV, πρέπει να λαμβάνονται ακόμα πιο σοβαρά υπ' όψη, καθώς πρέπει να αντιμετωπίζονται με τρόπο χειροκίνητο. Όταν πραγματοποιείται κάποια πτήση με ισχυρούς ανέμους – ενώ γενικά αυτό πρέπει να αποφεύγεται – ο χειριστής θα πρέπει να σκέφτεται ότι η κίνηση που πρέπει να πραγματοποιήσει μέσω του χειριστηρίου δεν είναι μόνο αυτή που προβλέπει ο σχεδιασμός της πτήσης που έχει κάνει. Για την πραγματοποίηση της κίνησης του οχήματος προς την επιθυμητή κατεύθυνση, θα πρέπει να δίνεται εντολή κίνησης από το τηλεχειριστήριο ίση με τη συνισταμένη της αντίθετης κίνησης από αυτή που θα προκαλέσει η δύναμη του ανέμου και της επιθυμητής κίνησης. Με τον τρόπο αυτό, η τελική συνισταμένη της «σύνθετης» κίνησης για την οποία θα δοθούν εντολές στο όχημα και της κίνησης που θα προκληθεί από τον άνεμο, θα είναι η αρχικώς επιθυμητή κίνηση. Τα ανωτέρω σχηματοποιούνται στο 4.18.



Σχήμα 4.4: κίνηση του UAV σε συνθήκες ισχυρών ανέμων, α. η ταχύτητα του ανέμου (a), β. η συνισταμένη ταχύτητα (x) που εφαρμόζεται, της επιθυμητής ταχύτητας (v) και της αντίθετης από την ταχύτητα του ανέμου ($-a$), γ. η επιθυμητή ταχύτητα (v) ως αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης ταχύτητας (x) και της ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου έχει μεγάλη επίδραση στην απόκριση του UAV στους διάφορους χειρισμούς, και ιδιαίτερα κατά την απογείωση. Ανάλογα με τη διεύθυνσή του και το ανάγλυφο της περιοχής μπορεί να απαιτείται πολύ λιγότερο ή πολύ περισσότερο throttle. Το ίδιο ισχύει και για την προσγείωση.

Κατά την χειροκίνητη πτήση το όχημα, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ριπές του ανέμου. Όταν αυτές είναι ισχυρές, το όχημα δεν πρέπει να κινείται πολύ κοντά στο έδαφος ή σε φυσικά και ανθρωπογενή εμπόδια γιατί υφίσταται κίνδυνος σύγκρουσης.

Σημειώνεται ότι όπως και στην αυτόματη πτήση πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες πρέπει να αποφεύγονται για την αποφυγή ζημιών στους κινητήρες και τις μπαταρίες. Τα ειδικά κάλυπτρα που χρησιμοποιούνται για τα UAV πολλαπλών στροφείων δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για πτήση σε βροχή, είναι απαραίτητα όμως για την κατά το δυνατόν ασφαλή επιστροφή του οχήματος σε περίπτωση απρόβλεπτης βροχόπτωσης.

4.5.4. Προληπτικά μέτρα και δικλείδες ασφαλείας

- (1) Πριν την ενεργοποίηση του τηλεχειριστηρίου ο χειριστής πρέπει να είναι σίγουρος ότι ο μοχλός του throttle είναι στο κατώτερο σημείο του.
- (2) Επίσης πριν την ενεργοποίηση του τηλεχειριστηρίου, ο χειριστής θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι υπάρχει αρκετός χώρος για την απογείωση και την προσγείωση του αεροσκάφους και να βρίσκεται απόσταση ασφαλείας από το όχημα.
- (3) Η ακτίνα πτήσης του οχήματος πρέπει να είναι μικρότερη από το εύρος σήματος του τηλεχειριστηρίου, διότι σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να χαθεί ο έλεγχος του οχήματος.
- (4) Καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης ο χειριστής θα πρέπει να είναι στραμμένος προς το όχημα και να μην αφήσει το χειριστήριο από τα χέρια του.
- (5) Πρέπει να διατηρείται οπτική επαφή με το όχημα σε όλη τη διάρκεια της πτήσης, ώστε ο χειριστής να γνωρίζει πότε υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης ή άλλου ατυχήματος.
- (6) Εάν πρόκειται να γίνει σύγκρουση με κάποιο αντικείμενο, ο μοχλός του throttle πρέπει να μετακινηθεί στο κατώτερο σημείο του για να αποφευχθούν περαιτέρω ζημιές στο όχημα ή τραυματισμοί.
- (7) Ούτε ο χειριστής ούτε κανένα αντικείμενο δεν θα πρέπει να ακουμπά στις έλικες του οχήματος όταν οι κινητήρες είναι ενεργοποιημένοι.
- (8) Μετά το πέρας της πτήσης και πριν την διενέργεια οποιωνδήποτε επιδιορθώσεων ή εργασιών πάνω στην πλατφόρμα θα πρέπει να αποσυνδέονται και να αφαιρούνται οι μπαταρίες.
- (9) Σε περίπτωση βλάβης ή άλλης εκτάκτου ανάγκης η λειτουργία One-Key Go Home μπορεί να ενεργοποιηθεί όπως και στην αυτόματη πτήση από το τηλεχειριστήριο για την ασφαλή επιστροφή του οχήματος, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει έστω και κάποιο υποτυπώδες σύστημα πλοήγησης ή INS για την καταγραφή Home Point
- (10) Στην χειροκίνητη πτήση πρέπει να δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στις οπτικές ενδείξεις και τα ηχητικά μηνύματα των συστημάτων της εναέριας πλατφόρμας, καθώς δεν υπάρχει το επίγειο λογισμικό ελέγχου για την παρακολούθηση όλων των παραμέτρων της πτήσης και των τυχόν απορρυθμίσεων των αερομεταφερόμενων συστημάτων.

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ UAV

Όπως και στην παραδοσιακή εναέρια Φωτογραμμετρία, η επεξεργασία των εικόνων που συλλέγονται με τη βοήθεια μη επανδρωμένων οχημάτων, είναι ένα σημαντικό βήμα στην αξιοποίηση των υπηρεσιών που μπορούν να προσφέρουν τα συστήματα αυτά στις φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Κατ' αρχήν, όπως είναι αναμενόμενο, τα προϊόντα της Φωτογραμμετρίας με UAV είναι παρόμοια με αυτά της εναέριας Φωτογραμμετρίας, αφού ακολουθούν την ίδια διαδικασία παραγωγής, με κάποιες επιρροές από την εγγύς-επίγεια Φωτογραμμετρία. Πράγματι, οι Φωτογραμμετρικές εφαρμογές με UAV αφορούν πάντα σε κάποιο πρόβλημα με ένα μπλοκ αεροφωτογραφιών που πρέπει να επιλυθεί, αξιοποιώντας και ορισμένες από τις γνώσεις της εγγύς Φωτογραμμετρίας. Άλλωστε, αυτό είναι και το αντικείμενο των παραδοσιακών Φωτογραμμετρικών προϊόντων σήμερα: η παραγωγή ορθοφωτογραφιών και μοντέλων υψομέτρου/επιφανείας, δεχόμενοι ότι ο προηγούμενος προσανατολισμός των εικόνων και η βαθμονόμηση της μηχανής είναι διαθέσιμα (Colomina, Molina, 2014). Η τάση αυτή δείχνει ότι, στο εγγύς μέλλον, αυτή θα είναι η περίπτωση για τα περισσότερα Φωτογραμμετρικά προϊόντα, καθώς, αφού προσανατολιστούν οι εικόνες και βαθμονομηθούν οι φωτομηχανές, μπορεί να διεξαχθεί αυτόματα, υποβοηθούμενη χειροκίνητη ερμηνεία της εικόνας (σημασιολογική εξαγωγή χαρακτηριστικών) για την παραγωγή 3D μοντέλων διαφορετικών επιπέδων λεπτομέρειας (Qin et al., 2013). Βέβαια, η απόκλιση από την παραλληλία των επιπέδων εικόνας και, ενδεχομένως, στην κλίμακα των διάφορων επικαλυπτόμενων εικόνων, λόγω της περιστροφικής κίνησης ή των κραδασμών του UAV μπορεί να εμποδίζει την στερεοσκοπική ικανότητα και την οπτική άνεση. Ωστόσο, οι συγκλίνουσες εικόνες μπορούν να διορθωθούν προς τη στερεοσκοπική συνήθη περίπτωση και σε μια κοινή κλίμακα.

Πρέπει να τονισθεί, ότι η τεχνολογία των μη επανδρωμένων συστημάτων, από τις πλατφόρμες μέχρι τους αισθητήρες, που είναι "ελαφρύτεροι, μικρότεροι και απλούστεροι" δεν μεταφράζεται απαραίτητα σε πιο απλά λογισμικά επεξεργασίας. Στην πραγματικότητα, γενικά, απαιτείται πιο εξελιγμένη και περίπλοκη διαδικασία επεξεργασίας για να αντισταθμίσει την αναγκαία περιορισμένη απόδοση των μικρών, ελαφρών πλατφορμών και αισθητήρων (Qin et al., (2013). Παράλληλα όμως, το "ελαφρύτεροι, μικρότεροι και απλούστεροι" αισθητήρες δεν μεταφράζεται απαραίτητα και ως χαμηλότερης ποιότητας αποτελέσματα, καθώς οι συνθήκες των Φωτογραμμετρικών εφαρμογών με UAV διαφέρουν, και είναι πιο ευνοϊκές, από την παραδοσιακή εναέρια Φωτογραμμετρία. Η Φωτογραμμετρία με UAV μπορεί να αξιοποιήσει την μεγάλη τοποθέτηση χρημάτων που γίνεται στις μαζικώς εμπορικές τεχνολογίες πλοήγησης και φωτογραφίας και να επωφεληθεί από τις τάσεις συνολικής σμίκρυνσης των αισθητήρων που επικρατούν (Colomina, Molina, 2014).

5.1. Προσανατολισμός Εικόνων και Βαθμονόμηση Μηχανής

Ένα σύστημα αυτόματου πιλότου για μη επανδρωμένα οχήματα περιλαμβάνει συνήθως κάποιο χαμηλού κόστους, ελαφρύ σύστημα πλοήγησης. Η λύση tPVA που μπορεί να παρέχει, που μετά βίας επαρκεί για τον εναέριο έλεγχο, δεν είναι επαρκούς ακριβείας για την πραγματοποίηση DiSo ή ISO, οπότε κάνει απαραίτητη την εκτέλεση τριγωνισμού ή έμμεσου προσανατολισμού των αισθητήρων (InSO). Σε αυτήν την περίπτωση, οι παράμετροι προσανατολισμού που δίνονται από το NS, μπορούν να απλοποιήσουν την αυτόματη παραγωγή σημείων σύνδεσης και την όλη φωτογραμμετρική διαδικασία παρέχοντας κάποιες αρχικές τιμές (Colomina, Molina, 2014). Στην περίπτωση του OS που μπορεί να παρέχει λύση tPVA με τάξη μεγέθους ακρίβειας, εφάμιλλης των γεωδαιτικών εφαρμογών, μπορεί να επιτευχθεί εντοπισμός της τάξης των εκατοστών και μπορούν να επιτευχθούν τόσο η DiSO όσο και η ISO (Rehak et al., 2013).

