



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής
ΠΜΣ Γεωχωρικές Τεχνολογίες

**ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ SfM/SLAM ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ
ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΣΠΗΛΑΙΟΛΟΓΙΑ**



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Τζωρτζάκου Αικατερίνη
Α.Μ.: GST1902**

**Επιβλέποντες:
Λάζαρος Γραμματικόπουλος
Έλλη Πέτσα**

**ΑΘΗΝΑ
Μάρτιος 2022**



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
Department of Surveying & Geoinformatics Engineering
Master of Science in Geospatial Technologies

***ANALYSIS OF SFM/SLAM PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES WITH
EMPHASIS ON SPELEOLOGICAL APPLICATIONS***



Master Thesis

Tzortzakou Aikaterini
R.N.: GST1902

Supervisors:
Lazaros Grammatikopoulos
Elli Petsa


ATHENS
March 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής
ΠΜΣ Γεωχωρικές Τεχνολογίες

**ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ SfM/SLAM ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ
ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΣΠΗΛΑΙΟΛΟΓΙΑ**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Λάζαρος Γραμματικόπουλος	Επίκουρος Καθηγητής	
2.	Έλλη Πέτσα	Καθηγήτρια	
3.	Ηλίας Καλησπεράκης	Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ Διδάκτωρ Μηχανικός ΕΜΠ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τζωρτζάκου Αικατερίνη του Ομήρου, με αριθμό μητρώου GST1902 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωχωρικές Τεχνολογίες» του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Λάζαρος Γραμματικόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής

Έλλη Πέτσα
Καθηγήτρια

ΤΖΩΡΤΖΑΚΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

Στην Εβελίνα,
για την οποία ελπίζω, η προσπάθειά μου
να αποτελέσει παράδειγμα και κίνητρο
στη ζωή της.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και κατ' επέκταση του Μεταπτυχιακού Προγράμματος των Γεωχωρικών Τεχνολογιών, ανοίγει ένας νέος κύκλος για μένα στα πλαίσια της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας.

Η επίτευξη αυτού του στόχου δεν θα ερχόταν εις πέρας αρχικά χωρίς την παρότρυνση και την υποστήριξη των συναδέλφων, και φίλων πλέον, από την Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας-Σπηλαιολογίας, αρμόδιας Υπηρεσίας του Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού σε θέματα που αφορούν στην προστασία και ανάδειξη των ελληνικών σπηλαίων, των οποίων το επιστημονικό έργο αποτέλεσε έμπνευση για τις μετέπειτα σπουδές μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Λάζαρο Γραμματικόπουλο και κ. Έλλη Πέτσα, με τους οποίους συνεργάστηκα άψογα παρά τις δύσκολες συνθήκες που διανύουμε εξαιτίας της υγειονομικής κρίσης, κυρίως επειδή κατάφεραν να μου μεταδώσουν την αφοσίωσή τους και την αγάπη τους για την επιστήμη τους και έτσι να μου δημιουργήσουν την ανάγκη να διευρύνω τις γνώσεις μου στον κλάδο της Φωτογραμμετρίας.

Ευχαριστώ και τους καινούριους μου φίλους, τους οποίους απέκτησα στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος και με τους οποίους μοιράστηκα αγωνίες, προβληματισμούς και επιστημονικές αναζητήσεις.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να έχω ολοκληρώσει τις Μεταπτυχιακές σπουδές μου χωρίς τη στήριξη της οικογένειάς μου και την τεράστια υπομονή και κατανόηση που υπέδειξαν για το χρόνο που τους στέρησα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Φωτογραμμετρικές Τεχνικές SfM/SLAM με Έμφαση στις Εφαρμογές στη Σπηλαιολογία» εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωχωρικές Τεχνολογίες» του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Στόχο της εργασίας αποτέλεσε η βιβλιογραφική μελέτη και έρευνα σε θέματα που αφορούν νέες τεχνολογίες στην κινητή χαρτογράφηση σπηλαίων. Λόγω της μεγάλης σημασίας που παρουσιάζουν από επιστημονικής άποψης αλλά και ιδιαιτερότητας λόγω της μορφολογίας τους, τα σπήλαια χρήζουν ιδιαίτερης μεταχείρισης. Ύστερα από την ανάλυση της φωτογραμμετρικής τεχνικής SfM καθώς και της μεθόδου SLAM με τους αντίστοιχους αλγόριθμους, γίνεται πλέον σαφές ότι οποιαδήποτε εφαρμογή εντός του σπηλαίου, είτε πρόκειται για αρχαιολογική ανασκαφή είτε για γεωλογική μελέτη ή σπηλαιολογική εξερεύνηση, μπορεί να διενεργηθεί πολύ πιο εύκολα, σε λιγότερο χρόνο και με μεγαλύτερη ασφάλεια ενώ το τελικό προϊόν ανακατασκευής του τρισδιάστατου χώρου αποδίδεται με μεγάλη ακρίβεια. Η συλλογή των δεδομένων για τη χαρτογράφηση υπόγειων συστημάτων περιλαμβάνει ειδικούς αισθητήρες που ανταποκρίνονται αρχικά σε χώρους όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα κάλυψης από δορυφόρους και συνεπώς δεν υπάρχει σήμα GPS και δευτερευόντως που μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλον χαμηλού φωτισμού και ακανόνιστου σχήματος με πολλά εμπόδια. Μέρος της παρούσας εργασίας αποτελεί και η παρουσίαση εφαρμογών κινητής χαρτογράφησης σε σπήλαια με συνδυασμό διαφορετικών αισθητήρων σε κάθε περίπτωση, καταλήγοντας σε συμπεράσματα σχετικά με την εξέλιξη της τεχνολογίας κάθε χρονική περίοδο καθώς και τα περιθώρια βελτίωσης των τεχνολογικών μέσων για αποτελέσματα με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, σε λιγότερο χρόνο και με μικρότερο κόστος.

University of West Attica
School of Engineering
Department of Surveying & Geoinformatics Engineering
Master of Science in Geospatial Technologies

**Analysis of SfM/SLAM Photogrammetric Techniques with Emphasis on
Speleological Applications**

Master Thesis

Aikaterini Tzortzakou

March 2022

ABSTRACT

Caves play a significant role in our cultural heritage and as a consequence new methods for the facilitation of their preservation and protection are well welcomed. Traditional methods of cave surveying which mostly prevailed the past decades were time consuming and inefficient especially in hard-to-reach spaces or complex environments, unsuitable to humans, as in case of caves. Technological progress and advances in the fields of Computer Vision and Robotics have brought about revolution in the discipline of Photogrammetry and have made it possible for humans to proceed 3D modelling of subterranean environments with certain characteristics such as the absence of GPS signal and conditions of complete darkness. This Master Thesis presents the novel techniques of SfM and SLAM and more specifically the function of certain algorithms as well as the right combination of sensors, which assist the procedure of mapping unknown, hazardous areas. Speleological applications in natural caves demonstrate different methods in localization and mapping as well as graph-based exploration path planning using hand-held LIDAR, drones, RGB-D cameras etc. State-of-the-art technology has offered great opportunities as far as geological research is concerned, in terms of cave progressing in time, and has also been able to function as “Co-Archaeologists” that can map large cavities and reach inaccessible places. Furthermore, the latest technological means, which is able to produce an accurate 3D map in limited time, is an important tool in the hands of cave explorers and rescuers.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. Ο ΚΟΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ.....	4
1.1 Σχηματισμός Σπηλαίων.....	4
1.2 Χρήση Σπηλαίων	5
1.3 Γεωμετρική Τεκμηρίωση Σπηλαίων	8
2. SfM ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ.....	10
2.1 Structure from Motion	10
2.2 Ο αλγόριθμος SIFT.....	16
2.3 Ο αλγόριθμος SURF	20
3. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.....	22
3.1 Αισθητήρες προσέγγισης και απόστασης	22
3.2 Κωδικοποιητές κίνησης	22
3.3 Αδρανειακό Σύστημα Πλοήγησης.....	23
3.4 Κάμερες	23
3.5 LiDAR.....	25
3.6 Συστήματα μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών	26
3.7 State-of-the-art τεχνολογία αποτύπωσης.....	29
4. SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING	33
4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	33
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SLAM	34
4.3 Φίλτρο Kalman	37
4.4 Fast-SLAM.....	39
4.5 Συνδιασμός LiDAR και VISUAL SLAM.....	40
4.6 VISUAL SLAM.....	41
4.6.1 Stereo Vision-SLAM.....	43
4.6.2 Monocular Vision SLAM	43
4.7 LiDAR SLAM.....	46
4.7.1 Scan-Matching and Graph Optimization.....	46
4.7.2 Occupancy map και φίλτρο σωματιδίων	47
4.8 Visual-LiDAR SLAM	48
4.8.1 Βαθμονόμηση των αισθητήρων	49
4.8.2 Προσαρμογή του φίλτρου EKF.....	49
5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ	51
5.1 Χαρτογράφηση σπηλαίων με χειροκίνητη συσκευή LiDAR.....	51
5.2 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι χαρτογράφησης με UAV	58
5.3 Χαρτογράφηση σπηλαίου με συνδιασμό αισθητήρων LiDAR και φωτογραφικών μηχανών ενσωματωμένους σε UAV.....	59
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σπήλαιο ονομάζεται κάθε φυσική κοιλότητα μικρή ή μεγάλη, οριζόντια ή κατακόρυφη στο εσωτερικό της Γης, στην οποία έχει πρόσβαση ο άνθρωπος. Τα σπήλαια εντάσσονται στα υπόγεια καρστικά φαινόμενα και η δημιουργία τους οφείλεται στη διαλυτότητα των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, η οποία δημιουργεί τον πλούσιο λιθωματικό τους διάκοσμο. Το μικροκλίμα των σπηλαίων (πίεση, σταθερή θερμοκρασία, υψηλή υγρασία) καθώς και οι αβιοτικές συνθήκες που επικρατούν μέσα σε αυτά ευθύνονται για την αργή αλλά σταθερή εξέλιξή τους μέσα στο πέρασμα των αιώνων καθώς και για την ποικιλία των σπηλαιοαποθέσεων.

Τα σπήλαια αποτελούν μείζονος σημασίας μνημεία της Φύσης και του Πολιτισμού. Τα παλαιοντολογικά κατάλοιπα και αρχαιολογικά ευρήματα που έχουν βρεθεί μέσα σε αυτά και για τα οποία υπάρχουν ενδείξεις ότι συνδέονται με την ανθρώπινη ύπαρξη, τα καθιστούν αντικείμενο ενδιαφέροντος και μελέτης πολλών επιστημονικών πεδίων. Προκειμένου όμως να γίνει οποιαδήποτε έρευνα εντός σπηλαίου, πρωταρχικό στάδιο αποτελεί η χαρτογράφηση αυτού είτε πρόκειται για αρχαιολογική ανασκαφή είτε για γεωλογική μελέτη είτε ακόμα και για απλή εξερεύνηση.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι χαρτογράφησης των σπηλαίων είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες ενώ τα επίπεδα ακρίβειας που προσφέρουν δεν είναι ικανοποιητικά. Επιπρόσθετα, οι συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό ενός σπηλαίου είτε πρόκειται για την έλλειψη φωτισμού και την περιορισμένη προσβασιμότητα λόγω της ανομοιομορφίας του περιβάλλοντός του είτε για τις ιδιαιτερότητες του μικροκλίματος που επικρατούν, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα υγρασίας που υπερβαίνουν το 90%, αυξημένη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα και μειωμένες ποσότητες οξυγόνου, δεν ευνοούν την ύπαρξη της ανθρώπινης παρουσίας μέσα σε αυτό για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάπτυξη νέων τεχνικών στον τομέα της ρομποτικής έχει επιφέρει επανάσταση στη χαρτογράφηση υπόγειων συστημάτων με όλες τις ιδιαιτερότητες που από τη φύση τους αυτά παρουσιάζουν. Πιο συγκεκριμένα, η πλοήγηση σε ένα περιβάλλον που δεν υποστηρίζει τη χρήση συστημάτων GNSS, ο προσδιορισμός της θέσης και η καταγραφή γεωμετρικής και ποιοτικής πληροφορίας αποτελούν ενέργειες που πραγματοποιούνται με χρήση ειδικών αισθητήρων, οι οποίοι συνεχώς εξελίσσονται και βελτιστοποιούνται με σκοπό την τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου με υψηλές προδιαγραφές ακρίβειας.

Τόσο η τεχνική SfM όσο και οι αλγόριθμοι SLAM δηλώνουν πλέον αισθητή παρουσία στον τομέα της σπηλαιολογίας επιλύοντας το πρόβλημα της χαρτογράφησης και της τρισδιάστατης ανακατασκευής των σπηλαίων. Οι κάμερες αποτελούν βασικά όργανα στην περίπτωση της διαδικασίας SfM, ενώ για την εφαρμογή της μεθόδου SLAM, ανάλογα με το είδος του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί είτε πρόκειται για σαρωτές λέιζερ είτε για κάμερες (monocular ή stereo), εφαρμόζεται αντίστοιχα και ο κατάλληλος αλγόριθμος. Επιπλέον, αισθητήρες όπως για παράδειγμα το Αδρανειακό Σύστημα Μέτρησης (IMU) ή οι αισθητήρες υπερήχων προσαρτώνται επίσης σε ρομποτικά συστήματα και αντιμετωπίζουν τα διάφορα προβλήματα που το κλειστό σύστημα ενός σπηλαίου εμφανίζει.

Ενώ η τεχνική SfM σε συνδιασμό με τις βασικές αρχές της Φωτογραμμετρίας έχει επιφέρει επανάσταση στην απόδοση τρισδιάστατων μοντέλων, το πρόβλημα της μεθόδου SLAM δεν είναι πλήρως λυμένο κυρίως λόγω του γεγονότος ότι εφαρμόζεται σε περιβάλλοντα που παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ετερογένειας και παράλληλα εμφανίζουν χαμηλό ποσοστό προβλεψιμότητας. Συνεπώς, ο υψηλός βαθμός αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην επίλυση καθιστά ακατάλληλο οποιοδήποτε είδος ντετερμινιστικής προσέγγισης του προβλήματος με αποτέλεσμα η υλοποίηση να είναι στοχαστική και βασισμένη σε πιθανότητες.

Η επιστήμη λοιπόν της Φωτογραμμετρίας εφαρμόζεται ήδη στη σπηλαιολογία με σκοπό την

ανάδειξη, αξιοποίηση και προστασία των μνημείων αυτών τα οποία κατέχουν εξέχουσα θέση στην πολιτισμική ζωή του τόπου. Εάν, δε, οι θεμελιώδεις αρχές της επιστήμης αυτής συνδιαστούν με εκείνες της Όρασης Υπολογιστών και της Ρομποτικής τότε μπορούμε να μιλάμε για επανάσταση στον τομέα της χαρτογράφησης, ενός τόσο πολύπλοκου περιβάλλοντος όπως είναι αυτό του σπηλαίου.

ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο **1^ο Κεφάλαιο** γίνεται μία πρώτη γνωριμία με τον χώρο του σπηλαίου με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών που παρουσιάζει το περιβάλλον ενός τέτοιου κλειστού, υπόγειου συστήματος. Γίνεται, λοιπόν, αναφορά στον τρόπο δημιουργίας των σπηλαίων καθώς και στις βασικές γεωλογικές διεργασίες που εκτελούνται στο εσωτερικό, και στις οποίες οφείλεται η συνεχής εξέλιξή τους. Ένα σπήλαιο, όμως, αποτελεί και αντικείμενο αρχαιολογικής μελέτης καθώς το περιβάλλον του ευνοεί τη συντήρηση των ευρημάτων, με αποτέλεσμα να μπορούν να μελετηθούν οι οικονομικές, κοινωνικές και θρησκευτικές προεκτάσεις που έχουν από τα προϊστορικά κι όλας χρόνια έως σήμερα. Για όλους τους παραπάνω λόγους και δεδομένου ότι ένα σπήλαιο αποτελεί χώρο μελέτης και έρευνας πολλών επιστημονικών πεδίων, είναι απαραίτητη η γεωμετρική τεκμηρίωση του χώρου του. Η αποτύπωση μιας σπηλιάς διενεργούνται με επίπονες και χρονοβόρες διαδικασίες στο παρελθόν προτού αυτές εξελιχθούν στις σύγχρονες μεθόδους του παρόντος, σύμφωνα με τις οποίες παρέχεται η δυνατότητα τρισδιάστατης χαρτογράφησης ενός σπηλαίου σε πραγματικό χρόνο με ταυτόχρονο εντοπισμό της θέσης του κινούμενου οχήματος (SLAM).

Στο **2^ο Κεφάλαιο** αναλύεται η τεχνική SfM της επιστήμης της Όρασης Υπολογιστών ενώ γίνεται σχετική αναφορά και στις θεμελιώδεις αρχές της Φωτογραμμετρίας. Η μέθοδος SfM στηρίζεται κυρίως σε αλγόριθμους όπως ο SIFT και ο SURF, οι οποίοι, αν και διαφέρουν ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, στην ουσία χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό και την συνταύτιση χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων.

Το **3^ο Κεφάλαιο** αναφέρεται στους αισθητήρες που προσαρμόζονται στο σύστημα καταγραφής των δεδομένων. Στην περίπτωση χαρτογράφησης ενός σπηλαίου προκύπτουν επιπλέον προβλήματα σε σχέση με την αποτύπωση οποιουδήποτε άλλου περιβάλλοντος. Τα εν λόγω προβλήματα που σχετίζονται με την έλλειψη φωτισμού, το δυσπρόσιτο του χώρου, την αδυναμία λήψης σήματος από δορυφόρους για τον εντοπισμό της θέσης του συστήματος και τις ιδιαίτερες συνθήκες μικροκλίματος που επικρατούν στο εσωτερικό του, θεραπεύονται με την προσάρτηση ειδικών αισθητήρων που έχουν να κάνουν με την ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων, με Μονάδες Αδρανειακής Μέτρησης κ.α.. Πρωταγωνιστικό ρόλο στην κινητή χαρτογράφηση υπόγειων συστημάτων κατέχουν και τα Συστήματα μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών, οι δυνατότητες των οποίων περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο.

Στο **4^ο Κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στο πρόβλημα της κινητής χαρτογράφησης με ταυτόχρονο εντοπισμό της θέσης της κινούμενης πλατφόρμας, γνωστό με το ακρωνύμιο SLAM και αναλύονται οι δημοφιλέστεροι τύποι αλγορίθμων σύμφωνα με την παγκόσμια βιβλιογραφία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σπηλαιολογικές εφαρμογές.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται εφαρμογές της τεχνικής SLAM σε σπήλαια από τη διεθνή βιβλιογραφία με διαφορετικές προσεγγίσεις κάθε φορά με σκοπό να γίνει μία συνοπτική καταγραφή των αποτελεσμάτων αυτών για την περαιτέρω εξέλιξη τόσο των αλγορίθμων που προσεγγίζουν το πρόβλημα SLAM όσο και των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση των σπηλαίων.

Στο **6^ο Κεφάλαιο** αναφέρονται τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής μελέτης που έγινε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας

1. Ο ΚΟΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΠΗΛΑΙΩΝ

1.1 Σχηματισμός Σπηλαίων

Ο όρος σπηλαιογένεση αναφέρεται σε ένα σύνολο φυσικοχημικών και βιολογικών φαινομένων τα οποία συντελούν ώστε να δημιουργηθεί ένα μικρό έγκολο σε ένα πέτρωμα το οποίο εξελίσσεται σε σπήλαιο με την πάροδο του χρόνου. Η συντριπτική πλειοψηφία των σπηλαίων, τουλάχιστον στον ελλαδικό χώρο, οφείλει τη δημιουργία της στο καρστικό φαινόμενο διάλυσης των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, τα οποία είναι πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο, από το νερό, το οποίο είναι εμπλουτισμένο κυρίως σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που προέρχεται από την ατμόσφαιρα και το έδαφος και το καθιστά ιδιαίτερα διαλυτικό μέσο. Από την απόθεση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) στο εσωτερικό των σπηλαίων δημιουργούνται χαρακτηριστικοί σχηματισμοί όπως είναι οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες, οι οποίοι ουσιαστικά συνθέτουν το πολύπλοκο περιβάλλον του σπηλαίου με τον πλούσιο λιθωματικό του διάκοσμο.

Η διαλυτική ιδιότητα του υπόγειου νερού δρα κατά μήκος των ρηγμάτων του ασβεστολιθικού πετρώματος είτε κατακόρυφα, καθώς αυτό κατεβαίνει εξαιτίας της βαρύτητας και δημιουργεί στενούς και ψηλούς διαδρόμους, είτε οριζόντια δημιουργώντας φαρδείς και χαμηλούς διαδρόμους αντίστοιχα.

Αφού ολοκληρωθεί η πρώτη φάση της διάνοιξης ενός σπηλαίου, ακολουθεί το επόμενο στάδιο δημιουργίας του λιθωματικού του διακόσμου. Η διαδικασία αυτή οφείλεται στην απόθεση ανθρακικού ασβεστίου με την εξάτμιση του νερού και την αποβολή διοξειδίου του άνθρακα. Κατά τους χειμερινούς μήνες, το νερό που περνάει τα στρώματα της οροφής του σπηλαίου έχοντας χαμηλή θερμοκρασία, διαλύει περισσότερο CaCO_3 . Καθώς, όμως, κατεβαίνει χαμηλότερα και εξαιτίας της θερμότητας της Γης, αυξάνει τη θερμοκρασία του και αποβάλλει αυξημένες ποσότητες CO_2 με αποτέλεσμα να διενεργείται απόθεση καθαρού ανθρακικού ασβεστίου τόσο σε ρωγμές από την οροφή (δημιουργία σταλακτιτών) όσο και στο δάπεδο όπου πέφτουν οι σταγόνες του νερού (δημιουργία σταλαγμιτών). Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά αργή αλλά σταθερή με αποτέλεσμα να απαιτούνται δεκάδες ή και εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια για τη δημιουργία των σπηλαιοθεμάτων (Γιαννόπουλος, 2000).

Άλλοι σχηματισμοί που μπορεί να δημιουργηθούν κατά την παραπάνω διαδικασία είναι οι κολώνες που προκύπτουν από την ένωση ενός σταλακτίτη με έναν σταλαγμίτη, οι κουρτίνες που αναπτύσσονται όταν η σταγόνα δεν αποσπάται αμέσως από την οροφή αλλά διανύει μία απόσταση πριν πέσει στο έδαφος με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια σειρά από λεπτά στρώματα CaCO_3 , οι δίσκοι κ.α. Τα σπήλαια διαθέτουν φυσικά διαχωριστικά τους μεγάλους όγκους των σχηματισμών που δημιουργούνται λόγω του καρστικού φαινομένου, χωρίζοντας τους ταιράστιους χώρους που διαθέτουν σε επιμέρους θαλάμους.

Το εσωτερικό ενός σπηλαίου χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες μικροκλίματος, οι οποίες παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με πολύ μικρές διακυμάνσεις που οφείλονται στην εναλλαγή των εποχών. Χαρακτηριστικό των συνθηκών αυτών είναι τα πολύ υψηλά επίπεδα υγρασίας συνήθως πάνω από 90%, η σταθερή θερμοκρασία και πίεση καθώς και οι συγκεκριμένες τιμές οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες εκτός των άλλων φυσικών παραγόντων επηρεάζονται σημαντικά και από την επισκεψιμότητα του σπηλαίου.



Εικόνα 1.1: Σπήλαιο Αλεπότρυπας Διρού

Ανάλογα με τη θέση τους τα σπήλαια διακρίνονται σε χερσαία, παράλια και υποθαλάσσια ενώ οι περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες που συνετέλεσαν στη δημιουργία τους τα κατατάσσουν στην κατηγορία των βραχοσκεπών, σπηλαιοβαράθρων κλπ.



Εικόνα 1.2: Σπάνιοι σχηματισμοί από το σπήλαιο Βλυχάδας Διρού, γνωστοί ως ελικτίτες, οι οποίοι σχηματίζονται αψηφώντας τους νόμους της βαρύτητας ακολουθώντας ακανόνιστες πορείες

1.2 Χρήση Σπηλαίων

Τα σπήλαια αποτελούν μαρτυρίες της ανθρώπινης δραστηριότητας ενώ η χρήση τους και ο συμβολισμός τους κάθε χρονική περίοδο εξαρτάται από την αντίληψη του ανθρώπου για το περιβάλλον του καθώς και τις προσωπικές του εμπειρίες ανεξάρτητα από οποιαδήποτε προϋπάρχουσα χρήση των χώρων αυτών. Κατά συνέπεια οι φυσικοί αυτοί σχηματισμοί μπορεί να θεωρηθούν ως πολιτιστικά και ιστορικά μνημεία, τα οποία ενσωματώνουν σημαντικές πτυχές της ανθρώπινης ιδεολογίας και κουλτούρας.

Ένας παράγοντας που χαρακτηρίζει τα σπήλαια και τα διαφοροποιεί από άλλες ανθρώπινες εγκαταστάσεις και αποικισμούς ανά τους αιώνες είναι το γεγονός ότι αποτελούν πάντα σταθερά σημεία σε ένα τοπίο γι αυτό και οι έρευνες των αρχαιολόγων επικεντρώνονται σε αυτή τους την ιδιότητα προκειμένου να διαφωτίσουν διάφορες πτυχές της ανθρώπινης ζωής και δραστηριότητας. Στην πραγματικότητα, τα τοπία δεν είναι ποτέ στατικά, παρά αποτελούν μία εξελικτική διαδικασία μέσω της οποίας διαμορφώνεται το κοινωνικό πλαίσιο της καθε εποχής.

Η χρήση των σπηλαίων σε διαφορετικές χρονολογικές περιόδους διαφοροποιείται ανάλογα με τη μορφολογία τους και πιο συγκεκριμένα σχετικά με το πόσο εύκολη ήταν η πρόσβαση σε αυτά καθώς και τις ανάγκες που διαμόρφωναν τις συνθήκες της κάθε εποχής. Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε σπήλαια του ελλαδικού χώρου μαρτυρούν την ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα μέσα σε αυτά καθώς και τη χρήση τους είτε ως χώρους περιστασιακής ή μόνιμης κατοικίας, ως αποθηκευτικούς χώρους, ως χώρους λατρείας, είτε ακόμη και ως χώρους ενταφιασμού των νεκρών.

Κατά την παλαιολιθική και νεολιθική εποχή η χρήση τους περιοριζόταν σε χώρους προστασίας και επιβίωσης του ανθρώπινου είδους, σύμφωνα με τα ευρήματα που έφερε στο φως η αρχαιολογική σκαπάνη και περιλαμβάνει κατάλοιπα τροφής, σκελετικά υπολείμματα ανθρώπων και ζώων, εργαλεία, κοσμήματα από οστά κ.α. Αργότερα, όταν ο άνθρωπος οργάνωσε την κατοικία του σε εύφορες κοιλάδες και όχθες ποταμών, απέδωσε ιερότητα στα σπήλαια και τα χρησιμοποίησε ως λατρευτικούς τόπους όπως μαρτυρούν, για παράδειγμα, τα έργα μινωικής τέχνης που βρέθηκαν σε σπήλαια της Κρήτης και συνδέονται με οργανωμένες θρησκευτικές τελετές και μύθους της εποχής.

Την Εποχή του Χαλκού αναδεικνύεται επίσης η χρήση των σπηλαίων για τις ανάγκες της θρησκευτικής λατρείας καθώς και των βιοτεχνικών δραστηριοτήτων κτηνοτροφικών πληθυσμών. Τέλος η αρχαιολογική έρευνα φέρνει στο φως ευρήματα, τα οποία μαρτυρούν τη χρήση κάποιων σπηλαίων ως οργανωμένα καταφύγια σε συνθήκες κινδύνου, όπως αποτελούν οι διωγμοί κατά τους ιστορικούς κυρίως χρόνους.

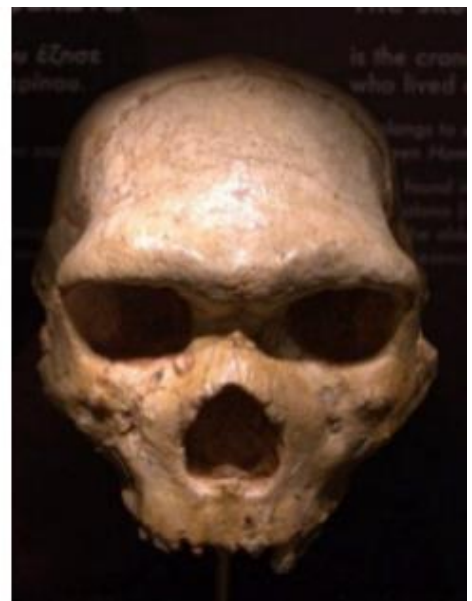


Εικόνα 1.3: Κεραμικά σκεύη που χρησιμοποιούσαν οι ένοικοι του σπηλαίου Αλεπότρυπα Διρού πριν από 5000 χρόνια

Οι συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό των σπηλαίων τα καθιστούν τα πλέον κατάλληλα για την απολίθωση και διατήρηση των απολιθωμάτων. Κατά συνέπεια έχουν βρεθεί στα ελληνικά σπήλαια οστά ζώων που ανήκαν σε πάνθηρες, βίσωνες, ελέφαντες κ.α. τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης των παλαιοντολόγων και ενισχύουν την έρευνα σχετικά με την ύπαρξη ζωντανών οργανισμών και την εξέλιξή τους μέσα στο πέρασμα των χρόνων.



Εικόνα 1.4: Εκμαγείο του απολιθωμένου κρανίου του Αρχανθρώπου όπως βρέθηκε, κολλημένο στα πετρώματα, στο σπήλαιο



Εικόνα 1.5: Το απολιθωμένο κρανίο του Αρχανθρώπου

Τα σπήλαια αποτελούν σημαντικά μνημεία της φύσης και αξιόλογο κομμάτι της πολιτιστικής

κληρονομιάς της Ελλάδας για αυτό και η μέριμνα για τον εντοπισμό, την ανάδειξη και προστασία αυτών και των παλιοντολογικών καταλοίπων, για τα οποία υπάρχουν ενδείξεις ότι συνδέονται με την ανθρώπινη ύπαρξη, ανήκει στο Υπουργείο Πολιτισμού και στην πλέον αρμόδια Εφορεία Παλαιοανθρωπολογίας-Σπηλαιολογίας.

1.3 Γεωμετρική Τεκμηρίωση Σπηλαίων

Η γεωμετρική τεκμηρίωση ενός σπηλαίου αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής δεδομένων, επεξεργασίας, απόδοσης, και καταχώρησης στοιχείων για τον προσδιορισμό της θέσης του και της πραγματικής μορφής του στο χώρο των τριών διαστάσεων σε μια χρονική στιγμή, του σχήματος και του μεγέθους αυτού. Με τον τρόπο αυτό ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να αντιληφθεί την εξέλιξη του μνημείου, το οποίο συνεχώς διαμορφώνεται μέσα στο χρόνο, και κατά συνέπεια να προάγει την επιστημονική έρευνα. Η δημιουργία λοιπόν αξιόπιστου και λεπτομερούς υποβάθρου θεωρείται βασική διαδικασία στη συστηματική μελέτη ενός σπηλαίου καθώς αυτό αποτελεί εργαλείο στα χέρια των επιστημόνων όλων των γνωστικών αντικειμένων που καταπιάνονται με τη μελέτη του μνημείου (Γεωργόπουλος, 2008).

Οι μέθοδοι αποτύπωσης ενός σπηλαίου περιλαμβάνουν τόσο κλασικές πρακτικές όσο και χρήση τεχνολογιών αιχμής με αποκορύφωμα τη συμβολή και άλλων επιστημονικών πεδίων όπως είναι αυτό της όρασης υπολογιστών, όπου με χρήση προηγμένων τεχνολογικών συστημάτων και αλγορίθμων η αποτύπωση ακόμα και ενός τόσο ιδιαίτερου, ως προς την πολυπλοκότητα, περιβάλλοντος όπως είναι αυτό ενός σπηλαίου, να απλουστεύεται σε μεγάλο βαθμό. Οι κλασικές και σύγχρονες μέθοδοι απόδοσης του χώρου ενός σπηλαίου περιγράφονται ως εξής:

- Εμπειρική μέθοδος χαρτογράφησης με χρήση απλών οργάνων (μετροταινία ή αποστασιόμετρο, πυξίδα κ.α.) η οποία όμως, παρά το χαμηλό κόστος, μειονεκτεί στην αποτύπωση ενός πολυσύνθετου μνημείου καθώς επιφέρει μεγάλα σφάλματα στον προσδιορισμό των συντεταγμένων, με συνέπεια οι κατόψεις του σπηλαίου να είναι περιορισμένης ακρίβειας.
- Η τοπογραφική μέθοδος αξιοποιεί εξειδικευμένα όργανα ακριβείας (π.χ. γεωδαιτικός σταθμός), τα οποία μετρούν οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες καθώς και κεκλιμένες αποστάσεις. Πρόκειται για αξιόπιστη μέθοδο επιτυγχάνοντας αποτυπώσεις με υψηλή ακρίβεια, χωρίς να απαιτείται πολύς χρόνος εκτός πεδίου κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Στα αρνητικά της μεθόδου αναφέρεται η χρονοβόρα διαδικασία λήψης μετρήσεων στο πεδίο χωρίς ωστόσο να παραβλέπεται το γεγονός ότι αποτελεί τη μοναδική κλασική μέθοδο που προτείνεται ακόμα και για περιβάλλοντα μεγάλης πολυπλοκότητας, παράγοντας σχέδια υψηλής ακρίβειας ακόμα και σε κλίμακες της τάξης 1:50.
- Η φωτογραμμετρική μέθοδος αποτύπωσης δίνει τη δυνατότητα απόδοσης πολύπλοκων αντικειμένων όταν υπάρχει πληθώρα λεπτομερειών (π.χ. πλούσιος λιθωματικός διάκοσμος) ενώ, αν συνδιαστεί με τοπογραφικές μεθόδους αποτύπωσης, παράγει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και πληρότητας. Ουσιαστικά η εν λόγω μέθοδος ενδείκνυται για την ταχύτητα και την ευκολία απόδοσης του συνόλου του αντικειμένου ως ενιαίο μοντέλο. Η φωτογραμμετρική απόδοση του χώρου, ωστόσο, απαιτεί τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων αφού η γεωμετρία των αντικειμένων προκύπτει εμμέσως, από μετρήσεις πάνω σε εικόνες.
- Η σάρωση με τρισδιάστατους σαρωτές laser αποτελεί μεθοδολογία αιχμής στην αποτύπωση ενός τόσο ιδιαίτερου περιβάλλοντος όσο είναι αυτό του σπηλαίου. Η μέθοδος περιλαμβάνει όργανα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία laser καταγράφοντας νέφος σημείων, το οποίο αντιπροσωπεύει την καθολική επιφάνεια του σπηλαίου σε τρεις διαστάσεις. Ωστόσο, συγκριτικά με τη φωτογραμμετρική μέθοδο, ο όγκος των δεδομένων είναι συχνά μεγαλύτερος στην

περίπτωση της σάρωσης του χώρου με σαρωτή laser ενώ η πληρότητα κάλυψης όλου του αντικειμένου είναι περιορισμένη.

Συμπερασματικά, οι παραδοσιακές μέθοδοι αποτύπωσης ενός σπηλαίου θεωρούνται χρονοβόρες και οικονομικά ασύμφωρες. Στις τοπογραφικές μεθόδους είναι αδύνατο να αποτυπωθούν όλα τα σημεία ενός πολύπλοκου αναγλύφου ενώ στη φωτογραμμετρία, αν και η καταγραφή του χώρου είναι πιο εύκολη, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων προς επεξεργασία, συχνά αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για κάποιον που δεν διαθέτει τα απαραίτητα μέσα.

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις στον τομέα της έρευνας των σπηλαίων σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου χώρου, που αυξάνουν το βαθμό δυσκολίας σε οποιαδήποτε εργασία καλείται κάποιος να διενεργήσει μέσα σε αυτά, οδήγησαν τους ειδικούς στην ανεύρεση μεθόδων που καθιστούν πλέον την χαρτογράφηση τόσο πολύπλοκων περιβάλλοντων μία απλουστευμένη διαδικασία. Μία τέτοια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοσθεί μέσα σε ένα σπήλαιο, όπου απαιτείται η ανάβαση ή κατάβαση με σχοινιά ή ακόμα και η διέλευση μέσα από στενά περάσματα και η οποία έχει φέρει επανάσταση στον τομέα της σπηλαιολογίας περιλαμβάνει χρήση του αλγορίθμου SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), τεχνική σύμφωνα με την οποία σύστημα με τους κατάλληλους αισθητήρες περιηγείται στο χώρο, δημιουργώντας σε πραγματικό χρόνο τον χάρτη αυτού ενώ ταυτόχρονα γίνεται και εντοπισμός της θέσης του κάθε χρονική στιγμή.

2. ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ & SFM

Φωτογραμμετρία είναι η επιστήμη που μελετά τεχνικές που αποσκοπούν στην απόδοση της μορφολογίας αντικειμένων του τρισδιάστατου χώρου από μετρήσεις σε εικόνες με όσο το δυνατό πιο πιστό τρόπο (Πέτσα, 2000).

Η φωτογραμμετρική αποτύπωση περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια τα οποία συνοπτικά αναφέρονται α) στην απόκτηση δεδομένων μέσω κατάλληλων διατάξεων που καλούνται αισθητήρες και απεικονίζουν τον τρισδιάστατο χώρο, β) στη φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων η οποία καθορίζεται από τα τελικά προϊόντα και γ) στην απόκτηση των προϊόντων, τα οποία μπορεί να είναι δισδιάστατα και τρισδιάστατα διανυσματικά σχέδια, ορθοφωτογραφίες και ορθοφωτοχάρτες, καθώς και πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων με πραγματική υφή.

Οι στερεοφωτογραμμετρικές μέθοδοι βασίζονται στη βασική αρχή λειτουργίας της διοφθαλμικής όρασης, η οποία ορίζει ότι η διάσταση του βάθους γίνεται αντιληπτή από δύο σημεία, η απόσταση μεταξύ των οποίων είναι γνωστή. Ωστόσο η τρισδιάστατη άποψη των αντικειμένων μπορεί επίσης να γίνει αντιληπτή και από ένα μόνο σημείο παρατήρησης στην περίπτωση που είτε ο παρατηρητής είτε το προς αποτύπωση αντικείμενο κινείται. Η διαδικασία SfM αποτελεί φωτογραμμετρική τεχνική, η οποία βασίζεται τόσο στις αρχές της διοφθαλμικής (στερεοσκοπικής) όρασης όσο και στην αλλαγή της οπτικής ενός αντικειμένου όταν αυτό ή η κάμερα βρίσκεται σε κίνηση (μονοσκοπική παρατήρηση).

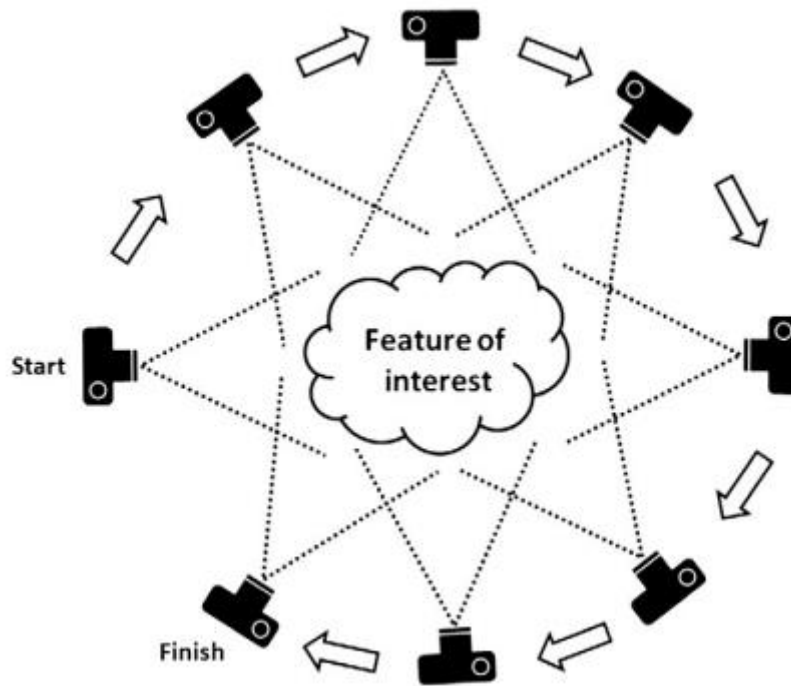
2.1 Structure from Motion

Η διαδικασία SfM (Structure from Motion) δεν είναι τόσο μια απλή τεχνική, όσο το αποτέλεσμα συνδυασμού μεθόδων/αλγορίθμων της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών, με σκοπό να αυτοματοποιηθεί η απόδοση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από μία σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων. Ουσιαστικά, η τεχνική SfM λειτουργεί σύμφωνα με τις βασικές αρχές της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας, που σημαίνει, σε γενικές γραμμές, ότι η τρισδιάστατη ανακατασκευή ενός μοντέλου στηρίζεται στη δημιουργία στερεοζευγών από διαδοχικές εικόνες. Ωστόσο, διαφοροποιείται σε σχέση με την κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία σε τρία βασικά σημεία: (α) η αναγνώριση χαρακτηριστικών σημείων και η συνταύτιση των εικόνων γίνονται αυτόματα με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων ακόμα και αν οι εικόνες έχουν διαφορετική κλίμακα, προσανατολισμό ή οπτική ενός αντικειμένου, (β) η λειτουργία των αλγορίθμων δεν απαιτεί απαραίτητα τη γνώση της θέσης της κάμερας ή την ύπαρξη φωτοσταθερών και (γ) η βαθμονόμηση της μηχανής γίνεται αυτόματα κατά τη διάρκεια εφαρμογής της διαδικασίας SfM από τους αντίστοιχους αλγορίθμους. Ειδικότερα, ο εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός εκτελούνται αυτόματα με τη μέθοδο δέσμης.

Η μέθοδος δέσμης επιδιώκει να εντάξει δύο ή περισσότερες δέσμες εικόνων απευθείας σε ενιαίο σύστημα αφού λάβει υπόψη τα κοινά τους σημεία. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιείται ταυτόχρονος προσανατολισμός των εικόνων μεταξύ τους αλλά και ως προς το σύστημα.

Η έννοια του στερεοζεύγους αναφέρεται σε δύο φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία αλλά παρουσιάζουν επικάλυψη. Το ποσοστό της επικάλυψης επιλέγεται συνήθως στο 60% κατά μήκος και 35% κατά πλάτος, με αποτέλεσμα να μπορεί να αποδοθεί η κοινή επικαλυπτόμενη περιοχή τρισδιάστατα.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που η συνεχής εξέλιξη των αλγορίθμων σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα πληθώρας λογισμικών καθιστούν την τρισδιάστατη ανακατασκευή ενός αντικειμένου να φαίνεται μια απλή και εύκολη διαδικασία, η γνώση των βασικών αρχών που διέπουν την εν λόγω διαδικασία είναι απαραίτητη, προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα να διαθέτει υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και οπτική πιστότητα, εξασφαλίζοντας την αποφυγή φαινομένων αστοχίας ή παρερμηνείας σε περιπτώσεις που αυτό χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω επιστημονική έρευνα.

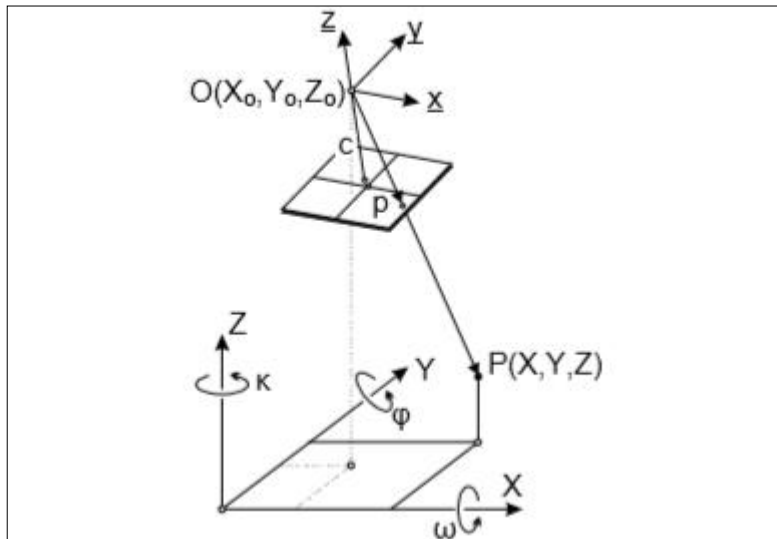


Εικόνα 2.1: Η τεχνική SfM χρησιμοποιεί μια σειρά επικαλυπτόμενων εικόνων για την τρισδιάστατη αναπαράσταση ενός μοντέλου (Westoby et al, 2012).

Στην πιο απλή της μορφή η διαδικασία SfM περιλαμβάνει δύο εικόνες από τις οποίες ανακατασκευάζεται το 3D μοντέλο του αντικειμένου. Αυτό διαφέρει από το πραγματικό αντικείμενο κατά έναν τρισδιάστατο μετασχηματισμό ομοιότητας με επτά βαθμούς ελευθερίας (τρεις στροφές, τρεις μεταθέσεις και μία κλίμακα) και εκφράζεται από την εξίσωση (Καρράς, 1998):

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{pmatrix}$$

Βασική εξίσωση της εν λόγω διαδικασίας αποτελεί η συνθήκη συγγραμμικότητας, η οποία περιγράφει μαθηματικά την ευθεία κάθε οπτικής ακτίνας στον χώρο.



Εικόνα 2.2: Η γεωμετρία της συνθήκης συγγραμμικότητας (Πέτσα, 2000)

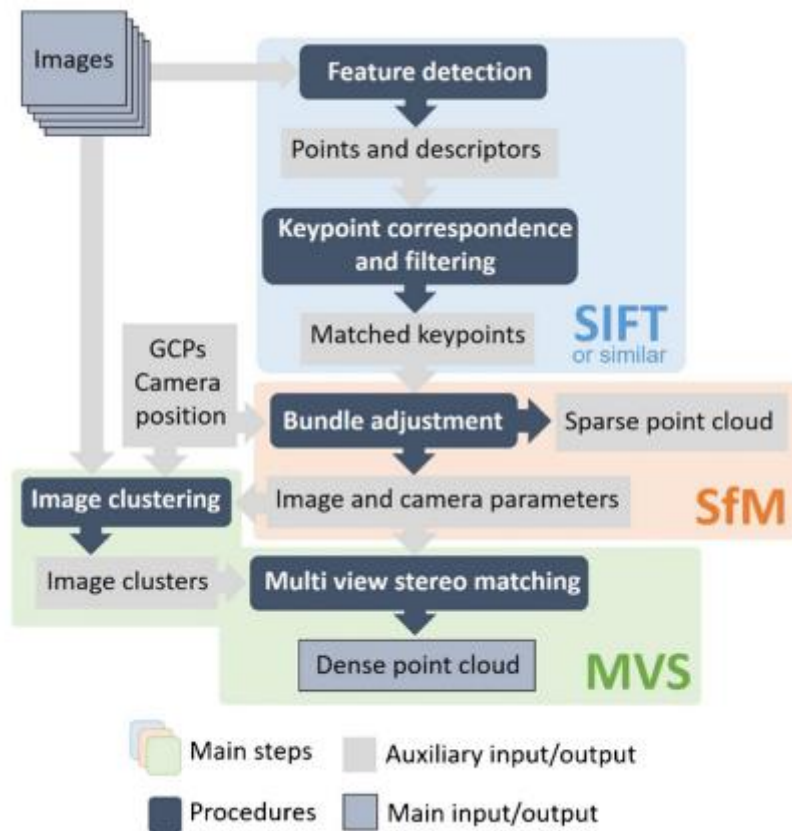
Σύμφωνα με τη συνθήκη συγγραμμικότητας το διάνυσμα που συνδέει το κέντρο προβολής της εικόνας με το σημείο στο χώρο καθώς και το διάνυσμα που συνδέει το κέντρο προβολής με την εικόνα του σημείου πρέπει να είναι συνευθειακά. Η μορφή της συνθήκης συγγραμμικότητας είναι η εξής:

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

όπου \mathbf{R} είναι ο πίνακας στροφής της εικόνας και $1/k$ η σημειακή κλίμακα.

Η ανακατασκευή ενός αντικειμένου από εικόνες μέσω της κλασικής φωτογραμμετρικής διαδικασίας θεωρείτο μέχρι πρότινος δύσκολη και επίπονη κυρίως λόγω της ανάγκης χειρωνακτικής παρέμβασης ενός χειριστή στα επιμέρους στάδια. Στις μέρες μας, η διαδικασία αυτή έχει απλοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό με τη συνδρομή της επιστήμης της Όρασης Υπολογιστών η οποία έχει αυτοματοποιήσει πολλά από τα στάδια υλοποίησης (διαδικασία SfM) με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων.

Ενώ η τεχνική SfM στην ουσία αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο βήμα της ροής εργασιών που υπολογίζει τον εξωτερικό προσανατολισμό των εικόνων και τη βαθμονόμηση της μηχανής αποδίδοντας ένα αραιό νέφος σημείων (sparse point cloud) του αντικειμένου, στον όρο συμπεριλαμβάνεται και το στάδιο απόδοσης πυκνού νέφους σημείων (dense point cloud) μέσω κατάλληλων αλγορίθμων όπως ο MVS (Multi-View Stereo).



Εικόνα 2.3: Ροή εργασιών της SfM-MVS διαδικασίας (Iglhaut, J. et al, 2019)

Σε κάθε περίπτωση όμως η διαδικασία Structure from Motion περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια υλοποίησης:

- **Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων.** Στο στάδιο αυτό γίνεται η συνταύτιση σημείων (matching) που σημαίνει ότι ανιχνεύονται κοινά χαρακτηριστικά σημεία (ομόλογα σημεία) μεταξύ των εικόνων. Αρχικά εντοπίζονται χαρακτηριστικά σημεία σε όλες τις εικόνες, ενώ αποδίδονται κατάλληλοι περιγραφείς της εκάστοτε περιοχής γύρω από κάθε σημείο. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος RANSAC ο οποίος αποτελεί μια επαναληπτική στατιστική μέθοδο για την εκτίμηση των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει το σύνολο των παρατηρούμενων δεδομένων (μετρήσεις ομόλογων σημείων), προκειμένου να εξαιρεθούν δεδομένα που αποκλίνουν και δεν θα πρέπει να έχουν καμία επίδραση στις τιμές των εκτιμήσεων. Εν κατακλείδι, ο αλγόριθμος κάνει καταμερισμό αληθών (inliers) και αποκλινοσών (outliers) τιμών, μέσω υπολογισμού του μαθηματικού μοντέλου από τις αληθείς τιμές δεδομένων. Αντίστοιχα και για την ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι ο SIFT και ο SURF.

- **Προσανατολισμός εικόνων.** Με βάση τα δεδομένα που εξήχθησαν από την συνταύτιση των σημείων, και υπό το πρίσμα ότι έχει προκύψει ικανοποιητικός αριθμός ομόλογων σημείων, εφαρμόζεται η μέθοδος δέσμης προκειμένου προσδιοριστούν οι παράμετροι του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων στον τρισδιάστατο χώρο και να υπολογιστεί ένα αραιό νέφος σημείων. Η μέθοδος δέσμης επιλύεται με αρχικές τιμές που αποκτώνται από τον διαδοχικό σχετικό προσανατολισμό των εικόνων ανά ζεύγος μέσω εφαρμογής γραμμικών σχέσεων από την Όραση Υπολογιστών.

- Στο σημείο αυτό της διαδικασίας έχει γίνει αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού και παράλληλα έχουν προσανατολιστεί οι εικόνες στον χώρο. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη φωτοσταθερών, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την απόδοση του τρισδιάστατου μοντέλου σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς.

- **Γεωαναφορά νέφους σημείων.** Ενώ η απόδοση του τελικού μοντέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη λήψη φωτοσταθερών, όπως προαναφέρθηκε, ωστόσο η χρήση τους θα γεωαναφέρει το 3D μοντέλο στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς και θα του αποδώσει την πραγματική κλίμακα. Στο σημείο αυτό γίνεται ο απόλυτος προσανατολισμός του μοντέλου με έναν 3D μετασχηματισμό ομοιότητας από το τρισδιάστατο σύστημα του μοντέλου σε ένα γεωδαιτικό σύστημα.

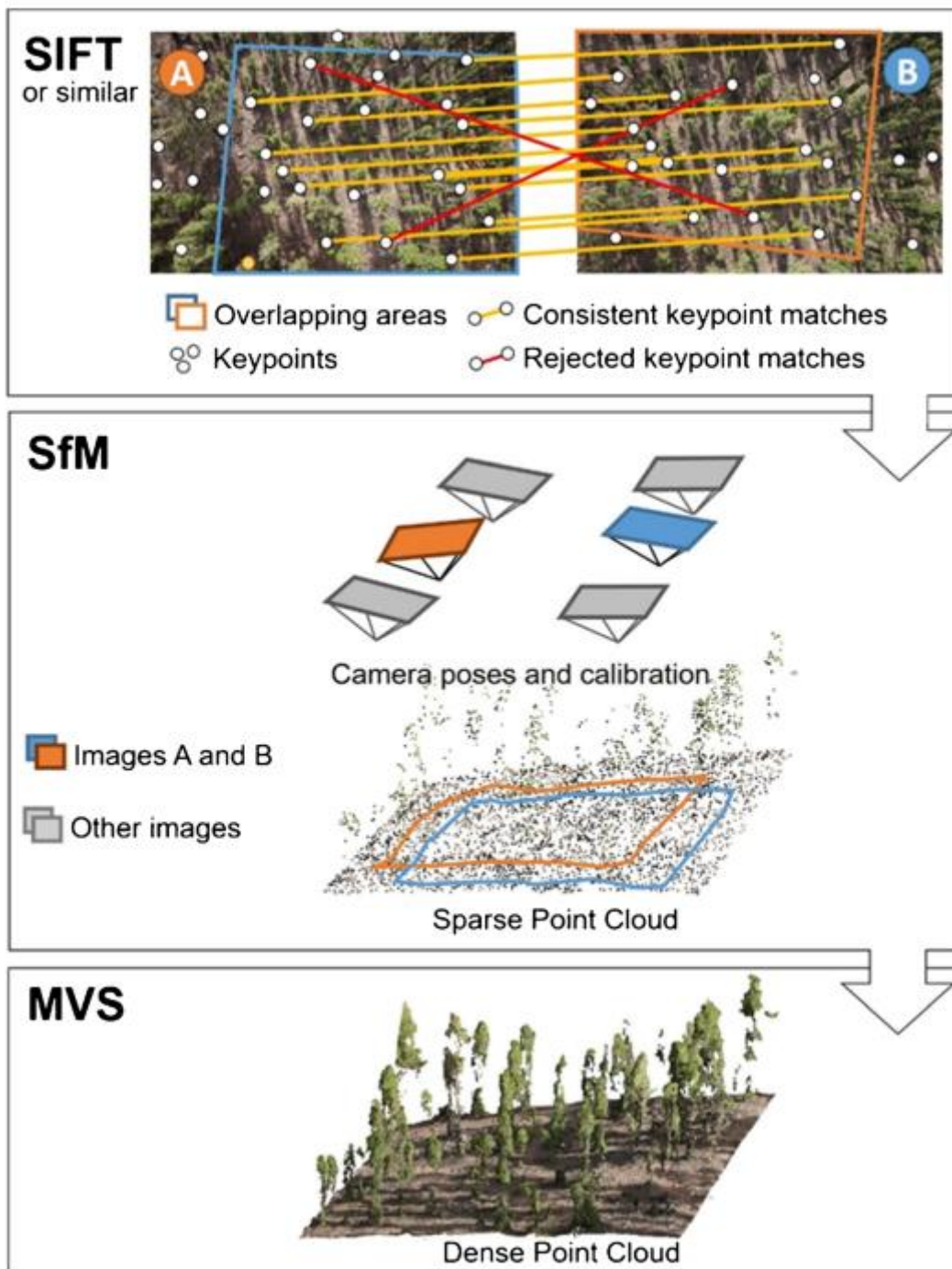
- **Πυκνή συνταύτιση σημείων.** Η διαδικασία αφορά στη δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (dense point cloud) με σκοπό την καλύτερη απόδοση του τρισδιάστατου μοντέλου. Ένας συνήθης αλγόριθμος εισάγει μια νέα εικόνα κάθε φορά στη διαδικασία ανακατασκευής (incremental reconstruction). Πιο αναλυτικά, αφού επιλεγεί ένα αρχικό ζεύγος εικόνων, το οποίο θα έχει μεγάλο αριθμό ομολογιών, γίνεται υπολογισμός των προβολικών πινάκων των δύο φωτομηχανών με χρήση των ομολογιών σημείων. Στη συνέχεια διενεργείται τριγωνισμός, διαδικασία η οποία αφορά στον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των ομολογιών σημείων. Με την επιλογή μιας επόμενης εικόνας με μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών σημείων, των οποίων οι 3D συντεταγμένες έχουν υπολογισθεί, υπολογίζεται ο προβολικός πίνακας της μηχανής της καινούριας εικόνας από τις 3D συντεταγμένες των σημείων που είναι ήδη γνωστές και ακολουθεί η διαδικασία του τριγωνισμού για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των ομολογιών σημείων που δεν έχουν υπολογισθεί. Τελευταίο στάδιο της πυκνής συνταύτισης σημείων αποτελεί η συνόρθωση δέσμης, ενώ το σύνολο των βημάτων της διαδικασίας όπως περιγράφηκε παραπάνω επαναλαμβάνεται για κάθε νέα εικόνα (Ιωαννίδης, 2016).