Η InSO (Indirect Sensor Orientation), υπερισχύει για τον προσανατολισμό των εικόνων από UAV, διότι, αφενός είναι εύκολη και γρήγορη η εγκαθίδρυση ενός σχετικά πυκνού μικρής έκτασης συνόλου GCPs, ιδιαίτερα εάν υπάρχουν ήδη ορθοφωτογραφίες της περιοχής μελέτης, και αφ' ετέρου, όσο λιγότεροι είναι οι αισθητήρες στο φορτίο της εναέριας πλατφόρμας, τόσο μειώνεται το βάρος του UAV και αυξάνεται η αυτονομία του.

Στην περίπτωση της InSO, υπάρχουν τρεις στρατηγικές βαθμονόμησης. Μια πρώτη επιλογή είναι να βαθμονομηθεί η κάμερα λίγο πριν ή μετά την αποστολή, αλλά πριν από την συνόρθωση κατά δέσμες, σε μια ξεχωριστή διαδικασία, όπως συνιστάται από τους Remondino et al. (2011). Μια δεύτερη επιλογή είναι να εφαρμοστεί αυτοβαθμονόμηση όπως γίνεται, για παράδειγμα, στο λογισμικό Pix4D. Η τρίτη επιλογή είναι να συνδυαστούν οι δύο παραπάνω επιλογές. Δεν υπάρχει μεγάλος αριθμός συγκρίσεων μεταξύ αυτών των περιπτώσεων. Ο Cramer (2013), συνέκρινε τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην περίπτωση που είχε γίνει προ-βαθμονόμηση, αυτό-βαθμονόμηση και συνδυασμός των δύο, και παρατήρησε ότι δεν υπήρξε μεγάλη βελτίωση.

Ανεξαρτήτως μεθόδου βαθμονόμησης της φωτομηχανής, η σύγχρονη InSO βασίζεται στην αυτοματοποιημένη ανίχνευση και μέτρηση σημείων σύνδεσης. Στην παραδοσιακή φωτογραμμετρία, αυτό έχει επιλυθεί με την χρήση του αυτόματου αεροτριγωνισμού (AAT). Πολλά όμως από τα παραδοσιακά, πολυχρησιμοποιημένα και αποδεδειγμένης αποτελεσματικότητας λογισμικά AAT δεν μπορούν να επεξεργαστούν Φωτογραμμετρικά μπλοκ που προκύπτουν από UAV (Rehak et al., 2013). Αυτό οφείλεται, στο ότι ο AAT είναι σχεδιασμένος κάτω από συγκεκριμένες παραδοχές: ο εσωτερικός προσανατολισμός και η ακτινική διαστρόφη θεωρούνται σταθερά και επομένως απαιτούνται σπάνιες προ-βαθμονομήσεις, η δομή του μπλοκ θεωρείται κανονική (σχεδόν ναδιρικές εικόνες, κατά προσέγγιση σταθερή κλίμακα, επικαλύψεις) και οι γεωμετρικές και ραδιομετρικές διαφοροποιήσεις δεν είναι μεγάλες (Colomina, Molina, 2014). Στην πράξη όμως, αυτές οι παραδοχές απέχουν πολύ από όσα ισχύουν για ένα μπλοκ εικόνων που ελήφθησαν από μη επανδρωμένη πλατφόρμα.

Εν αντιθέσει, η έλλειψη κανονικότητας των μπλοκ εικόνων από UAV δεν αποτελεί εμπόδιο για λογισμικά αυτόματης συνταύτισης εικόνων και συνόρθωσης δεσμών που σχετίζονται με υπολογιστική όραση και προορίζονται για πιο γενικούς σκοπούς. Η μέθοδος Structure

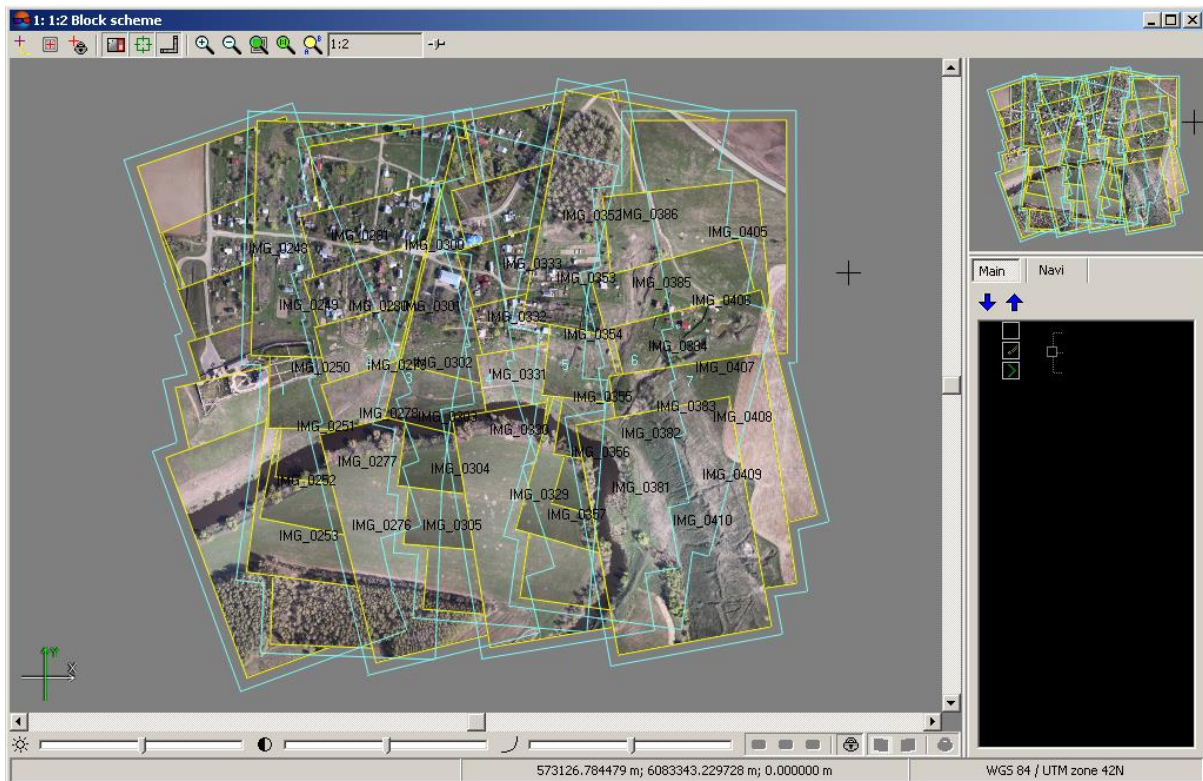
from Motion (SfM) έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην επεξεργασία μπλοκ εικόνων από UAV, όπως στο (Küng et al., 2011) για την αυτοματοποιημένη επεξεργασία εικόνων από το πολλαπλών στροφείων AscTec Falcon 8 και τη παραγωγή λεπτομερών τρισδιάστατων μοντέλων κτηρίων. Χρησιμοποιείται ευρέως στα πιο πρόσφατα Φωτογραμμετρικά λογισμικά AAT, όπως το Photoscan της AgiSoft, του οποίου έχει γίνει αποτελεσματική χρήση σε τέτοιες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στο Gini et al. (2013) για την αποτύπωση περιοχής στο "Parco Adda Nord" της Λομβαρδίας, με επεξεργασία εικόνων που ελήφθησαν από ένα σταθερών πτερυγίων SwingletCAM της SenseFly. Οι τεχνικές υπολογιστικής όρασης για την αυτόματη παραγωγή σημείων βασίζονται στην χρήση ανιχνευτών σημείων που με έξυπνο τρόπο βρίσκουν πιθανά ομόλογα σημεία. Σε ένα μπλοκ φωτογραφιών, η υπολογιστική υπερβολή των $n \times (n-1)/2$ πιθανών επικαλύψεων εικόνων πρέπει να αποφευχθεί. Για το λόγο αυτό, αποδοτικοί αλγόριθμοι, με τη χρήση περισσότερων ή λιγότερων εξωτερικών πληροφοριών, έχουν προκύψει για την ανίχνευση σημείων σύνδεσης σε λογικά χρονικά διαστήματα. Μερικοί από αυτούς τους αλγόριθμους και τα σχετικά πακέτα λογισμικού καταφεύγουν σε παράλληλη επεξεργασία δεδομένων, είτε με multi-core είτε με Graphical Processing Unit (GPU) computing.

Για την DiSO όπου απαιτείται ενοποίηση των συστημάτων INS/GNSS (βλέπε κεφάλαιο 6), σημειώνεται ότι, στο πλαίσιο του Φιλτραρίσματος και Ομαλοποίησης Kalman (KFS), μία λύση σε πραγματικό χρόνο (πρόβλεψη μόνο προς τα εμπρός) είναι, εν γένει χειρότερη συγκριτικά με μία λύση που θα προκύψει από μετεπεξεργασία (πρόβλεψη και προς τα εμπρός και προς τα πίσω και τελική ομαλοποίηση). Προσθέτως, καμία από αυτές τις λύσεις δεν είναι γενικά καλύτερη, συγκριτικά με μία μέθοδο μετεπεξεργασίας που στηρίζεται στα ελάχιστα τετράγωνα, όπως η μέθοδος συνόρθωσης κατά δέσμες, επειδή δεν μπορεί να επωφεληθεί από τους γεωμετρικούς περιορισμούς που σχηματίζονται από τα σημεία σύνδεσης μεταξύ των διαφορετικών λωρίδων (Colomina, Molina, 2014).

Ενώ τα λογισμικά κλασικού AAT εν γένει δεν έχουν προσαρμοστεί στην λογική της επεξεργασίας εικόνων από UAV, οι νεότερες εταιρίες που παράγουν Φωτογραμμετρικά λογισμικά όπως AgiSoft, SimActive, ICAROS, Menci Software, RACURS ή Orbit GT, φαίνεται να είναι περισσότερο προετοιμασμένες να επανασχεδιάσουν τα λογισμικά τους ταχέως, ούτως ώστε να δέχονται εικόνες από UAV. Για παράδειγμα στο Photomod 5.3 της Racurs, η σχετική λειτουργία που παρέχεται για την επεξεργασία εικόνων από UAV "μοιάζει" με την κανονική λειτουργία για την παραγωγή ορθό-εικόνων από αεροφωτογραφίες, παρουσιάζει όμως κάποια πρόσθετα χαρακτηριστικά:

- Οι εικόνες πρέπει να δεχθούν κάποια αρχική επεξεργασία προκειμένου να γίνουν πιο ομοιογενείς και να μπορούν να υποστούν επεξεργασία από το λογισμικό.
- Μπορούν να εισαχθούν κάποιες αρχικές τιμές των παραμέτρων εξωτερικού προσανατολισμού, και προέκυψαν από τα μεταδεδομένα του μη επανδρωμένου συστήματος.

- Οι εικόνες, αν έχουν ληφθεί σε κάποιο ακανόνιστο μοτίβο μπορούν με βάση τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού να χωρισθούν σε λωρίδες.
- Αφού γίνει ένας πρώτος ΑΤ για τον καθορισμό του σχήματος του μπλοκ, ρυθμίζοντας παραμέτρους που αφορούν στην ταχύτητα και στην ακρίβεια της διαδικασίας γίνεται αυτόματη μέτρηση σημείων σύνδεσης
- Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μπορεί να γίνει και χειροκίνητη σκόπευση κάποιων σημείων.