Η μέθοδος δέσμης αποτελεί τη σχετικά πιο πρόσφατη και περισσότερο διαδεδομένη διαδικασία συνόρθωσης και ορίζεται ως η διαδικασία, σύμφωνα με την οποία οι εικόνες προσανατολίζονται ταυτόχρονα και μεταξύ τους και ως προς το γεωδαιτικό σύστημα. Προκειμένου να συμβεί αυτό, θα πρέπει να συνορθωθούν ταυτόχρονα οι εικονοσυντεταγμένες των φωτοσταθερών και των ομολογιών σημείων. Η μέθοδος δέσμης περιγράφεται από το μαθηματικό μοντέλο της συνθήκης συγγραμμικότητας (Πέτσα, 2000).

Ωστόσο προτού γίνει η διαδικασία MVS συμπίκνωσης των σημείων και για λόγους μείωσης του χρόνου υπολογισμού, πραγματοποιείται από το πρόγραμμα ομαδοποίηση των εικόνων ανάλογα με την τοποθεσία που βρίσκονται. Με αυτό τον τρόπο το πυκνό νέφος σημείων της κάθε ομάδας εικόνων υπολογίζεται ξεχωριστά, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία πολύ πιο αποτελεσματική.

- **Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου.** Στο στάδιο αυτό της διαδικασίας δημιουργείται η τρισδιάστατη επιφάνεια του τελικού μοντέλου (Mesh).

- **Απόδοση υφής.** Ενέργεια η οποία αναφέρεται στη δημιουργία υφής (texture) στο τελικό μοντέλο με φωτορεαλιστική απεικόνιση και που ουσιαστικά ολοκληρώνει τη διαδικασία του SfM.



Εικόνα 2.4: Τα τρία βασικά στάδια της SfM-MVS διαδικασίας (Iglhaut, J. et al, 2019)

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, τις τελευταίες δεκαετίες, έχει διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την ανακατασκευή και απόδοση του τρισδιάστατου χώρου μέσα από απλές εικόνες προσθέτοντας στο θεωρητικό υπόβαθρο της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας την ταχύτητα και ευκολία των υπολογισμών με αποτέλεσμα την υψηλής απόδοσης και πιστότητας μοντέλων. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση διαφορετικών αλγορίθμων οι οποίοι στοχεύουν αποκλειστικά σε προβλήματα Computer Vision.

Ένας αλγόριθμος αποτελεί ουσιαστικά μία συστηματική μέθοδο υπολογισμού σύμφωνα με την οποία μπορεί κάποιος να φτάσει σε ένα ζητούμενο αποτέλεσμα με μια ακολουθία πράξεων, ντετερμινιστικά καθορισμένη, που εκτελούνται σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην SfM διαδικασία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

→ Αλγόριθμοι εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλγόριθμοι που ανιχνεύουν χαρακτηριστικά σημεία σε μία εικόνα τα οποία δεν επηρεάζονται από μεταβολές στις συνθήκες φωτισμού, στην κλίμακα ή σε στροφή. Θεωρούνται ιδιαίτερα εύρωστοι αν και απαιτείται χρόνος για την εκτέλεσή τους και οι πιο χαρακτηριστικοί είναι ο SIFT και ο SURF.

→ Αλγόριθμοι εντοπισμού γωνιών. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι επιλέγουν ως σημεία σε μία εικόνα, εκείνα που ξεχωρίζουν σε σχέση με τα γειτονικά τους βάσει των κλίσεων της εικόνας. Οι πιο αντιπροσωπευτικοί του είδους είναι ο Harris, ο οποίος οφείλει την ευρωστία του στο γεγονός ότι δεν επηρεάζεται από την στροφή, την αλλαγή κλίμακας ή τον φωτισμό και ο Canny ο οποίος, αν και αναπτύχθηκε πριν από τέσσερις δεκαετίες, θεωρείται πρότυπος στην ανίχνευση ακμών και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στη λειτουργία δύο ιδιαίτερα εύρωστων αλγορίθμων για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων, με σκοπό να γίνουν κατανοητά όλα τα στάδια λειτουργίας τους. Η λογική είναι παρόμοια και για αντίστοιχους αλγόριθμους ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων και η περαιτέρω ανάλυσή τους αποτελεί αντικείμενο της επιστήμης των Υπολογιστών.

2.2 Ο αλγόριθμος SIFT

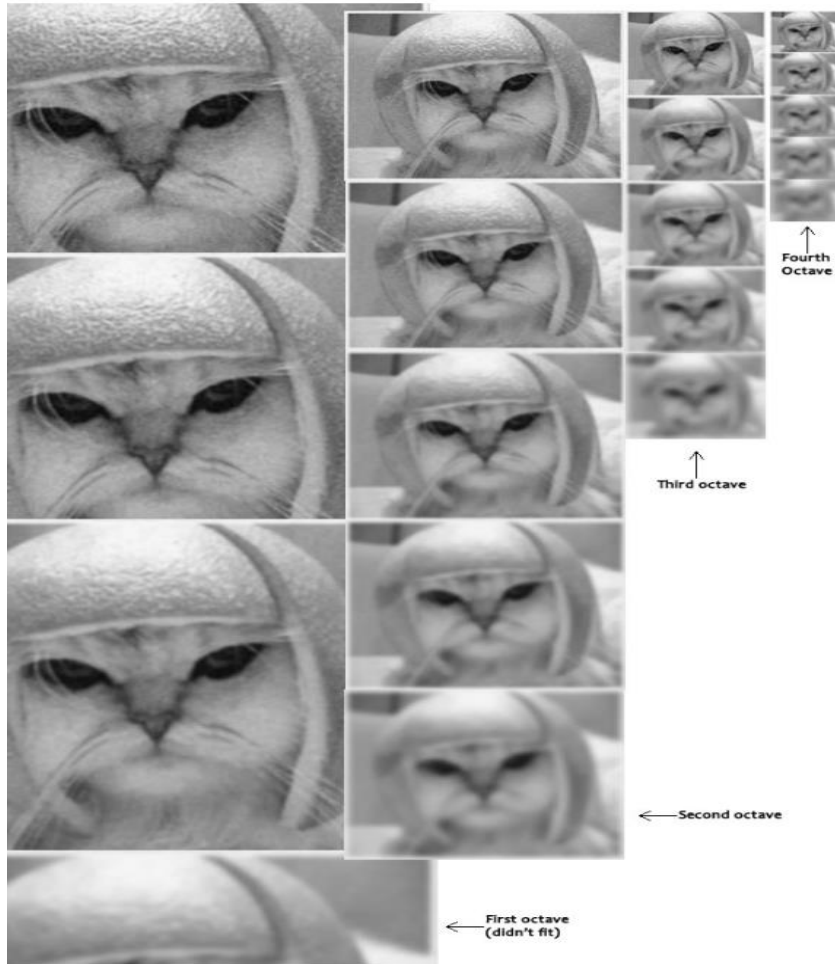
Ο πρώτος αλγόριθμος που μελετάται, είναι ο SIFT (Scale Invariant Feature Transform), κατά τον οποίο η εύρεση των χαρακτηριστικών σημείων μένει ανεπηρέαστη από τις συνθήκες φωτισμού της υπό μελέτη περιοχής, την πιθανή στροφή ή μετατόπιση του αντικειμένου ή ενδεχόμενη αλλαγή της κλίμακας αυτού. Τα τρία αυτά βασικά χαρακτηριστικά, δίνουν στον αλγόριθμο σοβαρό πλεονέκτημα λόγω εξαγωγής ικανοποιητικών αποτελεσμάτων όταν χρησιμοποιείται για αναγνώριση αντικειμένων στον πραγματικό κόσμο, διαδικασία ιδιαίτερα απαιτητική, κατά την οποία άλλοι αλγόριθμοι αποτυγχάνουν (Lowe, 2004).

Ο Sift διαθέτει έναν ανιχνευτή χαρακτηριστικών σημείων και έναν περιγραφέα (descriptor). Ο ανιχνευτής χαρακτηριστικών σημείων χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σημείων τα οποία φέρουν διακριτή πληροφορία χωρίς να επηρεάζεται από πιθανή αλλαγή φωτισμού, στροφή ή αλλαγή κλίμακας. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την γκαουσιανή κατανομή προκειμένου να μετασχηματίσει την εικόνα από τον χρωματικό χώρο στον χώρο κλίμακας (Lindeberg, 1994).

Ο περιγραφέας από την άλλη, ορίζει τον προσανατολισμό του κάθε σημείου ενδιαφέροντος, όπως αυτό έχει προκύψει από τον ανιχνευτή και πρόκειται για ένα διάνυσμα όπου το μέτρο και η διεύθυνσή του υπολογίζονται από πληροφορίες της γειτονιάς του εκάστοτε σημείου ενδιαφέροντος.

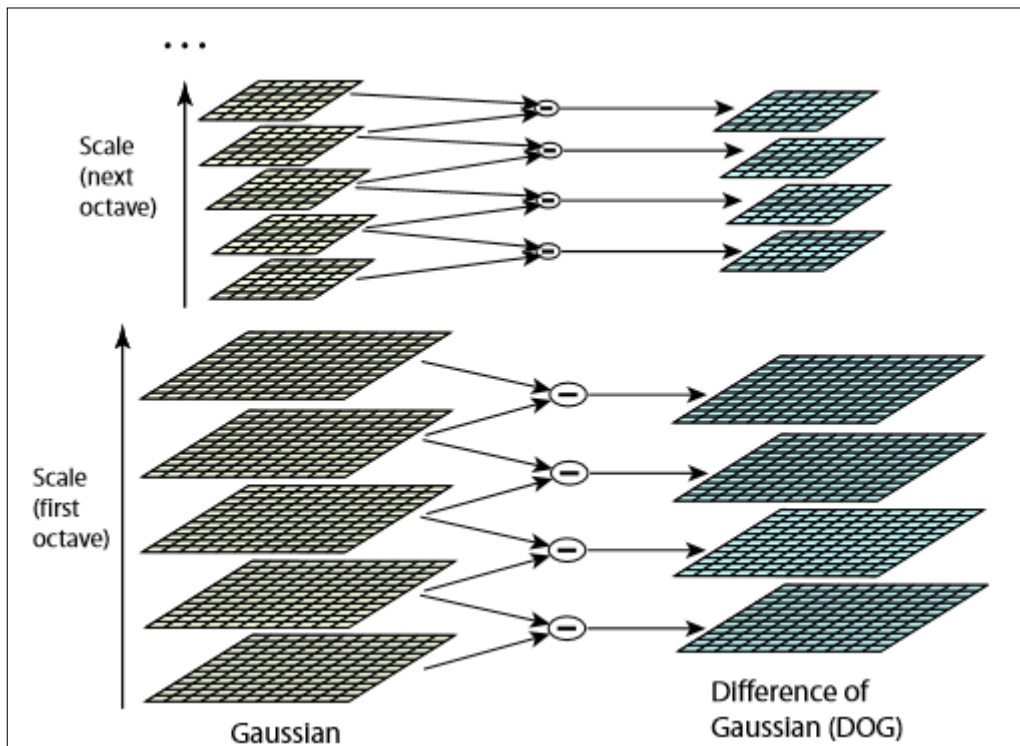
Πιο αναλυτικά ο αλγόριθμος κατά την εφαρμογή του ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

→ Ανάλογα με το μέγεθος της εικόνας, δημιουργούνται εσωτερικά αντίγραφα αυτής σε ομάδες, ενώ κάθε ομάδα είναι σε μέγεθος το μισό της προηγούμενης της. Προκειμένου τα χαρακτηριστικά να είναι ανεπηρέαστα από την αλλαγή κλίμακας (scale invariance), σε κάθε μία από τις παραπάνω ομάδες εφαρμόζεται σταδιακά φίλτρο εξομάλυνσης Gauss.



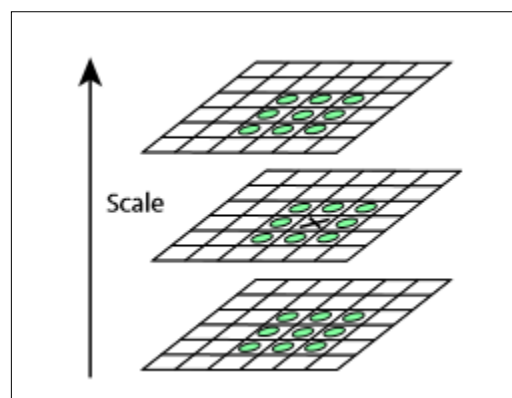
Εικόνα 2.5: Εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης Gauss (www.oreilly.com)

➔ Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι διαφορές των εικόνων που προέκυψαν κατά την παραπάνω διαδικασία ανά δύο. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως αλγόριθμος DoG (Difference of Gaussians) και αποτελεί προσέγγιση του τελεστή LoG (Laplacian of Gaussian) κατά προσέγγιση (Lindeberg, 1994).



Εικόνα 2.6: Υπολογισμός του DoG για όλες τις κλίμακες (Lowe, 2004)

➔ Επόμενο βήμα της διαδικασίας αποτελεί ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων (key points), ο οποίος πραγματοποιείται με ανεύρεση μεγίστων και ελαχίστων στις εικόνες DoG (Difference of Gaussian). Σύμφωνα με την εικόνα 2.6, για κάθε pixel ελέγχονται τα οχτώ γειτονικά του καθώς και εννιά pixel τόσο από την προηγούμενη όσο και από την επόμενη εικόνα. Αν κατά τον έλεγχο αυτό διαπιστωθεί ότι το pixel έχει τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή της γειτονιάς του, τότε επιλέγεται ως χαρακτηριστικό σημείο (key point) (Lowe, 2004).

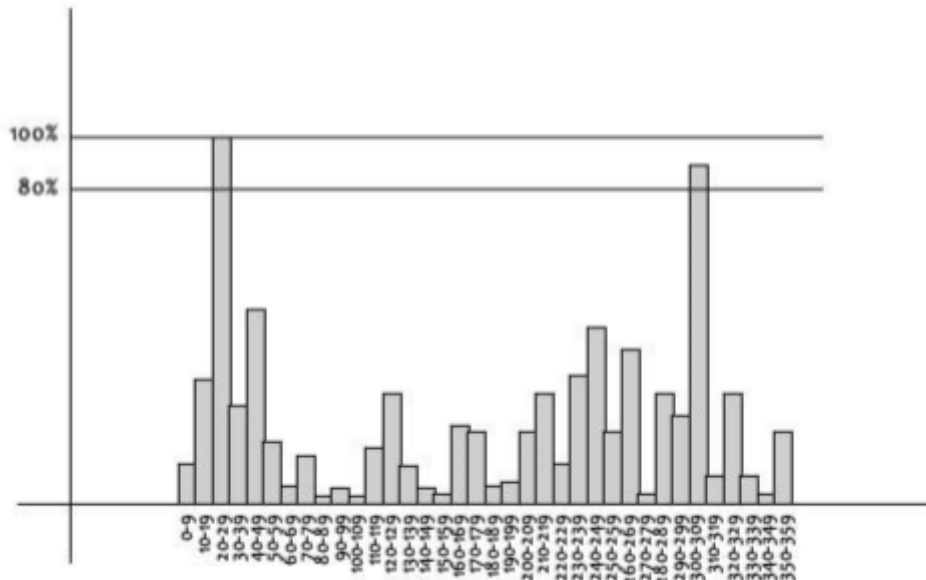


Εικόνα 2.7: Εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων

➔ Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των χαρακτηριστικών σημείων ούτως ώστε να προκύψει μια απλή και ακριβής περιγραφή εικόνας, γίνεται εντοπισμός των ακμών και εξαιρούνται τα key points που βρίσκονται σε αυτές αφού παρουσιάζουν χαμηλή μεταξύ τους αντίθεση. Αντίθετα, τα σημεία που βρίσκονται σε γωνίες παρουσιάζουν διαφορετικές διαβαθμίσεις εν συγκρίσει με τα γειτονικά τους pixel (Lowe, 2004).

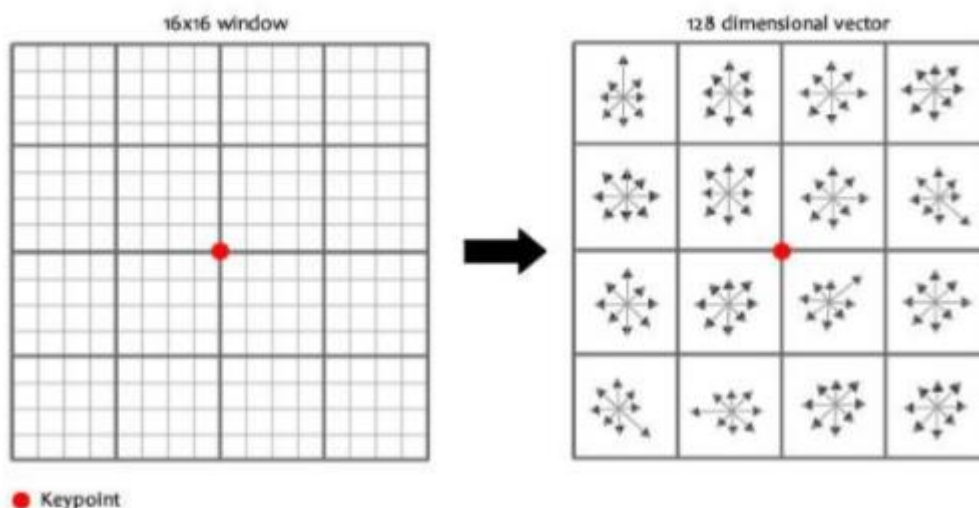
➔ Στη συνέχεια προσδιορίζεται η κατεύθυνση των χαρακτηριστικών σημείων, με τον

υπολογισμό των κλίσεων στην περιοχή γύρω από το key point. Οι κατευθύνσεις των κλίσεων απεικονίζονται σε ιστόγραμμα από 0° έως 360° με τη μεγαλύτερη κορυφή να δίνει και στο χαρακτηριστικό σημείο την κατεύθυνσή του. Εάν προκύψει και δεύτερη κορυφή με ποσοστό πάνω από 80% της πρώτης, τότε δημιουργείται και δεύτερο key point στο ίδιο σημείο αλλά με διαφορετική διεύθυνση (Lowe, 2004).



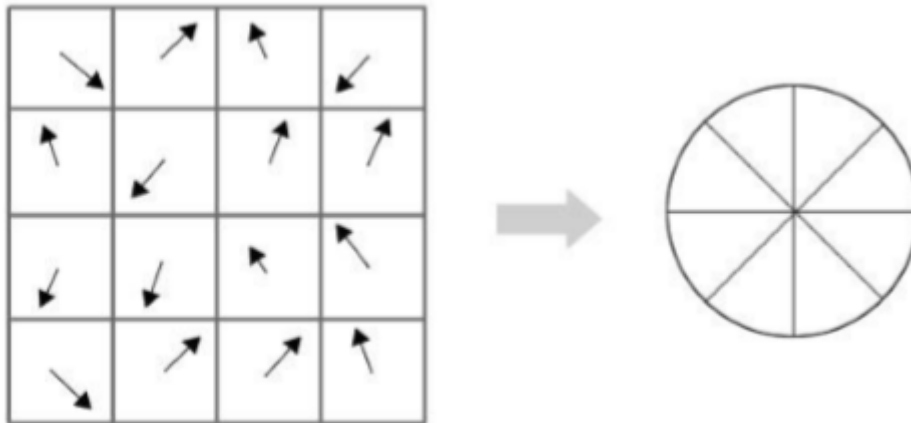
Εικόνα 2.8: Προσδιορισμός κατεύθυνσης χαρακτηριστικών σημείων (Δημητρίου, 2013)

➔ Στο σημείο αυτό ο περιγραφέας (descriptor) λειτουργεί έτσι ώστε το κάθε χαρακτηριστικό σημείο να διαφέρει από τα υπόλοιπα όταν περιγράφει ένα διαφορετικό χαρακτηριστικό (ως προς τη θέση, την κατεύθυνση και την πληροφορία της δοθείσας περιοχής) καθώς και να μοιάζει με άλλα σημεία όταν οι πληροφορίες ως προς τα παραπάνω χαρακτηριστικά συμπίπτουν. Προκειμένου να υπολογιστούν οι περιγραφείς, λαμβάνονται υπόψη οι κλίσεις της εικόνας γύρω από ένα χαρακτηριστικό σημείο σε μια περιοχή 16x16 pixel. Η περιοχή αυτή χωρίζεται σε 16 υποπεριοχές διαστάσεων 4x4 pixel η κάθε μία.



Εικόνα 2.9: Υπολογισμός των διαβαθμίσεων μιας περιοχής γύρω από το key point (Δημητρίου, 2013)

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός του μέτρου και της διεύθυνσης των κλίσεων για κάθε ρixel και οι τιμές απεικονίζονται σε ιστόγραμμα οχτώ θέσεων ανάλογα με τη γωνία της κατεύθυνσης σε μοίρες. Το ύψος των στηλών του ιστογράμματος προκύπτει από το μέτρο της κλίσης, το οποίο συμμετέχει σε ποσοστό ανάλογο με την απόσταση του ρixel από το key point (όσο μεγαλύτερη η απόσταση από το χαρακτηριστικό σημείο τόσο μικρότερο ρόλο παίζει η διαβάθμιση στο αποτέλεσμα του ιστογράμματος).



Εικόνα 2.10: Υπολογισμός μέτρου και διεύθυνσης των διαβαθμίσεων (Δημητρίου, 2013)

Τέλος διενεργείται αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων ανάμεσα σε δύο εικόνες με εφαρμογή της μεθόδου σύγκρισης των χαρακτηριστικών διανυσμάτων μιας εικόνας με τα αντίστοιχα της επόμενης.

2.3 Ο αλγόριθμος SURF

Ένας εξίσου αποδοτικός και γρήγορος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται ευρέως σε διαδικασίες αναγνώρισης χαρακτηριστικών σημείων σε εικόνες είναι ο SURF (Speeded Up Robust Features) (Bay, 2006). Πρόκειται για αλγόριθμο που ενώ έχει κοινά χαρακτηριστικά με τον SIFT, ξεχωρίζει για την ταχύτητα εκτέλεσης και υλοποιείται σε τρία στάδια:

- ➔ Αρχικά γίνεται εντοπισμός των σημείων ενδιαφέροντος σε μία εικόνα. Η διαδικασία βασίζεται στη λογική της αναπαράστασης της εικόνας στον χώρο κλίμακας (scale-space) όπως περιγράφηκε στον αλγόριθμο SIFT, δηλαδή τα σημεία δεν παρουσιάζουν μεταβολές σε πιθανή αλλαγή φωτισμού, στροφής ή μεταβολή της κλίμακας.
- ➔ Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα σημεία ενδιαφέροντος στην εικόνα, από τα χαρακτηριστικά διανύσματα με τα οποία αναπαρίσταται η γειτονιά κάθε σημείου ενδιαφέροντος.
- ➔ Τέλος πραγματοποιείται ταύτιση των κοινών χαρακτηριστικών με σύγκριση των χαρακτηριστικών διανυσμάτων μιας εικόνας με τα αντίστοιχα της επόμενης.

Ο περιγραφέας που χρησιμοποιεί ο SURF κάνει χρήση του Γρήγορου Εσσιανού Πίνακα (Fast

Hessian Matrix), ο οποίος βασίζεται στους υπολογισμούς του Εσσιανού πίνακα για κάθε σημείο στην εικόνα. Από την ορίζουσα του Εσσιανού πίνακα, που λειτουργεί ως μέτρο της τοπικής αλλαγής γύρω από αυτά, εξάγονται στον χώρο κλίμακας τα σημεία όπου αυτή είναι μέγιστη (Bay, 2006).

Προκειμένου να υπολογιστεί ο προσανατολισμός του σημείου ενδιαφέροντος, γίνεται σύγκριση των άθροισμάτων των κλίσεων που περιγράφονται από παράθυρα με το μεγαλύτερο άθροισμα να δίνει τον εν λόγω προσανατολισμό. Στη συνέχεια δημιουργείται μια τετραγωνική περιοχή γύρω από την περιοχή των σημείων ενδιαφέροντος, η οποία ευθυγραμμίζεται με τον προσανατολισμό που υπολογίσθηκε παραπάνω.

3. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος SLAM είναι ο εντοπισμός της θέσης του κινούμενου ρομπότ κάθε χρονική στιγμή σε άγνωστο κατά βάση περιβάλλον, όπως είναι αυτό του σπηλαίου όπου πρόκειται για υπόγειο σχηματισμό, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα κάλυψης από δορυφόρους. Η δυσκολία αυτή σε συνδυασμό με τον ελλιπή φωτισμό και γενικότερα την περιορισμένη παροχή ενέργειας καθιστούν επιτακτική την ανάγκη επιλογής κατάλληλων αισθητήρων με σκοπό μια αποτελεσματική αλλά και οικονομική λύση στο πρόβλημα του ταυτόχρονου εντοπισμού και της χαρτογράφησης.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης πολλαπλών συστημάτων (εναέριων, εδάφους ή χειρός) τα οποία μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά εντός σπηλαίου ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθούν (ανασκαφή, εξερεύνηση, σπηλαιοδιάσωση κλπ). Τέτοια συστήματα διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες προσέγγισης και απόστασης, μπαταρίες παροχής ενέργειας, κωδικοποιητές κίνησης (encoders) και αδρανειακή μονάδα μέτρησης (Inertial Measurement Unit).

3.1 Αισθητήρες απόστασης

Οι εν λόγω αισθητήρες υπολογίζουν την απόσταση μεταξύ των ιδίων και ενός αντικειμένου (στόχος) με σκοπό την αποφυγή της σύγκρουσης του ρομπότ με ένα κοντινό εμπόδιο. Ένας προηγμένος αισθητήρας προσέγγισης που χρησιμοποιείται στη χαρτογράφηση σπηλαίου έχει τη δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων σε κατάλληλο λογισμικό όπου γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων και σχεδιάζεται ο χάρτης.

Οι αισθητήρες προσέγγισης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τεχνολογίας που χρησιμοποιούν κατά τη λειτουργία τους:

- Αισθητήρες υπερήχων οι οποίοι λειτουργούν εκπέμποντας ηχητικά κύματα που ανακλούν σε μία επιφάνεια και επιστρέφουν στον αισθητήρα. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του ήχου στον αέρα και το χρόνο μετάδοσης του κύματος, υπολογίζεται η απόσταση του κινούμενου αντικειμένου από το εμπόδιο.
- Αισθητήρες υπέρυθρων οι οποίοι εκπέμπουν ακτίνες υπέρυθρου φωτός από ένα LED. Το φως ανακλάται στο εμπόδιο και ανιχνεύεται από μια φωτοδίοδο. Μέσω μιας διαδικασίας γνωστή ως τριγωνισμός, υπολογίζεται η απόσταση από το εμπόδιο από τη γωνία της ανακλώμενης ακτίνας.
- Χωρητικοί αισθητήρες οι οποίοι μετράνε την απόσταση ενός ηλεκτρικά αγώγιμου αντικειμένου.

3.2 Κωδικοποιητές κίνησης

Αναφέρεται σε ηλεκτρομηχανική μικροσυσκευή, η οποία μετατρέπει τη γωνιακή ταχύτητα είτε σε αναλογικό σήμα είτε σε κώδικα προκειμένου να καταγραφεί η κίνηση ενός τροχού. Πρόκειται για αισθητήρα ο οποίος χρησιμοποιείται σε ρομποτικά συστήματα που κινούνται πάνω σε τροχούς.

3.3 Αδρανειακό Σύστημα Πλοήγησης

Πρόκειται για αυτόνομες συσκευές πλοήγησης, οι οποίες χρησιμοποιούν μια σειρά μετρητικών διατάξεων από αισθητήρες όπως είναι τα γυροσκοπία και τα επιταχυνσιόμετρα για να προσδιορίσουν τη θέση, την ταχύτητα και την κινηματική συμπεριφορά ενός κινητού σώματος κάνοντας χρήση των αρχών της αδράνειας και της Νευτώνειας μηχανικής.

Το γυροσκοπίο, το οποίο λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της αδράνειας και της στροφορμής, διατηρεί σταθερό τον προσανατολισμό του έχοντας καθορισμένη την αρχική του διεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι μετρώντας τη γωνιακή περιστροφή και προσδιορίζοντας τις διορθώσεις που πρέπει να επιβληθούν στους φορείς τους, οι τελευταίοι διατηρούν τη διεύθυνσή τους.

Το επιταχυνσιόμετρο βασίζει τη λειτουργία του στη χρήση μάζας, η οποία βρίσκεται στερεωμένη στο εσωτερικό του ανάμεσα σε δύο ελατήρια. Η κίνηση του φορέα προκαλεί τη δημιουργία δυνάμεων που μετατοπίζουν τη μάζα προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση συσπειρώνοντας ή επιμηκύνοντας ανάλογα τα ελατήρια. Έτσι παρέχει τη δυνατότητα ενός είδους τυφλής πλοήγησης από σημείο σε σημείο (dead reckoning) προσδιορίζοντας τη θέση του φορέα στο αδρανειακό σύστημα που υλοποιείται με τη βοήθεια των γυροσκοπίων.

3.4 Κάμερες

Κρίσιμος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του τελικού μοντέλου και παράλληλα αποτελεί βασικό εργαλείο κατά την εφαρμογή της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας, είναι η επιλογή της κατάλληλης φωτογραφικής μηχανής. Έτσι και η διαδικασία SfM, κατά την οποία πραγματοποιείται αυτόματα η ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων και η συνταύτιση εικόνων μέσω αλγορίθμων της Όρασης Υπολογιστών, εξαρτάται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από την ποιότητα των εικόνων που χρησιμοποιούνται. Κατά συνέπεια, οι αισθητήρες που επιλέγονται οφείλουν να πληρούν τις κατάλληλες προδιαγραφές και η λήψη των φωτογραφιών πρέπει να σχεδιάζεται προσεκτικά ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν κατά περίπτωση.

Πιο συγκεκριμένα, οι συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη φωτογράφιση σχετίζονται με τις συνθήκες φωτισμού του προς μελέτη περιβάλλοντος, με την πλατφόρμα που θα χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε εφαρμογή είτε πρόκειται για UAV ή τρίποδο είτε για χειροκίνητη λήψη, και τέλος με το συνδυασμό των φακών της μηχανής (focal length, το μέγεθος του φακού κ.λπ.). Επιπρόσθετα, ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται σε κάθε εφαρμογή τα δεδομένα από τη φωτογραφική μηχανή χωρίς να έχουν υποστεί προ-επεξεργασία ή υψηλή συμπίεση (raw data) καθώς έτσι διατηρείται και το pixel της εικόνας στην αρχική του μορφή (raw pixel image).

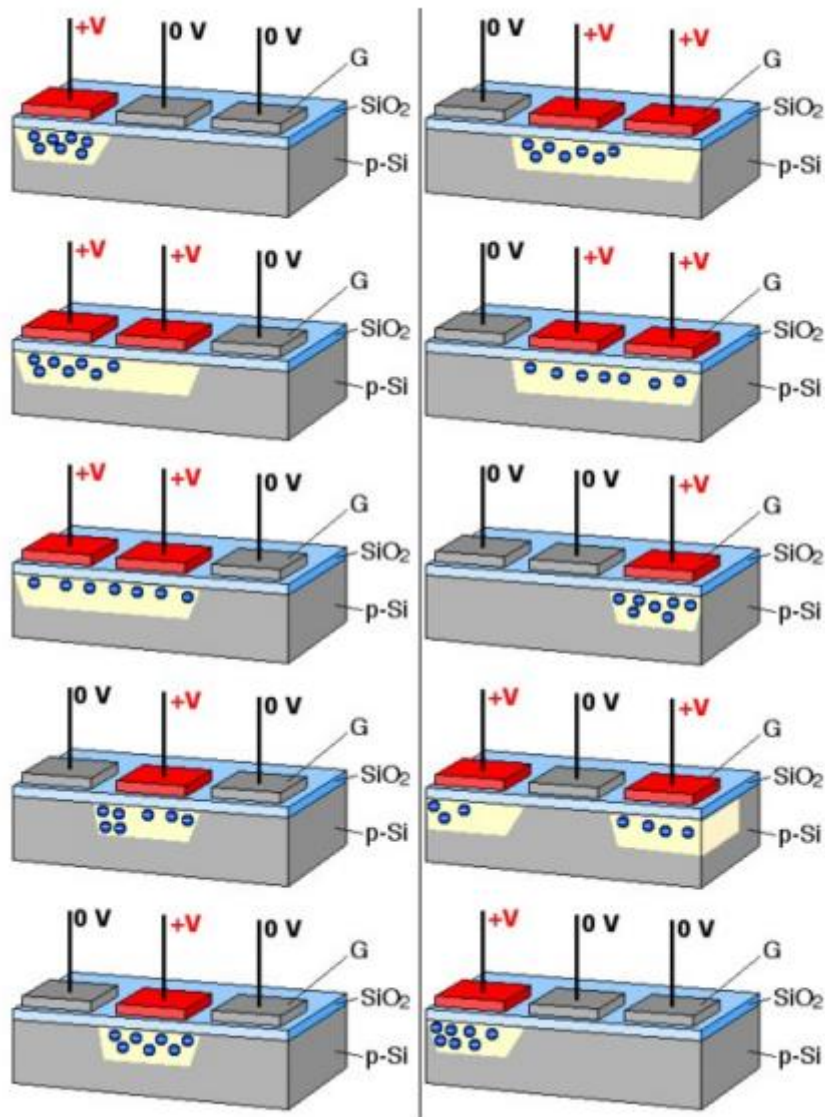
Οι RGB-D (Red, Green, Blue - Depth) κάμερες αποτελούν πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των Φωτογραμμέτρων καθώς πρόκειται για αισθητήρες χαμηλού κόστους και βάρους με δυνατότητα αποτύπωσης τόσο του χρώματος όσο και του βάθους μίας εικόνας ανά pixel με επαρκή ανάλυση. Η τεχνολογία με την οποία λειτουργούν τέτοιου τύπου αισθητήρες βασίζεται ουσιαστικά στην αποτύπωση του φωτός σε μορφή πληροφορίας και στη συνέχεια η μετατροπή της πληροφορίας αυτής σε ηλεκτρονικά σήματα με σκοπό την τελική απόδοση της ψηφιακής εικόνας (Zollhofer et al, 2018).

Οι αισθητήρες εικόνας (Image Sensors) με τους οποίους λειτουργεί μία RGB-D κάμερα διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους: α) τους CCD (Charged Coupled Device) και β) τους CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Η βασική αρχή λειτουργίας και των δύο, ως προς την απόδοση ψηφιακής εικόνας, είναι κοινή, διαφέρουν ωστόσο ως προς τον τρόπο μετατροπής των φωτεινών σημάτων σε ηλεκτρονικά προκειμένου να αποδοθεί η τελική εικόνα.