Εικόνα 5.1: μπλοκ φωτογραφιών μετά τον αυτόματο τριγωνισμό για εικόνες από UAV στο Photomod 5.3 της Racurs (racurs.ru)

Σημειώνεται ότι, τα νεότερα ημιαυτόματα Φωτογραμμετρικά λογισμικά όπως το PhotoScan, παρόλο που υποστηρίζουν τη χρήση φωτογραφιών από UAV, είναι προτιμότερο, κατά τη λήψη των εικόνων να υπάρχει φροντίδα ώστε οι επικαλύψεις να είναι μεγάλες, τουλάχιστον 80% κατά μήκος και κατά πλάτος, αν και αυτό δεν είναι πάντα εφικτό στα ελαφρά UAV που έχουν μικρή αυτονομία, αφού το πλήθος των απαιτούμενων εικόνων γίνεται πολύ μεγάλο, προκειμένου να απλοποιείται η διαδικασία του αεροτριγωνισμού. Για τα δε τελείως χειροκίνητα κλασικά Φωτογραμμετρικά λογισμικά πρέπει να γίνεται προσπάθεια η πτήση και το σχήμα του να είναι πολύ καλά τακτοποιημένα, να είναι δηλαδή σωστά γεωμετρικά και αυτό επιτυγχάνεται μόνο με την αυτόματη πλοήγηση του οχήματος.

5.2. Ανακατασκευή Επιφανειών

Τα ψηφιακά μοντέλα επιφανείας (DSM), οι ορθοφωτογραφίες και τα τρισδιάστατα μοντέλα, είναι να τρία κυριότερα παράγωγα της Φωτογραμμετρίας. Μετά τον προσανατολισμό των εικόνων η αυτοματοποιημένη εξαγωγή DSM και ορθοφωτογραφιών είναι πλέον διαδικασίες ρουτίνας. Όμως στην περίπτωση των εικόνων από UAV υφίστανται ακόμα ορσμένα προβλήματα, στην εκτέλεση των διαδικασιών αυτών με συμβατικά Φωτογραμμετρικά προγράμματα, που αφορούν την αμφισβητούμενη ποιότητα και ορθότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για την διερεύνηση των ανωτέρω (Colomina, Molina, 2014).

Για παράδειγμα, από τους Rosnell και Honkavaara (2012), ερευνάται η παραγωγή νεφών σημείων από φωτογραφίες μη επανδρωμένου οχήματος που συλλέχθηκαν με δύο διαφορετικές φωτομηχανές, και μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της μετ-επεξεργασίας χρησιμοποιώντας δύο κομμάτια λογισμικού, το SocetSet της BAE Systems, ένα παραδοσιακό Φωτογραμμετρικό λογισμικό, και το Photosynth της Microsoft, ένα διαδικτυακό λογισμικό σχεδιασμένο για συλλογή φωτογραφιών και παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επεξεργασία με το δεύτερο λογισμικό έδωσε αραιά νέφη σημείων και μη αμελητέες στρεβλώσεις στο τελικό μοντέλο επιφανείας. Το Root Mean Square (RMS) της υψομετρικής συνόρθωσης υπολογίστηκε ότι βρισκόταν μεταξύ $\mu_h = 40$ GSD and $\mu_h = 120$ GSD. Προσθέτως, το παραδοσιακό πρόγραμμα μετ-επεξεργασίας παρήγαγε νέφος σημείων σχεδόν τόσο πυκνό και ακριβές όσο και το νέφος αναφοράς που προερχόταν από φωτογραμμετρική μηχανή μεγάλου φορμάτ (RMS διαφορών στα υψόμετρα της τάξης των $\mu_h = 6$ GSD). Παρόλα αυτά, οι συγγραφείς εντόπισαν προβλήματα (αποτυχημένες συνταυτίσεις) σε σετ φωτογραφιών που είχαν ληφθεί από σχετικά μεγάλο υψόμετρο και κάλυπταν πολύ μεγάλη έκταση, γεγονός που προμηνύει ότι τα συμβατικά λογισμικά επεξεργασίας μπορεί ακόμα να μην είναι τόσο ευέλικτα για σενάρια λήψης εικόνων που σχετίζονται με μη επανδρωμένες πλατφόρμες (πλάγιες και από κοντινή απόσταση εικόνες).

6. ΑΜΕΣΗ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ

Γεωαναφορά είναι η διαδικασία σύνδεσης των αντικειμένων με μία συγκεκριμένη τοποθεσία της επιφάνειας της γης μέσω ενός δισδιάστατου ή τρισδιάστατου συστήματος συντεταγμένων. Προκειμένου να γεωαναφερθεί μία αεροφωτογραφία στον χώρο, απαιτείται ο συσχετισμός των τοπικών συντεταγμένων της με το σύστημα αναφοράς της επιφάνειας της γης με την βοήθεια φωτοσταθερών σημείων. Μπορούν δηλαδή, χρήσει φωτοσταθερών, να υπολογιστούν τα έξι στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού της αεροφωτογραφίας, μέσω μίας μαθηματικής σχέσης, της συνθήκης συγγραμμικότητας, που συνδέει τα σημεία στην εικόνα με τα αντίστοιχα πάνω στο έδαφος.

Ο εξωτερικός προσανατολισμός μίας αεροφωτογραφίας ορίζεται από την θέση του σημείου λήψης στον χώρο και από τον προσανατολισμό του οπτικού άξονα. Η θέση του σημείου λήψης ορίζεται από τις συντεταγμένες του (X_0 , Y_0 , Z_0) στο σύστημα αναφοράς της επιφάνειας της γης και ο προσανατολισμός του οπτικού άξονα από τις γωνίες ω , φ και κ (Πατιάς, 1991).

Παραδοσιακά, ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού μίας αεροφωτογραφίας γίνεται έμμεσα, με την χρήση της μεθόδου του αεροτριγωνισμού. Ο αεροτριγωνισμός αφορά στη συνόρθωση του μπλοκ των αεροφωτογραφιών και αποτελεί ένα σύνολο σχετικών και απόλυτων προσανατολισμών. Το αποτέλεσμα του αεροτριγωνισμού είναι τα στοιχεία του προσανατολισμού όλων των εικόνων και οι συντεταγμένες X , Y , Z συγκεκριμένων σημείων σε ένα γεωδαιτικό, συνήθως, σύστημα συντεταγμένων (Kraus, 2010).

Η διαδικασία του αεροτριγωνισμού μπορεί να παρακαμφθεί με την χρήση συνδυασμένων συστημάτων GPS/INS, αφού οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού κάθε εικόνας υπολογίζονται με άμεσο τρόπο τη στιγμή της λήψης (Skaloud, 2002). Ο αεροτριγωνισμός είναι μία διαδικασία χρονοβόρα με πολλά βήματα. Ειδικά όταν γίνεται αναφορά σε μεγάλα μπλοκ εικόνων, η διαδικασία αυτή γίνεται δύσκολη και ανακριβής αν δεν υπάρχουν αρκετά φωτοσταθερά και η γεωμετρία του μπλοκ δεν είναι καλή ή τα φωτοσταθερά σωστά διεσπαρμένα, με αποτέλεσμα μεγάλο κόστος. Έτσι, η εφαρμογή της σχετικής με την πλοήγηση τεχνολογίας για την άμεση γεωαναφορά των εικόνων γίνεται όλο και πιο δημοφιλής, αφού η διαδικασία αυτή έχει λιγότερα βήματα, είναι λιγότερο χρονοβόρα και κοστοβόρα, απαιτεί λιγότερο ανθρώπινο δυναμικό να εργάζεται στο πεδίο και στο γραφείο και απαιτεί ελάχιστο input από τον χρήστη. Βέβαια, εν συγκρίσει με τα επανδρωμένα οχήματα (ως φορείς φωτογραφικών συστημάτων) με τα οποία η μέθοδος της άμεσης γεωαναφοράς είναι πιο διαδεδομένη, τα UAV έχουν ένα κύριο μειονέκτημα που, προς το παρόν, δυσχεραίνει την σε ευρεία κλίμακα αξιοποίηση της άμεσης γεωαναφοράς. Αυτό το πρόβλημα είναι ότι το μικρό ωφέλιμο φορτίο τους προκαλεί περιορισμούς όπως η διάρκεια της πτήσης, ο αριθμός των αισθητήρων και, κυριότερα, η ποιότητα των συστημάτων εντοπισμού και των αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της άμεσης γεωαναφοράς σε σχέση με τον υπολογισμό των παραμέτρων εξωτερικού προσανατολισμού με την μέθοδο του αεροτριγωνισμού, είναι ότι τα αποτελέσματα έχουν πιο εύκολη φυσική ερμηνεία, ενώ είναι και πιο ακριβή, όταν ο ολοκληρωμένος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται δεν είναι ευτελής, επιτρέποντας τον ακριβέστερο εντοπισμό και υπολογισμό του προσανατολισμού του οχήματος και συνακόλουθα και των ληφθεισών εικόνων. Ο εξοπλισμός θα πρέπει να περιλαμβάνει υψηλής ακριβείας δέκτες GPS/GNSS, τουλάχιστον μέσης ποιότητας IMU, ενώ η χρήση άλλων πρόσθετων αισθητήρων, όπως μαγνητόμετρα και αισθητήρες πίεσης μπορούν να αξιοποιηθούν για την βελτίωση της ποιότητας της γεωαναφοράς (Pfeifer κ.ά., 2012). Άλλο βασικό πλεονέκτημα της άμεσης γεωαναφοράς, είναι η μη αναγκαιότητα της χρήσης φωτοσταθερών σημείων, παρά μόνο για τη βαθμονόμηση του ενοποιημένου συστήματος. Στη βάση του ανωτέρω πλεονεκτήματος, και όσον αφορά την Φωτογραμμετρία με UAV, που όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καλείται συχνά να αντιμετωπίσει περιπτώσεις αποτύπωσης δυσπρόσιτων περιοχών, όπου δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν προσημασμένα σημεία, η άμεση γεωαναφορά μπορεί πολύ εύκολα να δώσει τη λύση. Τέλος σε περιπτώσεις όπου επίκειται έκτακτη ανάγκη, όπως φυσικές καταστροφές (πυρκαγιές σε δάση, πλημμύρες και τυφώνες) αν είναι αναγκαία η γρήγορη παραγωγή ορθοεικόνας και υπάρχει περιορισμένος χρόνος ή όταν για κάποιο έργο απαιτείται ο προσανατολισμός μόνο μίας λωρίδας αεροφωτογραφιών, η μέθοδος της άμεσης γεωαναφοράς μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά (Ip, 2005).