Ο ανιχνευτής CCD βασίζεται στη λειτουργία μεταφοράς του ηλεκτρικού σήματος από τη συσκευή προς μία έξοδο όπου μπορεί να καταγραφεί με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να μην υφίσταται σημαντική παραμόρφωση. Βασικό δομικό του στοιχείο αποτελεί ο πυκνωτής MOS, ενώ κύρια μέρη της συσκευής είναι ένας ημιαγωγός, ένας μονωτής και ένα μέταλλο. Όσον αφορά σε θέματα φωτεινότητας και υψηλής απόδοσης, οι εν λόγω ανιχνευτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε κάμερες που παράγουν εικόνες υψηλής απόδοσης με τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο. (Kainth and Singh, 2020)

Ένας στοιχειώδης αισθητήρας CCD σχηματίζεται από τρεις πυκνωτές παράλληλα τοποθετημένους, ενώ το σήμα μεταφέρεται από τον έναν πυκνωτή στον άλλον. Η λήψη και η μεταφορά του σήματος πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

- Αρχικά πολώνεται μόνο η πρώτη πύλη
- Στη συνέχεια πολώνεται η δεύτερη και μηδενίζεται το δυναμικό της πρώτης άρα το σήμα μετατοπίστηκε
- Τέλος ακολουθεί η ίδια διαδικασία και για την τρίτη πύλη ούτως ώστε να ολοκληρωθεί ο κύκλος.



Εικόνα 3.1: Λειτουργία ανιχνευτή CCD

Οι ανιχνευτές CMOS, από την άλλη, λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε το σήμα να αποκτάται για κάθε pixel ξεχωριστά και στη συνέχεια το απλοποιημένο αυτό σήμα να μεταφέρεται μέσω ενός τυπικού κυκλώματος. Η διαδικασία αυτή καθιστά έναν τέτοιο ανιχνευτή πιο ευέλικτο καθώς κάθε pixel της εικόνας μπορεί να διαβαστεί μεμονωμένα προτού ληφθεί η πληροφορία και μετατραπεί σε εικόνα καθώς και πιο γρήγορο αφού τα σήματα λαμβάνονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα σε σύγκριση με έναν ανιχνευτή CCD. Επιπρόσθετα, οι αισθητήρες CMOS προτιμώνται λόγω του χαμηλότερου κόστους τους και της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας (Kainth and Singh, 2020).

3.5 LiDAR

Η τεχνολογία LiDAR (Light Detection And Ranging) αποτελεί μέθοδο η οποία με τη χρήση ειδικών αισθητήρων υπολογίζει με ακρίβεια την απόσταση ενός αντικείμενου που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης. Ενώ οι πρώτες συσκευές LiDAR έκαναν την εμφάνισή τους τη δεκαετία του 1960, μόλις είκοσι χρόνια αργότερα και σε συνδυασμό με την εμφάνιση των συσκευών GPS κατάφεραν να κατακτήσουν τη θέση που τους αξίζει στον τομέα της Τοπογραφίας, αφού ουσιαστικά πρόκειται για μέθοδο υπολογισμού γεωχωρικών δεδομένων.

Κατά κύριο λόγο, τα τρία βασικά μέρη που συνοδεύουν μία συσκευή LiDAR είναι ένα laser, ένας σαρωτής και ένας δέκτης GPS. Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει κάλυψη από δορυφορικά συστήματα, τον δέκτη GPS αντικαθιστά το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (IMU). Επίσης μία συσκευή LiDAR αποτελείται από έναν φωτοανιχνευτή (πρόκειται για αισθητήρα φωτός ή άλλης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) ενώ μέρος της λειτουργίας της διέπεται από τις αρχές της Οπτικής, του κλάδου εκείνου της Φυσικής όπου μελετά τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες της ορατής, της υπέρυθρης και της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Η συσκευή LiDAR εκπέμπει παλμούς laser, οι οποίοι σχηματίζουν δέσμη που δημιουργεί κατακόρυφο επίπεδο και κινείται κατά την οριζόντια έννοια εντός μιας γωνίας που αποτελεί το εύρος της σάρωσης. Όταν η δέσμη προσπίπτει στο αντικείμενο, ανακλάται και επιστρέφει στον δέκτη όπου και καταγράφεται ο χρόνος μετάβασης-επιστροφής της, καθώς και η τιμή της έντασης της ακτινοβολίας. Τα δεδομένα αυτά καταγράφονται στην καταγραφική μονάδα του σαρωτή και μεταφέρονται στη μονάδα ελέγχου όπου και επεξεργάζονται. Η σάρωση του προς αποτύπωση αντικείμενου προκύπτει σαν διαδοχική σειρά στηλών διαδοχικών σημείων που σχηματίζουν μια τρισδιάστατη εικόνα (Παγούνης, 2004).

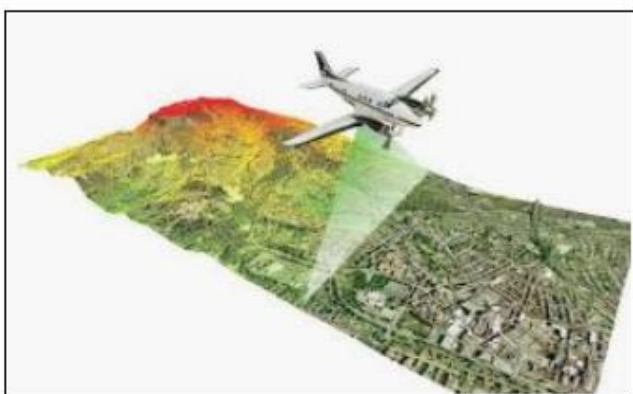
Τα συστήματα LiDAR χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Τους Αερομεταφερόμενους Δέκτες Laser (Airborne LiDAR) όπου πρόκειται για συστήματα τηλεπισκόπησης που παρέχουν άμεση γεωαναφορά και επιτρέπουν μετρήσεις υψομέτρων υψηλής ακρίβειας, οι οποίες με την κατάλληλη επεξεργασία παράγουν επίσης υψηλής ακρίβειας Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους. Τοποθετούνται σε ελικόπτερα ή drones και παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης μεγάλου όγκου δεδομένων, με μεγάλη ακρίβεια, σε πολύ λίγο χρόνο. Οι Αερομεταφερόμενοι Δέκτες Laser διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:
 - Τους τοπογραφικούς αισθητήρες (Topographic LiDAR), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη χαρτογράφηση περιοχών και βρίσκουν εφαρμογή στον κλάδο της Γεωμορφολογίας, του Αστικού Σχεδιασμού, της Οικολογίας Πεδίου κλπ
 - Τους αισθητήρες βαθυμετρίας (Bathymetric LiDAR), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του βάθους υδάτινων μαζών και βρίσκουν εφαρμογή τόσο στην περίπτωση μεταβολής των ακτογραμμών όσο και κατά τη διαδικασία ανεύρεσης αντικείμενων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

- Τα Terrestrial LiDAR, τα οποία χωρίζονται επίσης σε δύο υποκατηγορίες, ανάλογα με το

είδος της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται:

- Τα κινούμενα Terrestrial LiDAR, τα οποία τοποθετούνται σε οχήματα και χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση υποδομών καθώς και την παρατήρηση των οδικών δικτύων.
- Τα στατικά LiDAR, τα οποία τοποθετούνται σε τρίποδα, μεταφέρονται εύκολα και είναι απλά στη χρήση. Η λειτουργία τους βασίζεται στον προσδιορισμό της τρισδιάστατης γεωμετρίας των φυσικών επιφανειών η οποία απεικονίζεται σε μορφή πυκνού νέφους σημείων (point cloud) και θεωρούνται κατάλληλα για αρχαιολογικές εφαρμογές και αποτυπώσεις σπηλαίων.



Εικόνα 3.2: Αερομεταφερόμενος Δέκτης LiDAR



Εικόνα 3.3: Terrestrial LiDAR σε αποτύπωση σπηλαίου

3.6 Συστήματα μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών

Τα Συστήματα μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών (UAV) αρχικά μονοπωλούσαν το στρατιωτικό ενδιαφέρον αφού περιορίζονταν κυρίως σε εφαρμογές στρατιωτικού χαρακτήρα. Στη συνέχεια η ευελιξία που διαθέτουν τα κατέστησε δημοφιλή σε πολλούς τομείς και χρήσιμα σε πληθώρα εφαρμογών. Οι συνεχείς εξελίξεις της τεχνολογίας σε σχέση με τους αισθητήρες που μπορούν να προσαρτηθούν σε ένα UAV, όπως είναι οι συσκευές GPS/IMU και οι ψηφιακές κάμερες, τα έχουν μετατρέψει σε ευέλικτα συστήματα ικανά να χρησιμοποιηθούν σε κάθε είδους εφαρμογή.

Τα UAV πετάνε σε πολύ χαμηλότερα υψόμετρα σε σχέση με επανδρωμένα αεροσκάφη με συνέπεια να συλλέγουν φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης με ανάλυση έως 1pixel/cm ή και καλύτερη, σε αντίθεση με συμβατικούς τρόπους συλλογής δεδομένων από αέρος (αεροσκάφη, δορυφορικές εικόνες) όπου η ακρίβεια περιορίζεται σε 20-50pixel/cm.

Η διαδικασία συλλογής φωτογραφιών με UAV έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες παραδοσιακές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, η λήψη των εικόνων γίνεται με τυχαίο τρόπο, οι διαφορές ανάμεσα στις φωτογραφίες εξαιτίας περιστροφής της κάμερας είναι σημαντικές, οι εκτροπές λόγω αναγλύφου στις εικόνες και οι παραμορφώσεις λόγω της μεγάλης κλίμακας είναι μεγάλες και τέλος οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού είναι άγνωστες ή στην περίπτωση που μετρούνται άμεσα είναι πιθανό να παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Οι εξελίξεις στον τομέα της Όρασης Υπολογιστών με τη δυνατότητα χρήσης κατάλληλων αλγορίθμων σχετικών με την επεξεργασία εικόνας βοηθάνε στην αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων.



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα drone (oktokopter) με προσαρτημένη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή τοποθετημένη κατακόρυφα προς τα κάτω (Turner et al, 2012)

Η χρησιμότητα των συστημάτων μη στελεχωμένων αεροσκαφών στην εξερεύνηση των σπηλαίων είναι αρκετά δημοφιλής αν αναλογιστεί κανείς ότι το ιδιαίτερο περιβάλλον των υπόγειων αυτών συστημάτων, αφιλόξενο τις περισσότερες φορές για τον σύγχρονο άνθρωπο, έχει υπάρξει και εξακολουθεί να είναι αντικείμενο μελέτης πολλών επιστημών. Παρά το γεγονός ότι τα UAV αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο στη διάθεση αρχαιολόγων, γεωλόγων και σπηλαιολόγων κυρίως, για την ασφαλή και αξιόπιστη έρευνα, και παρά τη διαθέσιμη τεχνολογία αιχμής και τις συνεχείς εξελίξεις στον τομέα της ρομποτικής, απαιτητικά πεδία εφαρμογής όπως είναι αυτά των σπηλαίων, παρουσιάζουν επιπρόσθετα προβλήματα σε σημείο που επιβάλλεται η εφαρμογή αλγορίθμων αυτόνομης περιήγησης.

Σε γενικές γραμμές, τα UAV έχουν χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές όπως η κινητή χαρτογράφηση σπηλαίων τόσο με ενσωματωμένους αισθητήρες LiDAR όσο και με κάμερες για εφαρμογές ψηφιακής φωτογραμμετρίας. Όμως, παρά τα οφέλη που προσφέρουν στον τομέα της χαρτογράφησης σε περιορισμένους χώρους, παρουσιάζουν επίσης και πολλά εμπόδια καθώς η περιορισμένη πρόσβαση, το υγρό στοιχείο, τα επιβλαβή για τον άνθρωπο αέρια (π.χ. CO₂), η ύπαρξη διαφόρων ειδών από το ζωικό βασίλειο όπως είναι οι νυχτερίδες, ο ελλιπής φωτισμός και η περιορισμένη επικοινωνία καθιστούν τη χρήση της ρομποτικής ιδιαίτερη πρόκληση. Τα δεδομένα αυτά οδήγησαν σε περαιτέρω εξέλιξη των UAV είτε ως αυτοκινούμενα οχήματα είτε ως τηλεχειριζόμενα συστήματα με σκοπό να είναι αξιόπιστα και εύρωστα για κάθε είδους εφαρμογή.

Πιο αναλυτικά, οι προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα συστήματα μη στελεχωμένων αεροσκαφών στο εσωτερικό ενός σπηλαίου καταγράφονται ως εξής (La Scalea et al, 2019):

➤ **Δυσκολία στον χειρισμό.** Ανεξάρτητα από το αν το drone κινείται αυτόνομα ή ελέγχεται από ειδικό χειριστή, ο έλεγχος της πτήσης εξαρτάται από το δίκτυο επικοινωνίας (ανάμεσα στο drone και τον χειριστή ή το κέντρο ελέγχου) προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η πτήση. Σε περίπτωση διαταραχής του δικτύου αυτού επικοινωνίας ο χειριστής μπορεί να χάσει τον έλεγχο του αεροσκάφους οπότε αυτό κινδυνεύει να προσκρούσει στο έδαφος.

Στα συστήματα που έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες, το δίκτυο λειτουργεί έτσι ώστε να υφίσταται η ενδοεπικοινωνία ανάμεσα στους αισθητήρες αυτούς. Όταν υπάρχει καθυστέρηση

στο δίκτυο της επικοινωνίας είναι λογικό να προκληθούν προβλήματα όσον αφορά στην καταγραφή και επεξεργασία της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο όπως συμβαίνει με τον αλγόριθμο SLAM. Η καθυστέρηση αυτή είναι πιθανό να προκαλέσει σύγκρουση του drone με τα τοιχώματα του σπηλαίου αφού η ειδοποίηση για την αποφυγή εμποδίων φτάνει στο κέντρο ελέγχου ελαφρώς καθυστερημένα. Συνεπώς η μείωση της καθυστέρησης αυτής στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, αποτελεί μεγάλη πρόκληση στην περίπτωση συστήματος με πολλαπλούς αισθητήρες που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο.

Ακόμα μία παράμετρος που υπονομεύει τη λειτουργία του συστήματος είναι ο θόρυβος που δημιουργείται κατά τη διαδικασία μετάδοσης του σήματος από τον χειριστή στον αντίστοιχο αισθητήρα. Η υποβάθμιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε πλήθος παραγόντων μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η σωστή κωδικοποίηση των control levels ούτως ώστε αυτά να μπορούν να αντιμετωπίσουν παραπάνω του ενός σφάλματος στα bit κατά τη μετάδοση του σήματος. Ένα κανάλι μετάδοσης που περιέχει θόρυβο σε συνδυασμό με συχνά σφάλματα στα bit οδηγεί σε προβλήματα αναφορικά με την ανίχνευση των κλειστών βρόχων. Στην περίπτωση του σπηλαίου η εν λόγω αδυναμία του συστήματος είναι πιθανό να οδηγήσει σε απώλεια του UAV ή ακόμα και σε καταστροφή του λιθωματικού διακόσμου του σπηλαίου αν υπάρξει σύγκρουση.

➤ **Δυσκολία στην επικοινωνία.** Η λειτουργία των Συστημάτων μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών στο εσωτερικό των σπηλαίων θεωρείται ιδιαίτερη πρόκληση, μεταξύ άλλων, εξαιτίας της αδυναμίας λειτουργίας οποιουδήποτε συστήματος ενδοεπικοινωνίας, γεγονός που προσθέτει μία ακόμη δυσκολία όσον αφορά στη συλλογή των δεδομένων. Για το λόγο αυτό, ο σωστός σχεδιασμός των καναλιών μετάδοσης σήματος παίζει σημαντικό ρόλο στο ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας ενός UAV μέσα στο σπήλαιο.

Οι Khuwaja et al (2018) αναλύουν τα μοντέλα ασύρματης επικοινωνίας air-to ground και air-to-air επισημαίνοντας ότι παράγοντες όπως οι σκιάσεις που δημιουργούνται στο εσωτερικό μιας σπηλιάς, η απώλεια σήματος, η παρατηρούμενη αλλαγή στο μήκος κύματος και τη συχνότητα ενός κύματος ανάλογα με την απόσταση του drone από τον χειριστή (φαινόμενο Doppler), επηρεάζουν την πτήση του UAV. Επισημαίνεται δε ότι το περιβάλλον του σπηλαίου, το οποίο χαρακτηρίζεται από στενά περάσματα και ιδιαίτερο τύπο λιθωματικού διακόσμου απαιτεί και την αντίστοιχη προσαρμογή του εναέριου συστήματος ούτως ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η επιρροή της κατάστασης line-of-sight η οποία δεν είναι αμελητέα λόγω των γωνιών και της ιδιόμορφης τροχιάς της κίνησης σε ένα σπήλαιο.

Ακόμα ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη μετάδοση του σήματος οφείλεται στη διάθλαση, την αντανάκλαση και τη σκέδαση του σήματος εξαιτίας των πολλαπλών εμποδίων εντός του σπηλαίου που οδηγούν στη δημιουργία πανομοιότυπων σημάτων διαφορετικού όμως πλάτους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι διαφορετικοί τύποι σήματος να φτάνουν στον δέκτη τροποποιημένοι, γεγονός που καθιστά την ανίχνευσή τους ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με ποικίλες τεχνικές (diversity techniques), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας για την ενίσχυση του σήματος, όπως για παράδειγμα ο συνδυασμός πολλών κεραιών πάνω στο drone που δημιουργεί ένα πιο σταθερό κανάλι επικοινωνίας το οποίο δεν επηρεάζεται από την αλλαγή στον προσανατολισμό του UAV από τον χειριστή.

Εν κατακλείδι, παρόλο που τα Συστήματα μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών προσφέρουν απεριόριστες δυνατότητες σε πληθώρα εφαρμογών, υπάρχουν ακόμα αρκετές τεχνολογικές προκλήσεις που δημιουργούνται από την απρόσκοπτη χρήση τους και πρέπει να αντιμετωπισθούν. Πιο συγκεκριμένα το κομμάτι της καταγραφής αξιόπιστων μετρήσεων για την ανίχνευση της θέσης, της χαρτογράφησης και της πλοήγησης χρήζει περαιτέρω εξέλιξης.