6.1. Μαθηματικό Μοντέλο

Το βασικό μοντέλο της γεωαναφοράς εκφράζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

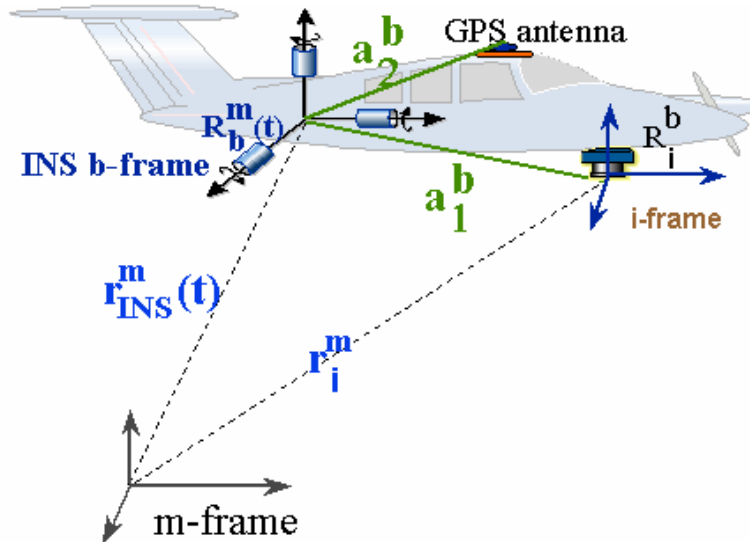
$$r_p^m = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t)(sR_i^b r_p^i - \alpha_1^b)$$

όπου, $r_{INS}^m(t) = r_{GPS}^m(t) - R_b^m(t)\alpha_2^b$

οπότε, $r_p^m = r_{GPS/INS}^m(t) + R_b^m(t)(sR_i^b r_p^i - \alpha_1^b - \alpha_2^b)$.

Στις παραπάνω σχέσεις είναι: r_p^m η θέση του σημείου που ενδιαφέρει στο επίγειο σύστημα αναφοράς, $r_{GPS}^m(t)$ η θέση της κεραίας του GPS στο επίγειο σύστημα αναφοράς, $r_{GPS/INS}^m(t)$ η θέση της κεραίας του GPS στο επίγειο σύστημα όπως προκύπτει μετά την επεξεργασία των μετρήσεων GPS/IMU και την απαιτούμενη παρεμβολή, $R_b^m(t)$ ο πίνακας στροφών μεταξύ του συστήματος του IMU και του επίγειου συστήματος αναφοράς, s ο συντελεστής κλίμακας μεταξύ του χώρου της εικόνας και του χώρου του αντικειμένου, R_i^b ο πίνακας στροφών μεταξύ του συστήματος της εικόνας και του συστήματος του IMU, r_p^i η θέση του σημείου ενδιαφέροντος στο σύστημα της εικόνας, α_1^b το offset μεταξύ του συστήματος του IMU και

του συστήματος της εικόνας και a_2^b το offset μεταξύ του συστήματος του IMU και του συστήματος της κεραίας του GPS (Ip, 2005).



Σχήμα 6.1: σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου της άμεσης γεωαναφοράς (Ip, 2005).

Ενώ η άμεση γεωαναφορά συνίσταται στον υπολογισμό των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού χρησιμοποιώντας αισθητήρες εντοπισμού και προσανατολισμού, ο υπολογισμός των παραμέτρων του προσανατολισμού του ενοποιημένου συστήματος συνίσταται στην βελτίωση των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού χρησιμοποιώντας μετρήσεις από στερεοζεύγη. Τότε είναι απαραίτητη η χρήση της συνθήκης συγγραμμικότητας:

$$x_p = x_0 - c \frac{(X_p - X_0)R_{11} + (Y_p - Y_0)R_{12} + (Z_p - Z_0)R_{13}}{(X_p - X_0)R_{31} + (Y_p - Y_0)R_{32} + (Z_p - Z_0)R_{33}}$$

$$y_p = y_0 - c \frac{(X_p - X_0)R_{21} + (Y_p - Y_0)R_{22} + (Z_p - Z_0)R_{23}}{(X_p - X_0)R_{31} + (Y_p - Y_0)R_{32} + (Z_p - Z_0)R_{33}}$$

όπου R_{ij} είναι το (i,j) στοιχείο του πίνακα στροφής $R(\kappa, \phi, \omega)$ μεταξύ του συστήματος της εικόνας και του επίγειου συστήματος αναφοράς. Η σχέση αυτή συνδέει τις συντεταγμένες (x, y) στην εικόνα με τις συντεταγμένες στο επίγειο σύστημα αναφοράς (X_p, Y_p, Z_p) του αντίστοιχου σημείου P μέσω των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού (x_0, y_0, c) και των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ (Πατιάς, 1991).

Καθώς οι αρχικές προσεγγιστικές τιμές παρέχονται τόσο για τον r_p^m όσο και για τον πίνακα στροφών $R_i^m(\kappa, \varphi, \omega)$ άμεσα από το ενοποιημένο σύστημα, οι μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων φωτοσταθερών σημείων δεν είναι απαραίτητη για τον υποβοηθούμενο από GPS/INS προσανατολισμό της δέσμης για κάθε εικόνα. Όμως, η χρήση της κατάλληλης τυπικής απόκλισης επί των αρχικώς υπολογισθεισών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα σημαντική, και τέτοιες πληροφορίες προκύπτουν από την χρήση του φίλτρου Kalman μετά την μετεπεξεργασία των δεδομένων από το ενοποιημένο σύστημα GPS/INS (Ip, 2005).

6.2. Ενοποιημένα Συστήματα GPS/INS

Η άμεση γεωαναφορά είναι μία μέθοδος που απαιτεί συνδυασμό διαφορετικών αισθητήρων εντοπισμού για να πραγματοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό υπαγορεύεται από τις περιπτώσεις εφαρμογής που καλείται να αντιμετωπίσει, τους περιορισμούς στις συνθήκες λειτουργίας που προκύπτουν από τα διαφορετικά περιβάλλοντα όπου θα εφαρμοστεί (ανοικτοί ή κλειστοί χώροι, αστικές ή αγροτικές περιοχές), αλλά και τους εγγενείς περιορισμούς που προκύπτουν από την χρήση κάθε συστήματος εντοπισμού χωριστά. Οι δέκτες GPS έχουν περιορισμένη ακρίβεια σε εσωτερικούς χώρους και σε αστικά περιβάλλοντα. Αντίστοιχα, τα συστήματα INS έχουν πολλά προβλήματα με τον θόρυβο καθώς και πολυάριθμα σφάλματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν με την βοήθεια αλγορίθμων πριν εξαχθούν οποιαδήποτε ερμηνεύσιμα αποτελέσματα (Sazdovski κ.ά., 2005). Επιπλέον τα αδρανειακά συστήματα μπορούν να παρέχουν την θέση και τα κινηματικά χαρακτηριστικά για το κινούμενο εναέριο όχημα και κατ' επέκταση για το οπτικό κέντρο του φωτογραφικού αισθητήρα, με ακρίβεια αλλά για σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω των επιταχυνσιόμετρων και των γυροσκοπίων που διαθέτουν (Κατσιγιάννη, 2014).

Ένα σύστημα άμεσης γεωαναφοράς ή ενοποιημένο σύστημα δορυφορικών/ αδρανειακών συστημάτων, περιλαμβάνει ένα σύστημα GPS, ένα σύστημα INS και συνήθως κάποιον αλγόριθμο που είναι υπεύθυνος για την ανάμειξη των παρατηρήσεων των δύο συστημάτων. Ο σκοπός του συνδυασμού των δύο συστημάτων σε ένα ενοποιημένο σύστημα είναι το διπλό όφελος που προκύπτει από τα θετικά του καθενός (Sazdovski κ.ά., 2005). Ο συνδυασμός αυτός είναι εφικτός χάρη στη συμπληρωματικότητα των δύο συστημάτων, που προκύπτει από το γεγονός, ότι τα σφάλματα κάθε συστήματος δεν έχουν συσχετιζόμενες πηγές, οπότε μπορούν να περιοριστούν εύκολα με τη βοήθεια φίλτρου ή κάποιων άλλων τεχνικών.

Πλεονέκτημα των ενοποιημένων συστημάτων GPS/INS δεν είναι μόνο ότι μπορούν, λόγω της φύσης των συστημάτων που περιλαμβάνουν, να υπολογίζουν ταυτόχρονα τη θέση, την ταχύτητα και τις στροφές του οχήματος (PVA), αλλά και ότι τα αδρανειακά συστήματα μπορούν να αποκαταστήσουν τις πιθανές απώλειες σήματος στο GPS λόγω εμποδίων ή τις ασάφειες φάσεις που προκαλούν διακοπές στο συνεχή προσδιορισμό της κινηματικής

συμπεριφοράς σε κάθε θέση (Κατσιγιάννη, 2014). Με άλλα λόγια το GPS προμηθεύει με μία τροχιά το INS, το οποίο μπορεί να παρέχει την δυναμική της κίνησης για τα διαστήματα μεταξύ των μετρήσεων του GPS (ενώ για μεγαλύτερα διαστήματα δεν θα ανταποκρινόταν εξίσου καλά). Ταυτόχρονα το INS μπορεί να προβλέψει τις κινήσεις του οχήματος αφού με τα επιταχυνσιόμετρα "δαισιθάνεται" τις συνιστώσες της κίνησής του σε κάθε θέση, δίνοντας ανάδραση στο GPS με τη βοήθεια του φίλτρου Kalman.

6.2.1. Φίλτρο Kalman

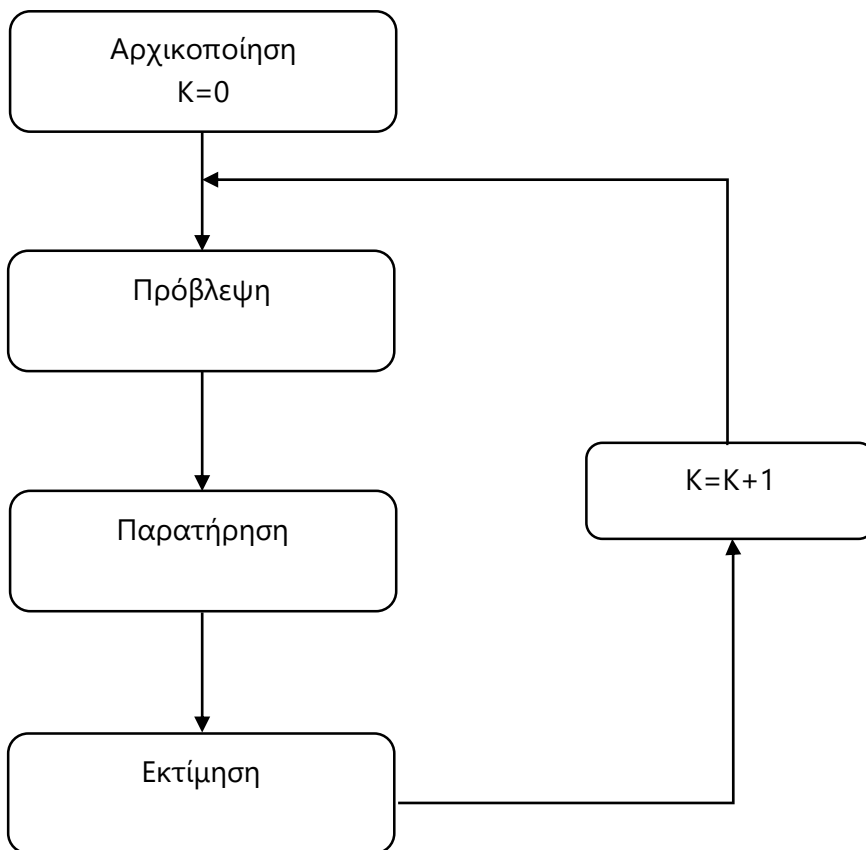
Η ενοποίηση των συστημάτων GPS και INS επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση του φίλτρου Kalman. *Το φιλτράρισμα Kalman είναι μία μορφή εκτίμησης που χαρακτηρίζεται από αναδρομική αξιολόγηση και υπολογισμό του εσωτερικού μοντέλου της δυναμικής του συστήματος που εκτιμάται (Sazdonski κ.ά., 2005).* Το φιλτράρισμα Kalman είναι δηλαδή μία μέθοδος αναδρομικής επεξεργασίας δεδομένων, που έχει στόχο την απομάκρυνση του θορύβου από τις μετρήσεις ώστε να μπορεί να προβλέπει την τιμή κάποιου μεγέθους σε ορισμένη χρονική στιγμή στο μέλλον (Μπαράκου, 2010). Η μέθοδος αυτή γίνεται τόσο πολύπλοκη όσο και η δυναμική του συστήματος που εκτιμάται, εισάγοντας περισσότερες παραμέτρους στην επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού τους.

Με τη χρήση του φίλτρου Kalman τα υποσυστήματα του ενοποιημένου συστήματος GPS/INS, μπορούν να συνδυαστούν, έχοντας γνώση της συμμεταβλητότητας του θορύβου των μετρήσεων και του θορύβου της διαδικασίας ενοποίησης, ώστε να παραχθεί μία συνδυαστική λύση από σειρά παρατηρήσεων που περιέχουν θόρυβο. Το φίλτρο Kalman βρίσκει εφαρμογή σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές που αφορούν σε έλεγχο και πλοήγηση οχημάτων και κυρίως μη επανδρωμένων εναέριων και διαστημικών, χρησιμοποιείται ακόμα για τον υπολογισμό δορυφορικών τροχιών, στην γεωδαισία και στην τοπογραφία. Προσθέτως, το φιλτράρισμα Kalman είναι ευρέως διαδεδομένο για την ανάλυση χρονοσειρών σε τομείς όπως η επεξεργασία σημάτων και η εικονομετρία (Ip, 2005).

Στις εφαρμογές ολοκλήρωσης δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού και αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, όπως για την άμεση γεωαναφορά εικόνων από μη επανδρωμένα οχήματα, το φιλτράρισμα Kalman, αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- Αρχικοποίηση
- Πρόβλεψη
- Παρατήρηση
- Εκτίμηση

Διάγραμμα ροής φίλτρου Kalman



Σχήμα 6.2: Απλοποιημένο παράδειγμα διαγράμματος ροής φιλτραρίσματος Kalman (Rönnbäck, 2000).

Όπως φαίνεται και στο ανωτέρω διάγραμμα ροής της διαδικασίας φιλτραρίσματος Kalman, κάθε φορά μετά από το βήμα της εκτίμησης των παραμέτρων, η μεταβλητή K αυξάνεται κατά 1 και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Στην διαδικασία φιλτραρίσματος Kalman οι εκτιμώμενες παράμετροι, οι μετρήσεις και οι εκτιμήσεις θεωρούνται συναρτήσεις του χρόνου. Το διάνυσμα των παραμέτρων προς εκτίμηση x_k περιέχει τις συνιστώσες θέσης (x , y , z) και ταχύτητας (v_x , v_y , v_z) του οχήματος. Το φίλτρο Kalman εκτιμά το διάνυσμα x_k λαμβάνοντας υπ' όψη το διάνυσμα των παραμέτρων της προηγούμενης χρονικής στιγμής x_{k-1} και το διάνυσμα μετρήσεων y_k (Rönnbäck, 2000).

Οι εξισώσεις που ισχύουν για το διάνυσμα των παραμέτρων προς εκτίμηση και το διάνυσμα μετρήσεων είναι:

$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + G_{k-1}w_{k-1}$$

$$y_k = H_k x_k + v_k,$$

όπου $w_k : N(0, Q_k)$ το σφάλμα της διαδικασίας επίλυσης, $v_k : N(0, R_k)$ το σφάλμα των μετρήσεων, Φ_k ο πίνακας μετάβασης των παραμέτρων και H_k ο πίνακας μετρήσεων.

Αρχικοποίηση

Για $K=0$, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές x_k και P , ώστε

$$\hat{x}_k = x_0 \text{ και}$$

$\hat{P}_k = P_0 = \Delta$, όπου Δ μη τετραγωνικός πίνακας με μη μηδενικά τα στοιχεία της διαγωνίου και P_0 είναι ο a priori πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας του συστήματος

Πρόβλεψη

Στο στάδιο της πρόβλεψης, με βάση τις πληροφορίες της τρέχουσας χρονικής στιγμής των μετρήσεων, προβλέπεται το σφάλμα σε επόμενες χρονικές στιγμές. Δηλαδή, ενημερώνονται οι a priori πίνακες παραμέτρων του συστήματος και μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας.

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi_k x_k$$

$$\hat{P}_{k+1} = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k, \text{ όπου } Q = G G^T \sigma_0^2 \text{ και } G = [\Delta t^2/2 \quad \Delta t]^T$$

Παρατήρηση

Στο στάδιο αυτό, ο πίνακας των παρατηρήσεων μετράται με έναν αισθητήρα. Η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης τιμής $H_k \hat{x}_{k+1}$ και της παρατήρησης ονομάζεται innovation.

$$inno = z_k - H_k \hat{x}_{k+1}$$

Εκτίμηση

Αφού έχει υπολογιστεί το innovation και είναι γνωστές όλες οι πληροφορίες που δίνει ο αισθητήρας, μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας και ο πίνακας κέρδους του φίλτρου που συμβάλλουν στον υπολογισμό του πίνακα παραμέτρων του επόμενου βήματος, από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$K_k = \hat{P}_{k+1} H_{k+1}^T (H_k \hat{P}_{k+1} H_k^T + Q_k)^{-1}$$

$$P_{k+1} = (I + K_k H_k) \hat{P}_{k+1} (I + K_k H_k)^T$$

Τέλος για κάθε επανάληψη υπολογίζεται η βέλτιστη εκτίμηση της κατάστασης (ή πίνακα παραμέτρων) του επόμενου βήματος, από την εξίσωση:

$$x_{k+1} = \hat{x}_{k+1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k+1}) \text{ (Rönnbäck, 2000).}$$

6.2.2. Σφάλματα ενοποίησης

Εκτός από τα εγγενή σφάλματα των αισθητήρων και των συστημάτων που συμμετέχουν ή επηρεάζονται από ένα ενοποιημένο σύστημα, προκύπτουν και σφάλματα από τον συνδυασμό των πολλαπλών αισθητήρων και οφείλονται στη γεωμετρία του ενοποιημένου

συστήματος, στην κίνηση που εκτελεί το φέρον όχημα, στο συγχρονισμό των αισθητήρων και στη διαδικασία φιλτραρίσματος.

Θέση των αισθητήρων

Σε μία μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα τα συστήματα GPS και INS τοποθετούνται σε διαφορετικές θέσεις και συνεπώς τα κέντρα των αισθητήρων έχουν μεταξύ τους κάποια απόσταση στον τρισδιάστατο χώρο. Ο φωτογραφικός αισθητήρας τοποθετείται κατά κανόνα στο κάτω μέρος του οχήματος, ενώ η κεραία του αισθητήρα GPS στο πάνω μέρος. Εάν η γεωμετρία του οχήματος το επιτρέπει συνήθως γίνεται προσπάθεια να υπάρξει μία ευθυγράμμιση του κέντρου των δύο αισθητήρων ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα ταύτισης των δεδομένων από τις διαφορετικές πηγές μέτρησης. Το αδρανειακό σύστημα στα UAV δεν μπορεί, κατά κανόνα, και ειδικά στα πολλαπλών στροφείων να τοποθετηθεί πάνω στον φωτογραφικό αισθητήρα, οπότε προκύπτουν δύο επιπλέον διανύσματα μετατόπισης, όπως περιεγράφηκαν και σε προηγούμενη ενότητα. Όσες από αυτές τις μετατοπίσεις δεν μπορούν να υπολογιστούν απ' ευθείας με βάση τα γνωστά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των βραχιόνων του μη επανδρωμένου οχήματος ή με εξωτερικές γεωδαιτικές μετρήσεις, υπολογίζονται μέσω της βαθμονόμησης του ενοποιημένου συστήματος, μαζί με την γωνιακή απόκλιση του αδρανειακού συστήματος σε σχέση με τον φωτογραφικό αισθητήρα (Ip, 2005).

Γωνιακός αποπροσανατολισμός

Ο γωνιακός αποπροσανατολισμός (boresight mis-alignment) συνίσταται στην ύπαρξη γωνιακής απόκλισης μεταξύ του φωτογραφικού αισθητήρα και του αδρανειακού συστήματος. Η απόκλιση αυτή είναι σταθερή συνάρτηση του χρόνου και ο υπολογισμός της αποτελεί βασικό σημείο της ενοποίησης των συστημάτων (Ip, 2005). Ενώ η γωνία αυτή δεν μπορεί να υπολογισθεί με άμεσο τρόπο, υπάρχουν δύο μέθοδοι προσδιορισμού της:

1. Συγκρίνοντας διευθύνσεις που έχουν εξαχθεί με την βοήθεια του ενοποιημένου συστήματος και αυτές που έχουν με ανεξάρτητο τρόπο υπολογιστεί, με την μέθοδο του αεροτριγωνισμού (Skaloud, 1999). Οι τρεις συνιστώσες της σταθερής απόκλισης των δύο σετ μετρήσεων, αποτελούν τις τρεις γωνιακές αποκλίσεις που συνιστούν τον γωνιακό αποπροσανατολισμό των δύο συστημάτων.
2. Υπολογίζοντας τις γωνιακές αποκλίσεις ως πρόσθετες παραμέτρους κατά την επίλυση του υποβοηθούμενου από το ενοποιημένο σύστημα προσανατολισμού με δέσμες (Mostafa, κ.ά., 2000). Η μέθοδος αυτή είναι πιο επαρκής και ευέλικτη καθώς ο υποβοηθούμενος τριγωνισμός δεν απαιτεί την χρήση φωτοσταθερών σημείων.

Για τον υπολογισμό του γωνιακού αποπροσανατολισμού είναι συνήθως αναγκαία μόνο κάποια σχετική ακρίβεια, αλλά ο απόλυτος έλεγχος του με την χρήση φωτοσταθερών σημείων δίνει την ευχέρεια πλεονάζοντος ελέγχου των παραμέτρων τα μηχανής. Αν κρίνεται απαραίτητο αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν με αυτοβαθμονόμηση

ανάλογα με τη διάρθρωση του μπλοκ των αεροφωτογραφιών που θα χρησιμοποιηθούν και την ισχυρότητα της γεωμετρίας στην διάταξη των φωτοσταθερών.

Κίνηση του φέροντος οχήματος

Προκειμένου στις μετρήσεις που λαμβάνονται από τον φωτογραφικό αισθητήρα να μπορεί με ακρίβεια να αποδοθεί θέση μέσω του GPS, πρέπει για όσο χρονικό διάστημα το κλείστρο της μηχανής παραμένει ανοικτό, το όχημα που φέρει το ενοποιημένο σύστημα να είναι ακίνητο ή αν είναι σε κίνηση η ταχύτητά του να είναι τόσο μικρή, ώστε η απόσταση που θα καλύψει σε αυτό το χρονικό διάστημα, να είναι μικρότερη από την απαιτούμενη οριζοντιογραφική ακρίβεια, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί χωρίς σφάλμα ότι η θέση λήψης της εικόνας και η θέση που προσδιόρισε το GPS ταυτίζονται.