Επιπρόσθετα, τα αυτόνομα συστήματα παρουσιάζουν περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά σε θέματα λογισμικού και παροχής ενέργειας, συνεπώς είναι απαραίτητη τόσο η ανάπτυξη αλγορίθμων για την αποτελεσματικότερη χρήση ενέργειας καθώς και τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας των μετρήσεων όσο και η ανάπτυξη τεχνικών φόρτισης των πηγών ενέργειας.

Πέραν των δυσκολιών όμως που καλείται κάποιος να προσπελάσει κατά τη χρήση συστημάτων UAV μέσα σε ένα σπήλαιο, δεν μπορούμε να παραβλέψουμε το σημαντικό πλεονέκτημα που αυτά προσφέρουν κατά τη χαρτογράφηση των υπόγειων αυτών συστημάτων όπου η παρουσία του ανθρώπου για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να θεωρηθεί επιβλαβής. Οι περιπτώσεις αυτές αναφέρονται κυρίως σε έγκοιλα μέσα στα οποία η έλλειψη επαρκούς αερισμού οδηγεί στη συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας CO₂ με αποτέλεσμα οποιαδήποτε χρονοβόρα εργασία εντός αυτών να είναι απαγορευτική.

3.7 Τεχνολογία αιχμής για αποτύπωση

Την τελευταία κυρίως δεκαετία έχουν αναπτυχθεί πλήρως αυτοματοποιημένες τεχνολογικές μέθοδοι, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων με σκοπό την απόδοση τρισδιάστατων μοντέλων με έμφαση στη λεπτομέρεια και την ακρίβεια, ανάλογα πάντα με την εκάστοτε εφαρμογή. Αναμφισβήτητα, η επισταμένη μελέτη που έλαβε χώρα τα περασμένα χρόνια και αφορούσε τον συνδυασμό εξελιγμένων αλγορίθμων της επιστήμης της Όρασης Υπολογιστών και των κλασικών φωτογραμμετρικών μεθόδων, οδήγησε στην εφαρμογή της τεχνικής Structure from Motion για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων και την απόδοση 3D μοντέλων με μεγάλη ακρίβεια.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στις εφαρμογές που σχετίζονται με την προστασία και ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς παγκοσμίως, οι τεχνικές και οι αντίστοιχοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τις ιδιαίτερες ανάγκες του προς αποτύπωση περιβάλλοντος (ιστορικά μνημεία, αρχαιολογικοί χώροι, σπήλαια, ενάλιοι αρχαιολογικοί χώροι κλπ).

Οι Remondino et al (2016), παρουσιάζουν μία ανάλυση σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση προηγμένων τεχνολογικών μεθόδων ως εξής:

Φωτογραμμετρία από αέρος με πλάγιες λήψεις (Oblique Aerial Photogrammetry)

- ✔ Θεωρείται κατάλληλη για την αποτύπωση κτιρίων
- ✔ Παρέχει τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων περιοχών
- ✘ Λειτουργεί σε μικρές κλίμακες
- ✘ Είναι ανεπαρκής σε στενά περάσματα
- ✘ Δεν αποδίδει σε εσωτερικούς χώρους
- ✘ Παρέχει χαμηλή ανάλυση κατά την αποτύπωση των προσόψεων των κτιρίων

Oblique aerial photogrammetry



Αερομεταφερόμενα laser scanner (LiDAR)

- ✔ Πραγματοποιείται απ' ευθείας γεωαναφορά του νέφους σημείων

- ✘ Παρέχει χαμηλή ανάλυση
- ✘ Το κόστος αγοράς ή ενοικίασης είναι ιδιαίτερα ακριβό
- ✘ Έχει πολλή χαμηλή απόδοση υψής

Φωτογραμμετρία με χρήση συστημάτων μη στελεχωμένων αεροσκαφών (UAV)

- ✔ Οι φωτογραφίες που λαμβάνονται είναι υψηλής ανάλυσης
- ✔ Έχει τη δυνατότητα πλάγιων λήψεων (π.χ. για προσόψεις κτιρίων)
- ✘ Απαιτείται άδεια χρήσης συστήματος UAV
- ✘ Ο πιλότος του συστήματος πρέπει να έχει υψηλή κατάρτιση στο χειρισμό τέτοιων συστημάτων καθώς απαιτούνται λεπτοί χειρισμοί ιδιαίτερα σε χώρους με πολλά εμπόδια (π.χ. σπήλαια, στενά περάσματα κλπ)

Laser scanners ενσωματωμένα σε UAV

- ✔ Απόδοση νεφών σημείων υψηλής ανάλυσης
- ✘ Το κόστος των μηχανημάτων είναι υψηλό
- ✘ Διαθέτουν χαμηλή ακρίβεια στην απόδοση του μοντέλου
- ✘ Δεν αποδίδεται σχεδόν καθόλου υφή στο τελικό μοντέλο
- ✘ Απαιτείται άδεια χρήσης συστήματος UAV
- ✘ Ο πιλότος του συστήματος πρέπει να έχει υψηλή κατάρτιση στο χειρισμό τέτοιων συστημάτων καθώς απαιτούνται λεπτοί χειρισμοί ιδιαίτερα σε χώρους με πολλά εμπόδια

Επίγεια φωτογραμμετρία με μηχανή επιφανειακού αισθητήρα

- ✔ Αποτελεί ευέλικτη τεχνική, χαμηλού κόστους
- ✔ Αποδίδεται η γεωμετρία του τελικού μοντέλου καθώς επίσης και η υφή του
- ✔ Θεωρείται ιδιαίτερα παραγωγική μέθοδος
- ✘ Παρουσιάζει προβλήματα σε πιθανή αλλαγή του φωτισμού
- ✘ Προκύπτουν προβλήματα με την αλλαγή της κλίμακας

Terrestrial photogrammetry with frame cameras/images



Επίγεια φωτογραμμετρία με πανοραμικές φωτογραφικές μηχανές

- ✔ Προσφέρει κάλυψη 360° του πεδίου λήψης
- ✔ Γρήγορη λήψη μετρήσεων
- ✔ Αποδίδεται η γεωμετρία του τελικού μοντέλου καθώς επίσης και η υφή του
- ✘ Προσφέρει χαμηλή ραδιομετρική και γεωμετρική ανάλυση
- ✘ Παρουσιάζονται προβλήματα κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των εικόνων
- ✘ Προκύπτουν προβλήματα με την αλλαγή της κλίμακας

Terrestrial photogrammetry with panoramic cameras/images



Κινητές συσκευές/tablet

- ✓ Γρήγορη λήψη μετρήσεων
- ✓ Ανάγκη ενσωμάτωσης λογισμικού, το οποίο είναι οικονομικό
- ✓ Απόδοση του τρισδιάστατου μοντέλου σε πραγματικό χρόνο
- ✗ Τα αποτελέσματα που προκύπτουν διακρίνονται από θόρυβο
- ✗ Διαθέτουν μικρή εμβέλεια
- ✗ Είναι περισσότερο αποδοτικές σε μικρούς, εσωτερικούς χώρους

Tablet / mobile image-based devices



Επίγεια laser scanners

- ✓ Προσφέρει κάλυψη 360° του πεδίου λήψης
- ✓ Τα δεδομένα που προκύπτουν έχουν μετρητική αξία
- ✓ Τα νέφη σημείων που προκύπτουν είναι υψηλής ανάλυσης
- ✗ Παρέχει χαμηλή ποιότητα στην απόδοση υψών
- ✗ Για την απόκτηση δεδομένων η συσκευή πρέπει να τοποθετηθεί σε διαφορετικές στάσεις προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη κάλυψη του χώρου
- ✗ Η διαδικασία μετρήσεων είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα
- ✗ Η πιθανότητα ύπαρξης σημείων στο χώρο που δεν θα καλυφθούν είναι μεγάλη (occlusions)

Terrestrial laser scanning



Κινητή χαρτογράφηση με κινούμενο όχημα

- ✓ Προσφέρει κάλυψη 360° του πεδίου λήψης
- ✓ Αποδίδεται η γεωμετρία του τελικού μοντέλου καθώς επίσης και η υφή του
- ✓ Γρήγορη λήψη μετρήσεων
- ✓ Η γεωαναφορά του συστήματος γίνεται απ' ευθείας
- ✗ Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εσωτερικούς χώρους
- ✗ Θεωρείται ιδιαίτερα ακριβή μέθοδος
- ✗ Η πιθανότητα ύπαρξης σημείων στο χώρο που δεν θα καλυφθούν είναι μεγάλη (π.χ. αδυναμία απόκτησης δεδομένων στην περίπτωση υψηλών κτιρίων)

Van-based mobile mapping



Κινητές/χειροκίνητες συσκευές κινητής χαρτογράφησης

- ✓ Προσφέρουν κάλυψη 360° του πεδίου λήψης
- ✓ Τα δεδομένα που προκύπτουν έχουν μετρητική αξία
- ✓ Γρήγορη λήψη μετρήσεων
- ✓ Ιδανικές για κλειστούς χώρους και στενά περάσματα

Portable / handheld mobile mapping



- ✘ Η απόδοση υφής του μοντέλου είναι χαμηλή
- ✘ Το λογισμικό που απαιτείται είναι ιδιαίτερα δαπανηρό
- ✘ Διαθέτουν μικρή εμβέλεια

4. SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING

Ο όρος SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) αναφέρεται στη μέθοδο που χρησιμοποιεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα προκειμένου να περιηγηθεί σε άγνωστο, μη χαρτογραφημένο περιβάλλον ενώ ταυτόχρονα να μπορεί να δημιουργεί με ακρίβεια χάρτη του χώρου μέσα στον οποίο βρίσκεται και να κινείται με ασφάλεια σε αυτόν.

Τις τελευταίες δεκαετίες οι τομείς της ρομποτικής, της όρασης υπολογιστών καθώς και της επαυξημένης πραγματικότητας αναπτύσσονται ραγδαία με αποτέλεσμα η παραπάνω μέθοδος, η οποία βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη, να κατέχει εξέχουσα θέση στον τομέα της έρευνας καθώς καθιστά ένα ρομπότ πλήρως αυτόνομο και ταυτόχρονα άκρως λειτουργικό. Η μέθοδος SLAM εφαρμόζεται ήδη σε διαφορετικούς τομείς για χαρτογράφηση εσωτερικού ή εξωτερικού περιβάλλοντος, σε υποβρύχια συστήματα καθώς και για εφαρμογές που απαιτούν εναέριες λήψεις.

Ο κλάδος της ρομποτικής χαρτογράφησης κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος τα τελευταία χρόνια βρίσκοντας εφαρμογή σε πολλά πεδία, από οικιακές συσκευές που έρχονται να διευκολύνουν την καθημερινότητά του σύγχρονου ανθρώπου, μέχρι την εξερεύνηση άλλων πλανητών, υποβρύχιου περιβάλλοντος και γενικότερα άγνωστων και δυσπρόσιτων περιοχών. Η ανάπτυξη αλγορίθμων SLAM εστιάζει στη λειτουργική συμμόρφωση με τις συνθήκες ενός προβλήματος, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε περιβάλλοντος, παρά στην επίτευξη της τελειότητας. Συνεπώς η κάθε περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου θεωρείται διαφορετική και χρήζει διερεύνησης σχετικά με τα ρομποτικά συστήματα που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και τις μεθόδους προσέγγισης του κάθε προβλήματος.

Η χαρτογράφηση ενός άγνωστου χώρου και ο ταυτόχρονος εντοπισμός της θέσης του ρομποτικού οχήματος ουσιαστικά πραγματοποιείται με τη σάρωση του άγνωστου περιβάλλοντος με χρήση ειδικών αισθητήρων που αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια. Τα δεδομένα που παράγονται αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που βρίσκεται πάνω στο κινούμενο όχημα ενώ η επεξεργασία αυτών οδηγεί στη δημιουργία τρισδιάστατου χάρτη που απεικονίζει την κάτοψη του χώρου. Ο χάρτης αυτός έχει τη μορφή ασπρόμαυρης εικόνας λόγω της αντιστοιχίας των χρωμάτων απεικόνισης.

Στην περίπτωση εφαρμογής αλγορίθμου SLAM σε ένα σπήλαιο, αναφερόμαστε σε στατικό περιβάλλον εξαιτίας της απουσίας κινούμενων οντοτήτων στο εσωτερικό του, με εξαίρεση την περίπτωση σπηλαίων μέσα στα οποία διαβιούν νυχτερίδες, όπου πρόκειται για δυναμικά περιβάλλοντα στα οποία η κίνηση των οντοτήτων επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του τελικού χάρτη.

4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η συζήτηση για το πρόβλημα της χαρτογράφησης με ταυτόχρονο εντοπισμό της θέσης κινούμενου ρομπότ προέκυψε το 1986 σε Συνέδριο Ρομποτικής που έλαβε χώρα στο Σαν Φρανσίσκο της πολιτείας της Καλιφόρνιας και θεωρείται αφητηρία της έρευνας και μελέτης που συνεχίζεται έως σήμερα. Αποτέλεσμα της συζήτησης αυτής υπήρξε η αναγνώριση θεμελιώδους

προβλήματος της ρομποτικής όσον αφορά στην πιθανοτική χαρτογράφηση η οποία ενείχε σημαντικά θέματα που σχετίζονται με την αντίληψη του χώρου και τους υπολογιστές και τα οποία απαιτούσαν περαιτέρω διερεύνηση. Κύριος στόχος της μελέτης που προέκυψε, ήταν η απόδειξη της υψηλής συσχέτισης που υπάρχει ανάμεσα στους υπολογισμούς εύρεσης σημείων σε ένα χώρο καθώς και ο τρόπος εύρεσης αυτών των σημείων μέσα από διαδοχικές παρατηρήσεις.

Οι ερευνητικές μελέτες που ακολούθησαν υπέδειξαν ότι, καθώς ένα ρομπότ κινείται σε άγνωστο περιβάλλον καταγράφοντας τις θέσεις των σημείων στο χώρο, οι υπολογισμοί των σημείων αυτών σχετίζονται όλοι μεταξύ τους εξαιτίας του κοινού σφάλματος στην εκτιμώμενη θέση του ρομπότ. Το βασικό πρόβλημα που καλούνταν να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές ήταν ο συνδυασμός της εύρεσης θέσης και δημιουργίας χάρτη την ίδια χρονική στιγμή. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την εφαρμογή ενός αλγορίθμου, ο οποίος να συνδυάζει τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση ως μία κοινή διαδικασία η οποία θα ανανεώνεται κάθε φορά που εισάγεται μια νέα παρατήρηση ενός διακριτού σημείου (Durrant-Whyte and Bailey, 2006).

Την εποχή εκείνη ήταν ευρέως αποδεκτό ότι τα σφάλματα που προκύπτουν από τη χαρτογράφηση δεν συγκλίνουν με τα αντίστοιχα της εύρεσης θέσης ενώ αντίθετα η τυχαία περιήγηση σε ένα χώρο παρουσιάζει τεράστιο, συνεχώς αυξανόμενο σφάλμα. Έτσι η πολυπλοκότητα που παρουσίαζε η δημιουργία χάρτη με τη χρήση υπολογιστών καθώς και η έλλειψη επαρκούς γνώσης για τη συνοχή που παρουσιάζει ένας χάρτης, οδήγησε τους επιστήμονες σε διαφορετικές προσεγγίσεις του θέματος οι οποίες μείωναν ή ακόμα και εξάλειψαν τους συσχετισμούς ανάμεσα στα σημεία. Αποτέλεσμα όλων αυτών ήταν να καταλήξει η έρευνα σε αδιέξοδο και στο εξής να επικεντρώνεται σε ένα από τα δύο ζητούμενα κάθε φορά, τη χαρτογράφηση ή την εύρεση της θέσης.

Η συνειδητοποίηση ότι τα δύο ζητούμενα στην ουσία συγκλίνουν, αποτέλεσε επανάσταση στο χώρο αυτό της επιστήμης. Πιο συγκεκριμένα οι επιστήμονες αναγνώρισαν ότι οι συσχετισμοί ανάμεσα στα σημεία, τους οποίους οι περισσότεροι προσπάθησαν να ελαττώσουν, αποδείχτηκαν κρίσιμο σημείο της έρευνας αφού σε αντίθεση με την παραπάνω παραδοχή, όσο μεγαλύτεροι ήταν αυτοί οι συσχετισμοί τόσο καλύτερη η λύση του προβλήματος. Έτσι περίπου μια δεκαετία μετά την εμφάνιση του θέματος, το 1995, προέκυψε η επινόηση του ακρωνύμιου SLAM ταυτόχρονα με την αναγνώριση πως η χαρτογράφηση και ο εντοπισμός δεν αποτελούν δύο διακριτά προβλήματα αλλά ένα κοινό πρόβλημα το οποίο βασίζεται στη συσχέτιση μεταξύ διακριτών σημείων.

Αυτή τη χρονική περίοδο στην οποία αναφερόμαστε οι προσπάθειες των ερευνητών εστίασαν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των υπολογιστών και συγκεκριμένα σε θέματα που αφορούν στη διαχείριση των δεδομένων και στη δημιουργία βρόχων επαναλήψεων (loop), ενώ τα επόμενα χρόνια οι μελέτες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη και διαχείριση πολύπλοκων αλγορίθμων καθώς και στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που προέκυπταν από την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου SLAM.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SLAM

Η επιτυχία της μεθόδου SLAM έγκειται στην εκτίμηση της θέσης του ρομπότ και τη δημιουργία χάρτη, δύο διαδικασίες που εκτελούνται ταυτόχρονα. Ωστόσο, οι πραγματικές θέσεις του ρομπότ, δεν είναι γνωστές και δεν μετρούνται άμεσα. Προκειμένου να γίνει εκτίμηση της θέσης του κινούμενου οχήματος που καταγράφει το χώρο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αντικειμενικού χάρτη του περιβάλλοντος, και ταυτόχρονα η εύρεση της θέσης του, ούτως ώστε να δημιουργηθεί ο χάρτης αυτός, αποτελεί και την κυριότερη δυσκολία του προβλήματος. Ουσιαστικά πρόκειται

για πρόβλημα με δύο σκέλη, η επίλυση των οποίων δημιουργείται σταδιακά αφού πρώτα ορισθούν αρχικές δεσμεύσεις, έστω και μη ακριβείς, προκειμένου να επέλθει εναλλάξ απόδοση του χάρτη και της θέσης. Τα δεδομένα που παράγονται είναι πιθανολογικές παρατηρήσεις του χώρου μέσα από τις οποίες δημιουργείται ο χάρτης και ορίζεται μία θέση για το κινούμενο όχημα την ακριβώς προηγούμενη στιγμή, δεδομένα που ανανεώνονται με καινούριες παρατηρήσεις κάθε νέα χρονική στιγμή.