Συγχρονισμός των αισθητήρων

Για να είναι ακριβής η άμεση γεωαναφορά, πρέπει οι αισθητήρες να είναι συγχρονισμένοι, ώστε οι μετρήσεις τους να αναφέρονται στις αυτές χρονικές στιγμές. Για το λόγο αυτό, η ακριβής χρονική σήμανση του κλείστρου της φωτογραφικής μηχανής στην χρονική κλίμακα του GPS είναι απαραίτητη ώστε να μπορούν να αποδοθούν θέση και στροφές σε κάθε εικόνα που λαμβάνεται. Όταν οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού που προκύπτουν από την άμεση γεωαναφορά είναι προσεγγιστικές τιμές που θα χρησιμοποιηθούν ως αρχικές τιμές για τον αεροτριγωνισμό με τη μέθοδο δεσμών τότε η απλή συσχέτιση με την καταγραφή του χρόνου από το GPS είναι αρκετή. Όταν όμως οι υπολογισμοί του ενοποιημένου συστήματος πρόκειται να χρησιμοποιηθούν αυτούσιοι και απαιτείται υψηλή ακρίβεια, πρέπει να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση της κάμερας, δηλαδή το διάστημα που μεσολαβεί από την χρονική στιγμή που πατιέται το κουμπί του κλείστρου μέχρι την στιγμή που λαμβάνεται η εικόνα (Rehak κ.ά., 2013).

Τεχνική φιλτραρίσματος

Το φιλτράρισμα των δεδομένων από το GPS και το IMU είναι απαραίτητο για την εξάλειψη του θορύβου, των σφαλμάτων και, συνακόλουθα, για την παραγωγή ενός αποτελέσματος με τα λιγότερα σφάλματα, ως αποτέλεσμα της ενοποίησης. Το φιλτράρισμα γίνεται τόσο δύσκολο όσο και η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος που φέρει το ενοποιημένο σύστημα.

6.2.3. Αρχικοποίηση INS

Η αρχικοποίηση του INS είναι μία διαδικασία μέσω της οποίας επιλέγονται οι αρχικές τιμές για την θέση, την ταχύτητα και τις γωνίες στροφής του αδρανειακού συστήματος ως προς

κάποιο σύστημα. Η θέση του INS αρχικοποιείται συνήθως σε σχέση με εξωτερικές πηγές, όπως το σύστημα GPS, ενώ η αρχική τιμή της ταχύτητας θεωρείται συχνότερα μηδέν όταν πρόκειται για εναέρια μη επανδρωμένα οχήματα.

Η αρχικοποίηση του προσανατολισμού του INS ονομάζεται ευθυγράμμιση και πραγματοποιείται με την ευθυγράμμιση των αξόνων της αδρανειακής μονάδας παράλληλα με τους άξονες πλοήγησης και κύρια με τον ευθυγράμμιση ως προς τον πραγματικό βορρά και τον τοπικό μεσημβρινό.

Οι συνήθεις μέθοδοι ευθυγράμμισης του INS είναι τέσσερις:

1. Οπτική ευθυγράμμιση χρησιμοποιώντας:
 - i. Οπτική αναφορά σε μία διεύθυνση βασισμένη στο έδαφος.
 - ii. Εξοπλισμό που επιτρέπει επιτόπια επί του οχήματος αστρονομική παρακολούθηση που χρησιμοποιείται και για συστήματα σταθερά συνδεδεμένα στο όχημα και για συστήματα που είναι προσαρτημένα σε gimbal για πολύ μεγάλα υψόμετρα πτήσης.
2. Ευθυγράμμιση με γυροσκοπική πυξίδα με σταθερό το όχημα, κάνοντας χρήση της αισθητής διεύθυνσης της ταχύτητας προκειμένου να υπολογιστεί ο τοπικός μεσημβρινός και της αισθητής κατεύθυνσης της στροφής του οχήματος προκειμένου να υπολογιστεί ο βορράς. Το γεωγραφικό πλάτος μπορεί να καθοριστεί από τη γωνία μεταξύ του διανύσματος περιστροφής της γης και του οριζώντιου επίπεδου, αλλά το μήκος πρέπει να καθορίζεται με άλλους τρόπους και να εισαχθεί χειροκίνητα ή ηλεκτρονικά. Αυτή η μέθοδος είναι χαμηλού κόστους, αλλά πιο χρονοβόρα από τις άλλες (αρκετά λεπτά, συνήθως).
3. Μεταφορά ευθυγράμμισης επί ενός άλλου κινούμενου οχήματος, χρησιμοποιώντας συνταίριασμα ταχύτητας με ένα άλλο ευθυγραμμισμένο INS που βρίσκεται σε λειτουργία. Αυτή η μέθοδος είναι συνήθως αρκετές φορές ταχύτερη από την ευθυγράμμιση με γυροσκοπική πυξίδα, αλλά απαιτεί ένα άλλο σύστημα INS στο όχημα ξενιστή και μπορεί να απαιτεί ειδικούς ελιγμούς του οχήματος «ξενιστή» για την επίτευξη παρατηρησιμότητας των μεταβλητών ευθυγράμμισης.
4. Υποβοηθούμενη από GPS ευθυγράμμιση χρησιμοποιώντας συνταίριασμα θέσης με το GPS ώστε να εκτιμηθούν οι μεταβλητές της ευθυγράμμισης. Αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ενοποίησης. Δεν απαιτεί το όχημα ξενιστής να βρίσκεται σε ακινησία κατά την ευθυγράμμιση, αλλά θα υπάρξει κάποια χρονική περίοδος μετά την ενεργοποίηση των συστημάτων, έως ότου τα σφάλματα του συστήματος πλοήγησης πέσουν κάτω από τα αποδεκτά όρια.

Η ευθυγράμμιση με γυροσκοπική πυξίδα είναι η μόνη από τις ανωτέρω που δεν απαιτεί εξωτερική υποβοήθηση. Αν και δεν είναι απαραίτητη για την ενοποίηση πολλά συστήματα INS είναι διαμορφωμένα ώστε να μπορούν να εκτελέσουν τέτοιου είδους ευθυγράμμιση από τον κατασκευαστή (Grewal κ.ά., 2007).

6.2.4. Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του ενοποιημένου συστήματος είναι βασική, γιατί ελέγχει την ακρίβεια του συστήματος και εντοπίζει τα σφάλματα που πρέπει να διορθωθούν. Με την διαδικασία αυτή συγκρίνονται οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων που προκύπτουν με άμεσο τρόπο και οι αντίστοιχες που προκύπτουν με αεροτριγωνισμό. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε δύο στάδια.

Στο πρώτο στάδιο καθορίζονται οι παράμετροι της βαθμονόμησης (lever-arm offset, boresight mis-alignment, κ.ά.). Στο στάδιο αυτό: συγκρίνονται οι παράμετροι της βαθμονόμησης με τις παραμέτρους του εξωτερικού προσανατολισμού για κάθε πτήση που γίνεται, έπειτα γίνεται αεροτριγωνισμός και συγκρίνονται τα στοιχεία που προκύπτουν με τα αποτελέσματα του εξωτερικού προσανατολισμού που προκύπτουν κατά την πτήση βαθμονόμησης και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού που υπολογίστηκαν για κάθε θέση λήψης υπολογίζονται συντεταγμένες φωτοσταθερών στο σύστημα αναφοράς της επιφάνειας της γης και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες που προέκυψαν με επίγειες μεθόδους εντοπισμού.

Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που δίνει το ενοποιημένο σύστημα για την εκτέλεση τριγωνισμού με σκοπό την βέλτιστη λύση ενοποίησης.

Η παραπάνω διαδικασία έχει το μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνεται υπ' όψη η συσχέτιση των προσδιοριζόμενων στοιχείων προσανατολισμού και των στοιχείων εσωτερικού προσανατολισμού του αισθητήρα (στο καλιμπράρισμα δεν υπολογίζονται τα στοιχεία εσωτερικού προσανατολισμού, καθώς δίνονται από τον κατασκευαστή).

Για τον έλεγχο ακρίβειας της άμεσης γεωαναφοράς με πτήσεις ελέγχου απαιτούνται: ένα φωτογραμμετρικό μπλοκ με σταθερή γεωμετρία, ένα πεδίο ελέγχου πτήσης με αρκετά φωτοσταθερά σημεία, ένα αδρανειακό σύστημα πλοήγησης υψηλής ακρίβειας, μία σύγχρονη μηχανή αεροφωτογράφισης, ένα GPS διπλής συχνότητας, μικρή απόσταση – βάρση μεταξύ UAV και σταθμού αναφοράς (Μπαράκου, 2010).

6.3. Ακρίβεια Άμεσης Γεωαναφοράς

Η τελική ακρίβεια της άμεσης γεωαναφοράς που επιτυγχάνεται με την χρήση ενός ενοποιημένου συστήματος GPS/INS, ανεξαρτήτως από το είδος, την ποιότητα και την ακρίβεια του φωτογραφικού αισθητήρα, είναι μία διαδικασία ολοκληρωμένης επεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν από τα δύο υποσυστήματα που εμπλέκει την ακρίβεια της αδρανειακής μονάδας, την ποιότητα του δέκτη εντοπισμού, την ευθυγράμμιση μεταξύ των αισθητήρων πλοήγησης και φωτογράφισης καθώς και τις συνθήκες και συγκυρίες του περιβάλλοντος κατά την διάρκεια λήψης των εικόνων και των λοιπών δεδομένων από αέρος. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού

των εικόνων, της συνθήκες της αεροφωτογράφισης και τα χαρακτηριστικά του θορύβου των διάφορων αισθητήρων. (El-Sheimy, Nassar, 2005). Έτσι, προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια της άμεσης γεωαναφοράς μπορεί να ληφθεί υπ' όψη ένας αριθμός παραγόντων:

- Ο πρώτος αφορά στη βελτίωση της ποιότητας των λαμβανόμενων δεδομένων GPS, αφού το GPS είναι η κύρια πηγή ενημέρωσης των πληροφοριών. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση: πολλαπλών σταθμών αναφοράς GPS, μικρών αποστάσεων – βάσεων μεταξύ UAV και σταθμών αναφοράς καλύτερα μοντέλα ιονοσφαιρικής και τροποσφαιρικής διόρθωσης, βελτιωμένα ρολόγια, και χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους δέκτες GPS/GLONASS ώστε να παρέχουν περισσότερες δορυφορικές μετρήσεις
- Ένας δεύτερος παράγοντας είναι η αξιοποίηση υψηλής ποιότητας αδρανειακών συστημάτων, ειδικά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια.
- Ο τρίτος είναι η εφαρμογή μίας βέλτιστης διαδικασίας για τη συνολική διαδικασία βαθμονόμησης, τοποθέτησης των αισθητήρων και ευθυγράμμισής τους. Αυτό περιλαμβάνει τον βέλτιστο υπολογισμό των συστηματικών σφαλμάτων των υποσυστημάτων του ενοποιημένου συστήματος, τον βέλτιστο συγχρονισμό και τον βέλτιστο προσδιορισμό του γωνιακού αποπροσανατολισμού.
- Ο τέταρτος τρόπος είναι η βελτιστοποίηση της μαθηματικής μοντελοποίησης του χρησιμοποιούμενου αδρανειακού συστήματος, με στόχο την βελτιωμένη αντιστάθμιση των επιμέρους σφαλμάτων και την ενίσχυση της ποιότητας των αποτελεσμάτων

Φωτογραφικός αισθητήρας		Ληφθείσα ακρίβεια	
		Θέση (m)	Στροφές (deg)
Εναέρια μηχανή	Κλίμακα > 1 : 2.000	0,05 - 0,10	0,004 - 0,008
	Κλίμακα > 1 : 5.000	0,20 - 1,00	0,017 - 0,034

Πίνακας 4.2: Ακρίβειες άμεσης γεωαναφοράς που μπορούν να επιτευχθούν με σύγχρονους φωτογραφικούς δέκτες και συστήματα πλοήγησης σε στάδιο μετεπεξεργασίας (Ip, 2005).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Ενώ τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες, τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν σε αριθμό και αποτελεσματικότητα, καθώς οι τεχνολογίες που αφορούν στο σκελετό των οχημάτων, τους αισθητήρες και την πλοήγηση ωριμάζουν. Συνεπώς τα πιθανά πλεονεκτήματα από την χρήση των συστημάτων αυτών πλέον επεκτείνονται πέραν τη στρατιωτική χρήση, καλύπτοντας πληθώρα εφαρμογών.

Η σμίκρυνση των αισθητήρων εντοπισμού και προσανατολισμού, η προσαρμογή των φωτομηχανών, σαρωτών και ραντάρ στις μη επανδρωμένες εναέρια πλατφόρμες, η ευελιξία και το χαμηλό κόστος που προσφέρουν τα συστήματα αυτά σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους συλλογής δεδομένων τα κάνει κατάλληλα για πολλές εφαρμογές Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης, όπως στην Χαρτογραφία, στο Κτηματολόγιο κ.ά. Παρ' όλα αυτά το μέγεθος των UAV παραμένει αντιστρόφως ανάλογο με το κόστος, το φορτίο που μπορούν να μεταφέρουν και την ακρίβεια που μπορούν να παρέχουν στις διάφορες εφαρμογές τους, και για το λόγο αυτό η επιλογή τους ως μεθόδου συλλογής δεδομένων, και η επιλογή του φορτίου τους δεν πρέπει να γίνονται χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψη οι παράμετροι της εκάστοτε εφαρμογής.

Επισημαίνεται ότι ο συνδυασμός της χρήσης UAV με άλλες μεθόδους συλλογής δεδομένων δίνει συχνά το βέλτιστο αποτέλεσμα και κυρίως για εργασίες αποτύπωσης, όπως στην τεκμηρίωση της πολιτισμικής κληρονομιάς. Τα μη επανδρωμένα συστήματα συλλογής εικόνων δεν αντικαθιστούν τα επανδρωμένα με μεγάλους εστιακού επιπέδου αισθητήρες, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν επικουρικά σε περιοχές με μικρό φάσμα κάλυψης.

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, πολλές από τις Φωτογραμμετρικές εφαρμογές, διεξάγονται πλέον με την βοήθεια μικρών UAV και με ερασιτεχνικές χαμηλού κόστους φωτομηχανές. Για τον εξοπλισμό αυτού του είδους, λογισμικά επίγειου ελέγχου, πλοήγησης και προσανατολισμού, σχεδιασμού πτήσης και λήψης φωτογραφιών και μετεπεξεργασίας δεδομένων υπάρχουν ήδη και ολοένα εξελίσσονται. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες από τις νεότερες εταιρίες που παράγουν Φωτογραμμετρικά λογισμικά, έχουν ήδη επανασχεδιάσει τα λογισμικά τους, ούτως ώστε να δέχονται εικόνες από UAV. Τα λογισμικά επεξεργασίας για την βαθμονόμηση, προσανατολισμό εικόνων και ανακατασκευή επιφανειών, έχουν ήδη αναπτυχθεί σε τέτοιο υψηλό επίπεδο αυτοματισμού που μπορούν να εξυπηρετούν μία αγορά της οποίας το εργατικό δυναμικό είναι σε γενικές γραμμές λιγότερο εξειδικευμένο από εκείνη του παραδοσιακού χώρου της αεροφωτογραμμετρίας. Οι τεχνικές υπολογιστικής όρασης – καταγόμενες από τις περιοχές του computer vision και της σύγχρονης Φωτογραμμετρίας – έχουν συμβάλει πολύ σε αυτό.

Οι παράμετροι που προκύπτουν από τα INS/GNSS, αν και αναγκαίες για την σε πραγματικό χρόνο πλοήγηση και έλεγχο των UAV, χρησιμοποιούνται σπάνια στα προαναφερθέντα λογισμικά μετεπεξεργασίας (και κυρίως για να παρέχουν αρχικές τιμές), στην DiSO και στην ISO, λόγω των περιορισμένων επιδόσεων που υπάρχουν στα σημερινά IMU. Ωστόσο, ο ρυθμός ανάπτυξης των τεχνολογιών MEMS μπορεί να αλλάξει το σκηνικό αυτό γρήγορα. Η

ανακατασκευή επιφανειών και η παραγωγή ορθοεικόνων από φωτογραφίες συλλεχθείσες με UAV, επηρεάζονται από τα πρόσφατα επιτεύγματα στο high-density matching και την μεγάλη τοποθέτηση χρημάτων για το σχεδιασμό μαζικής παραγωγής ερασιτεχνικών φωτομηχανών.

Σχετικά με τη χρήση των σαρωτών laser, αυτή δεν είναι και τόσο κοινή στην Φωτογραμμετρία με UAV, λόγω κυρίως της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης που συνδέει την απόδοση και το μέγεθος τους, είτε της σημαντικής επίδρασης της δυναμικής της πτήσης στη διαδικασία μέτρησης. Παρ' όλα αυτά έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες ενσωμάτωσης τους στα UAV, γεγονός που φανερώνει ότι αυτά τα προβλήματα στο σύντομο μέλλον θα επιλυθούν. Μάλιστα ενδεχόμενος συνδυασμός σαρωτών και φωτομηχανών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μοντέλα υψομέτρου υψηλής ακρίβειας. Οι σαρωτές laser δημιουργούν πολύ πυκνά νέφη σημείων σε περιοχές χωρίς έντονη υφή ενώ τα δεδομένα από εικόνες είναι επωφελή σε περιπτώσεις χαρτογράφησης υφής. Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη αυτού του συνδυασμού είναι η βελτίωση της ακρίβειας του υπολογισμού της πορείας της πτήσης του UAV σε πραγματικό χρόνο που θα βοηθήσει στην συνδυασμένη επεξεργασία των δεδομένων.

Τα συστήματα πλοήγησης είναι πλέον αρκετά ελαφρά και ακριβή, και τα λογισμικά επίγειου ελέγχου προσφέρουν πλέον δυνατότητα ρύθμισης πολυάριθμων παραμέτρων που αφορούν στην πτήση των UAV και στη λήψη εικόνων, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο, καθώς και δικλείδες ασφαλείας για την αποφυγή ατυχημάτων. Οι επιλογές που προσφέρουν τα συστήματα επίγειου ελέγχου κάνουν μάλιστα δυνατή την υλοποίηση ενός προγραμματισμού λήψης φωτογραφιών με κάθε του λεπτομέρεια.

Η άμεση γεωαναφορά, επιτυγχάνεται με την χρήση ενός ενοποιημένου συστήματος GPS/INS, και είναι μία διαδικασία ολοκληρωμένης επεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν από τα δύο υποσυστήματα, ενώ χρησιμοποιεί κάποια φίλτρα για την αναδρομική επεξεργασία δεδομένων. Η τακτική αυτή, με τη χρήση συγκεκριμένων μεθόδων μέτρησης, για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα μετρήσεων θα μπορούσε ενδεχομένως να κάνει υπολογισμούς (σε στάδιο μετεπεξεργασίας) με ακρίβεια εκατοστών με την τεχνική PPP χωρίς την ανάγκη σταθμών αναφοράς. Γίνεται βέβαια κατανοητό, ότι αυτό είναι εφικτό μόνο στην περίπτωση των UAV σταθερών πτερυγίων, καθώς αυτά είναι που προσφέρουν μεγαλύτερες διάρκειες πτήσης.

Εν κατακλείδι, τα μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης είναι ένας γρήγορος και οικονομικός τρόπος συλλογής δεδομένων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, ορθοφωτογραφιών και τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων. Ωστόσο προϋπόθεση για την περαιτέρω εκτεταμένη χρήση τους αποτελεί η θέσπιση νομοθεσίας με εναρμονισμένους κανονισμούς με τα άλλα Ευρωπαϊκά κράτη. Τα συστήματα UAV αναμένεται να πρωταγωνιστήσουν στην σκηνή της Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης, καθώς όλο και περισσότερες καινοτόμες ιδέες εφαρμόζονται όσον αφορά στα UAV. Μία από αυτές αναμένεται να είναι και η προσαρμογή, στα συστήματα αυτά, των ραντάρ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Σε αυτό το παράρτημα, ο πίνακας 1 περιλαμβάνει από τα ορισμένα UAV δύο διαφορετικών τύπων (σταθερών πτερυγίων και πολλαπλών στροφείων), που χρησιμοποιούνται σε Φωτογραμμετρικές εφαρμογές, και περιγράφονται τα βασικά τους χαρακτηριστικά.

Πίνακας Α.1: παραδείγματα κοινών UAV για Φωτογραμμετρικές εφαρμογές

Μοντέλο	Κατασκευαστής	Βάρος (kg)	Αντοχή έως (h)	Ενσωματωμένο φορτίο(ε) ή max βάρος φορτίου(β)
<i>Κοινά εναέρια οχήματα σταθερών πτερυγίων</i>				
SwingletCAM	SenseFly	0,5	0,5	(ε)16 Mpx RGB camera
GeoScan101	GeoScan	2	1	(ε)24,3 Mpx RGB camera
UX5	Trimble	2,5	0,83	(ε)16,1 Mpx MILC RGB camera
Pteryx	FotoMapy	5	2	(β) 1kg χωρίς μπαταρίες
Sirius I	MAVinci	3	0,91	(ε)16 Mpx RGB camera
Kahu	Skycam	4	2	(ε) double-head 16 Mpx MILC RGB cameras
Bramor Geo	C-Astral	3,8	1,5	(ε)16 Mpx sensor
<i>Κοινά εναέρια οχήματα πολλαπλών στροφείων</i>				
md4-1000	Microdrones	3	1,5	1,2 kg
HT-8-2000	Height-Tech	2,4	0,33	2 kg
Aibot x6	Aibotix	2,4	0,5	2.5 kg
Falcon 8	Ascending technologies	2	0,37	0,8 kg
HexaKopter	MikroKopter	1,2	0,75	1 kg
ZX5	Trimble	2,7	0,33	2,3 kg

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γιαννίρης, Γ., (2013). *UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Μη επανδρωμένα οχήματα αέρος. Τα πρώτα Ελληνικά αποτελέσματα.*
- Γεωργόπουλος, Α., (2013). *Σημειώσεις Φωτογραμμετρίας II: LiDAR*, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Τομέας Τοπογραφίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
- Γεωργόπουλος, Α., Βασιλάκη, Δ., (2013). *Σημειώσεις Φωτογραμμετρίας II: SAR*, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Τομέας Τοπογραφίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
- Γεωργόπουλος, Α., Χλιβερού Ρ., (2013). *Στοιχεία Φωτογραφικής Μηχανής*, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Τομέας Τοπογραφίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
- Καραδέδος, Γ., (2009). *Ιστορία & Θεωρία Της Αποκατάστασης*, ISBN 978-960-6796-14-2 Εκδόσεις Μέθεξις, Θεσσαλονίκη
- Κατσιγιάννη, Γ., (2014). *Συγκριτική Αξιολόγηση Συστημάτων GNSS, GNSS/INS, RTS για την Εξαγωγή Τροχιάς Πεζών σε Δύσκολα Περιβάλλοντα*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΜΠΣ Γεωπληροφορική, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μπαράκου, Α., (2010). *Άμεση Γεωαναφορά Αεροφωτογραφίας*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΜΠΣ Γεωπληροφορική, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
- Οικονόμου, Χ., (2014). *Διερεύνηση των δυνατοτήτων των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης*, Διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ, Αθήνα
- Παραδείσης, Δ., (2000). *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας*, Κέντρο δορυφόρων Διονύσου, Τομέας τοπογραφίας, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα
- Πατιάς, Π., (1991). *Εισαγωγή στην Φωτογραμμετρία*, ISBN 960-431-021-6, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Φωτίου, Α., Πικριδάς, Χ., (2006). *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*, ISBN 960-456-004-2, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Baltsavias, E., (1999). *A comparison between photogrammetry and laser scanning*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54 (1999), p. 83-94
- Baltsavias, E., (1999). *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54 (1999), p. 199-214
- Barazzetti, L., Scaioni, M., Remondino, F., (2011). *Automated and accurate orientation of complex image sequences*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16, p. 277-284, ISPRS Trento 2011 Workshop, 2-4 March 2011, Trento, Italy

- Chan, Y. K., Koo, V. C., (2008). *An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)*, Progress in Electromagnetics Research B, Volume 2, p. 27–60, Faculty of Engineering & Technology, Multimedia University Jalan Ayer Keroh Lama, Kampong Bukit Beruang, Melaka, Malaysia
- Colomina, I., Molina, P., (2014). *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92 (2014) p. 79-97
- Cramer, M., (2013). *The UAV LGL BW project—a NMCA case study*, In: 54th Photogrammetric Week, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, p. 165–179
- Cramer, M., (2014). *Using Remotely Piloted Aircraft Systems for Data Collection and Point Cloud Generation*. Institute of Photogrammetry, Stuttgart, Germany
- van Diggelen, F., (2010). *Are we there yet? The state of the consumer industry*, GPSWorld Volume 21, p. 8-10
- Eisenbeiss, H., (2009). *UAV Photogrammetry*, Doctoral Dissertation, ETH Zurich
- Essen, H., Johannes, W., Stanko, S., Sommer, R., Wahlen, A., Wilcke, J., (2012). *High resolution W-band UAV SAR*, In: 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 22-27 July 2012, p. 5033–5036
- Fiorillo, F., Jiménez, B., Remondino, F., Barba, S., (2012). 3D Surveying and modeling of the archaeological area of Paestum, Italy. *Virtual Archaeology Review*, Volume 4, p. 55–60
- Fregonese, L., Achille, C., Adami, A., Chiarini, S., Cremonesi, S., Fassi, F., Taffurelli L., (2015). *UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy)*, Sensors 2015, 15, 15520-15539, ISSN 1424-8220, Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, ABC, Politecnico di Milano, via Ponzio, Milano 31-20133, Italy, www.mdpi.com/journal/sensors
- Gatziolis, D., Andersen, H., (2008). *A Guide to LiDAR Data Acquisition and Processing for the forests of the Pacific Northwest*, General Technical Report PNW-GTR-768, Pacific Northwest Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture
- Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., Dosso, P., (2013). *UAV photogrammetry: block triangulation comparisons*, ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci., p. 157–162
- Hartmann, W., Tilch, S., Eisenbeiss, H., Schindler, K., (2012). *Determination of the UAV position by automatic processing of thermal images*, ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXIX-B6, p. 111–116
- Ip, A. W. L., (2005), *Analysis of Integrated Sensor Orientation for Aerial Mapping*, Diploma Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, UCGE Report No. 20204

- Józków, G., Toth, C., (2014). *Georeferencing Experiments with UAS Imagery*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-1, p. 25-29, ISPRS Technical Commission I Symposium, 17 – 20 November 2014, Denver, Colorado, USA
- Kim, T. H., Toazza, D., (2009). *Navigation Control of an Unmanned Aerial Vehicle*, Bachelor Thesis, School of Information Science Computer and Electrical Engineering, Halmstad University, Halmstad, Sweden
- Kraus, K., (2004). *Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren*, ISBN 3-427-7864-3, Ferd. Duemmler Verlag, Bonn
- Küng, O., Strecha, C., Fua, P., Gurdan, D., Achtelik, M., Doth, K.-M., Stumpf, J., (2011). *Simplified building models extraction from ultra-light uav imagery*, ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXVIII-1/C22, p. 217–222
- Leasure, M., Nolan, M., (2015). *Unmanned Aviation Systems: The definition Guide*, ISBN-10: 099-624-521-9, eAcademicBooks LLC, Fowler, Indiana, USA
- Lemens, M., (2013). *Peaceful Use of Drones*, GIM-International, USA Edition, Volume 27
- Lo Brutto, M., Garraffa A., Meli P., (2014). *UAV PLATFORMS FOR CULTURAL HERITAGE SURVEY: FIRST RESULTS*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5, p. 227-234, 2014 - ISPRS Technical Commission V Symposium, 23 – 25 June 2014, Riva del Garda, Italy
- Mostafa, M., Schwarz K.-P., (2000). *A Multi-Sensor System for Airborne Image Capture and Georeferencing*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 66, No. 12, December 2000, p. 1417-1423, American Society for Photogrammetry & Remote Sensing
- Mylin, A., (2007). *A Communication Link Reliability Study for Small Unmanned Aerial Vehicles*, Master's Theses, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA
- Naidoo, Y., Stopforth, R., Bright, G., (2011). *Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle, Helicopter Modelling & Control*, <http://www.intechopen.com/>
- Nassar, S., (2003). *Improving the Inertial navigation System (INS) Error Model for INS and INS/DGPS Applications*, Ph.D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, UCGE Report No. 20183
- Nassar, S., El-Sheimy, N., (2004). *Wavelet Analysis For Improving INS and INS/DGPS Navigation Accuracy*, The Journal of Navigation (2004), V58, p. 1–16. The Royal Institute of Navigation, DOI: 10.1017/S0373463304003005 Printed in the United Kingdom
- Natarayan, G., (2001). *Ground Control Stations for Unmanned Air Vehicles*, Defence Science Journal, Vol 51, No 3, Aeronautical Development Establishment, Bangalore, India
- Pfeifer, N., Glira, P., Briese, C., (2012). *Direct Georeferencing with On Board Navigation Components of Light Weight UAV Platforms*, International Archives of the Photogrammetry,

Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B7, p. 487-492, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia

Rehak, M., Mabillard, R., Skaloud, J., (2013). *A Micro-UAV with the Capability of Direct Georeferencing*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, p. 317-323, UAV-g2013, 4 – 6 September 2013, Rostock, Germany

Remondino, F., (2011). *Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning*, Remote Sensing 3, p. 1104–1138.

Remondino, F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D., (2011). *UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING – CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES –*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, p. 25-31, ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14-16 September 2011, Zurich, Switzerland

Remy, M., de Macedo, K., Moreira, J., (2012). *The First UAV-based P- and X-band Interferometric SAR System*, IEEE, München, Germany, p. 5041–5044

Rönnbäck, S., (2000). *Development of a INS/GPS Navigation Loop for an UAV*, Master's Thesis, Department of Computer Science and Electrical Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden

Rosnell, T., Honkavaara, E., (2012). *Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera*, Sensors 12, p. 453–480

Rinaudo, F., Chiabrando, F., Lingua, A., Span, A., (2012). *ARCHAEOLOGICAL SITE MONITORING: UAV PHOTOGRAMMETRY CAN BE AN ANSWER*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, p. 583–588, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia

Rufino, G., Moccia, A., (2005). *Integrated VIS-NIR Hyperspectral/thermal-IR Electrooptical Payload System for a Mini-UAV*, p. 647-664 American Institute of Aeronautics and Astronautics, Arlington, VA, USA

Sauerbier, M., Eisenbeiss H., (2010). *UAVS FOR THE DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, p. 526-531 - Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK

Sazdovski, V., Kolemishvska-Gugulovska, T., Stankovski, M., (2005). *Kalman Filter Implementation for Unmanned Aerial Vehicles Navigation Developed within a Graduate Course*, Institute of ASE at Faculty of EE,, St. Cyril and Methodius University, MK-1000, Skopje, FYROM

Scholtz, A., Kaschwich, C., Kruger, A., Kufieta, K., Schnetter, P., Wilkens, C., Kruger, T., Vorsmann, P., (2011). *Development of a new multi-purpose UAS for scientific application*. ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXVIII-1/C22, p. 149–154

Schulz, H., (2011). *The unmanned mission avionics test helicopter—a flexible and versatile VTOL-UAS experimental system*, ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXVIII-1/C22, p. 309–314

Schmidt, M., (2011). *Simulation and Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle*, Master's Theses, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

Skaloud, J., (2002). *Direct Georeferencing in Aerial Photogrammetric Mapping*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, p. 207-210, EPFL, Lausanne, Switzerland

Skaloud, J., Legat K., (2008). *Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 63 (2008) p. 272–282

Vasile, G., Besic, N., (2013). *Fundamentals of Remote Sensing: SAR Polarimetry*, Equipe SIGNAL IMAGE PHYSIQUE, Département Image Signal, Laboratoire Grenoble Images Paroles Signal Automatique, Saint Martin d'Hères, France

Wehr, A., Lohr, U., (1999). *Airborne laser scanning – an introduction and overview*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Volume 54, p. 68-82

Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., Turner, C., (2012). *Assessing the feasibility of UAVbased LiDAR for high resolution forest change detection*, ISPRS – Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXIX-B7, p. 499–504

Woodman, O., (2007). *An Introduction to Inertial Navigation*, Technical Report Number 696, Computer Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, England

Zhou, G., Yang, J., Li, X., Yang, X., (2012). *Advances of flash LiDAR development onboard UAV*, ISPRS – Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXIX-B3, p. 193–198

Κανονισμός πτήσεων αερομοντέλων, ΦΕΚ Β9 2010

Ενδεικτικοί ιστότοποι

<http://noaa.gov/>

<http://uavsar.jpl.nasa.gov/>

<http://www.advancednavigation.com.au/>

<http://www.agisoft.com/>

<http://www.applanix.com/>

<http://ardupilot.com/>

<http://www.dji.com/>
<http://www.dpreview.com/>
<https://www.faa.gov/uas/>
<http://www.flir.eu/>
<http://www.fhr.fraunhofer.de/>
<http://www.headwallphotonics.com/>
<http://www.imar-navigation.de/>
<http://www.imsar.com/>
<http://www.isprs.org/>
<http://www.learnrobotix.com/>
<http://www.nasa.gov/>
<http://www.novatel.com/>
<http://www.optris.com/>
<https://www.pix4d.com/>
<http://www.quest-innovations.com/>
<http://www.questuav.com/>
<http://www.racurs.ru/>
<http://www.radartutorial.eu/>
<http://www.rikola.fi/>
<http://www.sbg-systems.com/>
<http://www.selexgalileo.com/>
<http://www.tarot-rc.com/>
<http://www.tetracam.com/>
<http://www.trimble.com/>
<http://uavcoach.com/>
<http://www.usgs.gov/>
<http://www.walkera.com/>
<http://www.workswell.eu/>