Η πιθανότητα που περιγράφει το πρόβλημα του SLAM δίνεται από τη σχέση:

$$P(\mathbf{x}_t, \mathbf{m} \mid \mathbf{z}_{0:t}, \mathbf{u}_{0:t}, \mathbf{x}_0)$$

όπου,

\mathbf{x}_t → το διάνυσμα που περιγράφει τη θέση του οχήματος

\mathbf{m} → τα ορόσημα ή ο χάρτης

$\mathbf{z}_{0:t}$ → οι παρατηρήσεις

$\mathbf{u}_{0:t}$ → τα στοιχεία της κίνησης του οχήματος

Προκειμένου να κατασκευασθεί ο χάρτης και ταυτόχρονα να γίνει ο εντοπισμός της θέσης του ρομπότ, έχουμε ως δεδομένα τις παρατηρήσεις και τις εντολές ελέγχου της κίνησης. Συνεπώς η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται βάσει του μοντέλου παρατήρησης και του μοντέλου κίνησης.

Αν υποθέσουμε ότι $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_t)$ είναι οι θέσεις του ρομπότ από το σημείο εκκίνησης x_1 έως το σημείο x_t , τότε για χρονική στιγμή t ορίζονται οι μεταβλητές:

\mathbf{x}_t → το διάνυσμα που περιγράφει τη θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ (state vector)

\mathbf{u}_t → το διάνυσμα ελέγχου του ρομπότ (control vector) τη χρονική στιγμή $t-1$ ώστε αυτό να κινηθεί στη θέση x_t την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή t

\mathbf{m}_i → το διάνυσμα που περιγράφει τη θέση του i -οστού οροσήμου, του οποίου η πραγματική θέση είναι ανεξάρτητη του χρόνου

\mathbf{z}_{it} → το διάνυσμα παρατήρησης (observation vector) που λαμβάνεται από τους αισθητήρες της κινούμενης πλατφόρμας για τη θέση του i -οστού οροσήμου τη χρονική στιγμή t

Επιπλέον:

$\mathbf{x}_{0:t} = \{x_0, x_1, \dots, x_t\} = \{x_{0:t-1}, x_t\}$ → οι θέσεις του οχήματος

$\mathbf{u}_{0:t} = \{u_1, u_2, \dots, u_t\} = \{u_{0:t-1}, u_t\}$ → οι παράμετροι ελέγχου της κίνησης

$\mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ → το σύνολο των οροσήμων

$\mathbf{z}_{0:t} = \{z_1, z_2, \dots, z_t\} = \{z_{0:t-1}, z_t\}$ → το χρονικό των παρατηρήσεων ανά ορόσημο

Το μοντέλο παρατήρησης περιγράφει την πιθανότητα να καταγραφεί μία παρατήρηση z_k όταν είναι γνωστές τόσο η θέση του ρομπότ όσο και των οροσήμων και περιγράφεται ως εξής:

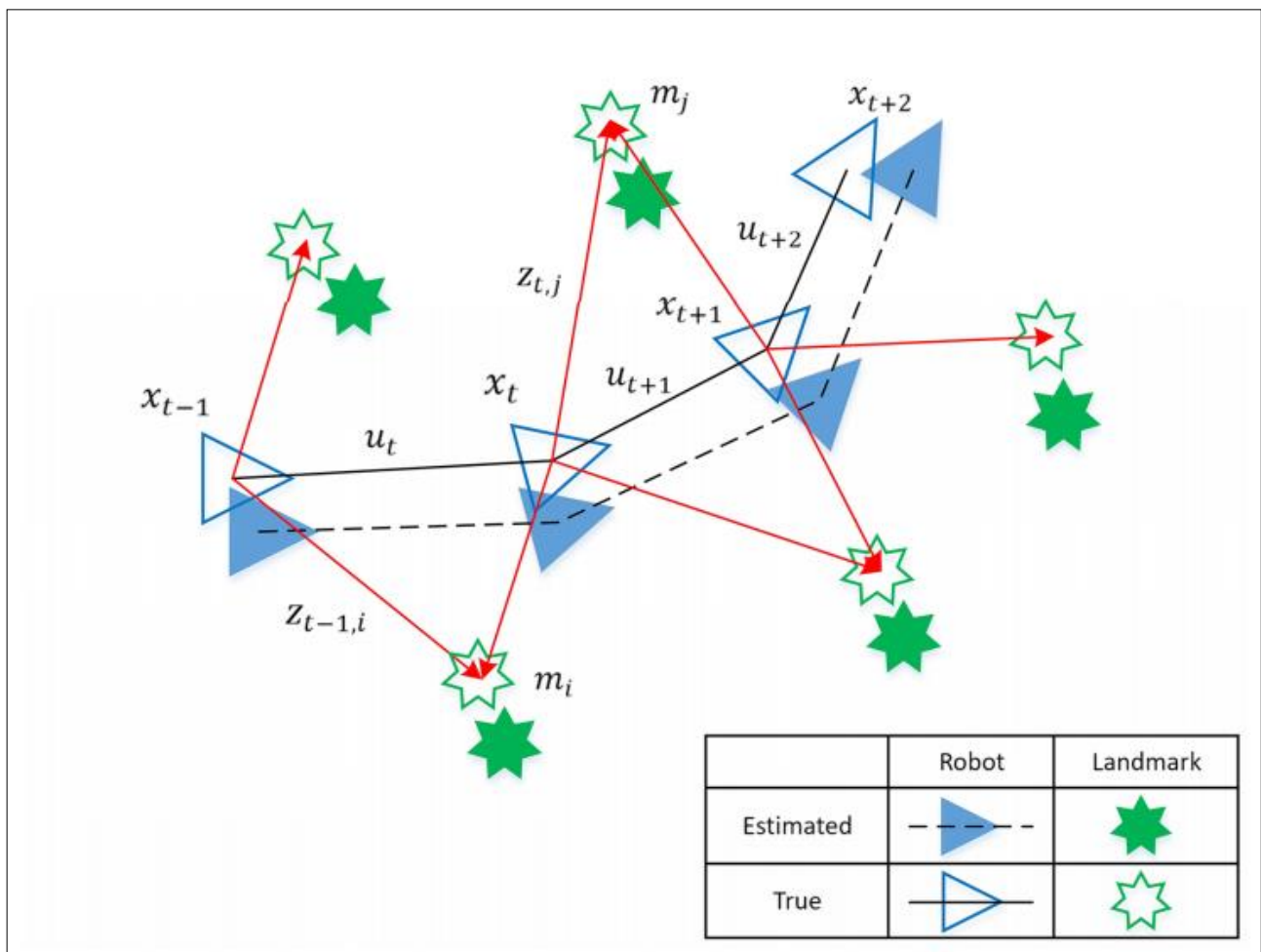
$$P(z_t \mid \mathbf{x}_t, \mathbf{m})$$

Μια λογική υπόθεση που προκύπτει από το εν λόγω μοντέλο είναι ότι εφόσον έχουν προσδιορισθεί η θέση του ρομπότ και ο χάρτης, οι παρατηρήσεις είναι ανεξάρτητες του χάρτη αυτού και της τρέχουσας κατάστασης του ρομπότ.

Το μοντέλο κίνησης του κινούμενου οχήματος υπολογίζει τη νέα θέση του ρομπότ κάθε νέα χρονική στιγμή και περιγράφεται ως μία διασπορά πιθανοτήτων στη μεταβολή της θέσης:

$$P(x_t | x_{t-1}, u_t)$$

Καθώς το ρομπότ κινείται στο χώρο, εντοπίζονται τα κοινά σημεία των περιοχών από τις οποίες έχει περάσει με αποτέλεσμα οι μετρήσεις εύρεσης θέσης να συσχετίζονται μεταξύ τους και να μειώνεται έτσι η αβεβαιότητά τους. Με τον τρόπο αυτό επαναπροσδιορίζεται συνεχώς η θέση του κάθε χαρακτηριστικού σημείου ενώ στην περίπτωση που δεν συσχετίζεται προστίθεται ένα νέο χαρακτηριστικό σημείο στον χάρτη. Για την καλύτερη και ακριβέστερη απόδοση του άγνωστου τρισδιάστατου χώρου βοηθάει η γνώση των σημείων από τα οποία έχει περάσει το κινούμενο αντικείμενο αφού με τον τρόπο αυτό βελτιστοποιείται η θέση του κάθε στιγμή.



Εικόνα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση προβλήματος SLAM (Lei et al, 2020)

Δεδομένου ότι η λειτουργία του αλγορίθμου SLAM βασίζεται στη συνεχή παρατήρηση των αντικειμένων σε έναν χώρο, ένα απλουστευμένο παράδειγμα για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίον υπολογίζεται η κίνηση του κινούμενου οχήματος όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα δορυφορικής κάλυψης για τον προσδιορισμό της θέσης είναι το εξής:

Αρχικά λοιπόν, λαμβάνεται μία μέτρηση της απόστασης του ρομπότ από ένα σταθερό αντικείμενο (π.χ. έναν τοίχο). Ενώ καταγράφεται η μέτρηση αυτή, την επόμενη χρονική στιγμή λαμβάνεται μία ακόμη. Αν υποθέσουμε ότι οι δύο μετρήσεις μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους με κοινό σημείο αναφοράς την κοινή επιφάνεια, μπορεί εύκολα να υπολογισθεί κατά πόσο έχει κινηθεί το ρομπότ μέσα στο χώρο από το ορθογώνιο τρίγωνο που δημιουργείται με χρήση Ευκλείδειας γεωμετρίας. Αθροίζοντας χιλιάδες τέτοιες παρατηρήσεις των κοινών επιφανειών με διαφορετικούς προσανατολισμούς, αποδίδεται με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, η κίνηση της κινούμενης πλατφόρμας στον τρισδιάστατο χώρο (Zlot and Bosse, 2014).

Η εφαρμογή της τεχνικής SLAM σε ένα αυτόνομο ρομποτικό σύστημα περιλαμβάνει δύο διαδικασίες: τη μέθοδο των πιθανοτήτων η οποία σχετίζεται με βασικούς αλγορίθμους πρόβλεψης (Extended Kalman Filter, Fast-SLAM κ.α.) και τη μέθοδο σάρωσης του χώρου με σκοπό την περιγραφή αυτού μέσα από την αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από τα δεδομένα των αισθητήρων.

Στην περίπτωση εφαρμογής του αλγορίθμου Visual-SLAM, ο οποίος ουσιαστικά αναφέρεται στον “οπτικό” εντοπισμό της θέσης του κινούμενου οχήματος με ταυτόχρονη χαρτογράφηση του χώρου μέσα στον οποίο κινείται, παρουσιάζονται δύο είδη επίλυσης:

- η μέθοδος που βασίζεται σε φίλτρα (filter-based), η οποία αφορά στην ενσωμάτωση των παρατηρήσεων από πολλαπλούς αισθητήρες κάνοντας χρήση των κατανομών πιθανοτήτων σε σχέση με τα χαρακτηριστικά σημεία και τις θέσεις της κάμερας.
- Η μέθοδος που βασίζεται σε βασικά καρτέ (keyframe-based), όπου σε κάθε εικόνα γίνεται εφαρμογή φίλτρου προκειμένου να γίνει εκτίμηση τόσο της τροχιάς του κινούμενου οχήματος όσο και του χώρου μέσα στον οποίο βρίσκεται αυτό.

Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν μεν να συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες και ως εκ τούτου να αυξάνονται οι παρατηρήσεις και η ενιαία μοντελοποίησή τους, ωστόσο θεωρούνται μη οικονομικές εξαιτίας του γεγονότος ότι για κάθε εικόνα πρέπει να πραγματοποιηθεί γραμμικοποίηση των συναρτήσεων χωρίς παράλληλα να εξάγεται σημαντικός όγκος νέας πληροφορίας.

Επιπρόσθετα, οι μέθοδοι που βασίζονται σε φίλτρα βασίζονται σε μεγάλο ποσοστό στην υπόθεση ότι ανάμεσα στις παρατηρήσεις και τα χαρακτηριστικά σημεία στο χώρο, ο χάρτης είναι δεδομένος. Η συσχέτιση μικρού αριθμού παρατηρήσεων με λανθασμένα χαρακτηριστικά σημεία μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις κατά την εφαρμογή του φίλτρου. Η συγκεκριμένη διαδικασία που ουσιαστικά καθορίζει τη δημιουργία του σωστού χάρτη που προκύπτει από τις παρατηρήσεις με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά σημεία ονομάζεται πρόβλημα αντιστοίχισης (correspondence problem) (Montemerlo et al, 2003).

4.3 Φίλτρο Kalman

Το Kalman Filter αποτελεί αλγόριθμο ο οποίος υπολογίζει την κατάσταση ενός συστήματος με θορύβους οι οποίοι αυξάνουν την αναξιοπιστία των συμπερασμάτων που λαμβάνονται κατά τις μετρήσεις. Λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να “καθαρίζει” τις μετρήσεις του συστήματος και στη συνέχεια να δημιουργεί μια νέα εκτίμηση της κατάστασής του χωρίς διαταραχές.

Σε γενικές γραμμές ένα φίλτρο (ή αναδρομικός αλγόριθμος) λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να

χρησιμοποιεί μέρος προηγούμενης πληροφορίας χωρίς να θεωρείται απαραίτητη η αποθήκευσή της, με σκοπό να επεξεργαστεί κάθε φορά που προκύπτει μια καινούρια μέτρηση. Στην περίπτωση όμως που οι μεταβλητές που περιγράφουν ένα σύστημα δεν μπορούν να υπολογισθούν με αξιόπιστο τρόπο, οι τιμές αυτών εξάγονται συμπερασματικά από τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες. Ωστόσο θεωρείται δεδομένο ότι κάθε μέτρηση ενέχει πάντα ένα ποσοστό σφάλματος το οποίο προκύπτει αφενός ως συνάρτηση θορύβου από το ίδιο το σύστημα ελέγχου και αφετέρου από τις συσκευές μέτρησης. Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιείται προκειμένου να εξαλειφθεί κάθε παράγοντας αποπροσανατολισμού ή παραμόρφωσης της εκτίμησης της κατάστασης του συστήματος. Συνδυάζοντας κάθε νέα μέτρηση που προκύπτει, παρέχει βέλτιστη εκτίμηση των μεταβλητών του συστήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται κάθε φορά το ποσοστό του σφάλματος.

Το φίλτρο Kalman, ωστόσο, είναι σχεδιασμένο ώστε να λύνει γραμμικά προβλήματα στην πιο απλή τους μορφή και για το λόγο αυτό σπάνια χρησιμοποιείται στην επίλυση του αλγορίθμου SLAM. Για τέτοιες εφαρμογές, οι οποίες είναι μη γραμμικές, γίνεται χρήση του εκτεταμένου φίλτρου Kalman (Extended Kalman Filter) το οποίο διαμορφώνει, σε μεγάλο βαθμό, γραμμικά την τελευταία μέση τιμή και τη διακύμανση (Ullah et al, 2020).

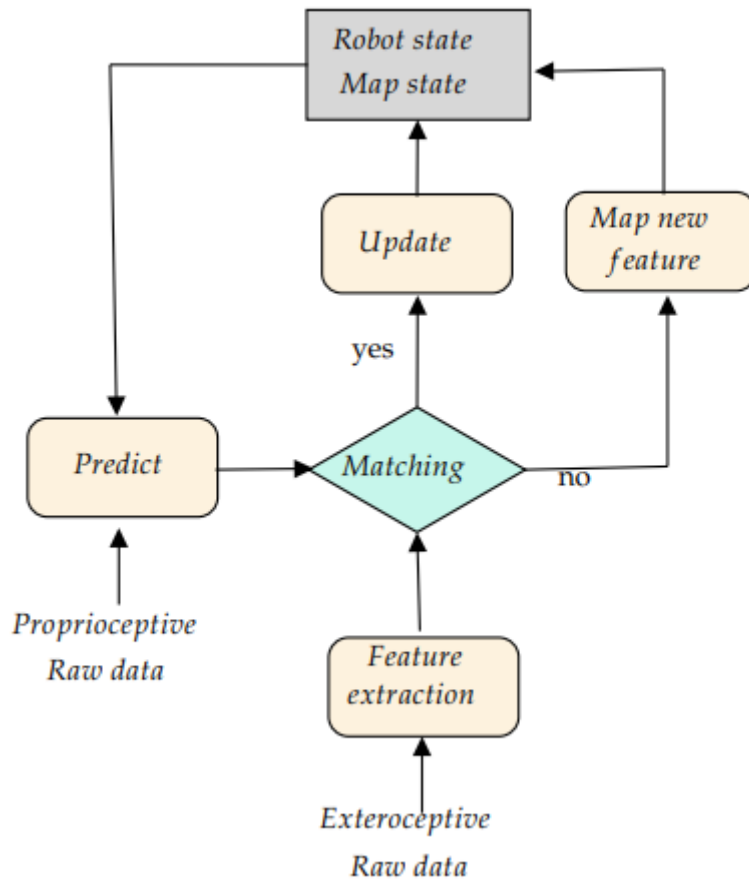
Το Extended Kalman Filter δείχνει την πιθανότητα μετάβασης της κατάστασης και την πιθανότητα μέτρησης με δύο μη γραμμικές συναρτήσεις g και h οι οποίες υπάρχουν στο μοντέλο κίνησης και το μοντέλο παρατήρησης ως εξής:

$$x_{k+1} = g(x_k, u_{k+1}) + w_{k+1} \quad (\text{μοντέλο κίνησης})$$

$$z_{k+1} = h(x_{k+1}) + v_{k+1} \quad (\text{μοντέλο παρατήρησης})$$

όπου οι μεταβλητές w_{k+1} και v_{k+1} περιγράφουν ανεξάρτητα συμβάντα με μηδενική μέση τιμή και συμμεταβλητότητα (λευκός θόρυβος). Προκειμένου το φίλτρο EKF να γραμμικοποιήσει τις μη γραμμικές συναρτήσεις, χρησιμοποιεί σειρές Taylor πρώτης τάξης με αποτέλεσμα να προκύπτει μια γραμμική προσέγγιση για τις συναρτήσεις g και h μέσω της τιμής και της κλίσης τους. Ο βαθμός επιτυχίας της γραμμικής προσέγγισης είναι συνάρτηση του βαθμού της αβεβαιότητας καθώς και του βαθμού της μη γραμμικότητας των αρχικών συναρτήσεων.

Το προσαρμοσμένο αυτό φίλτρο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε τα πρώτα χρόνια εφαρμογής του αλγορίθμου SLAM, μειώνει την αβεβαιότητα και ταυτόχρονα πραγματοποιεί υπολογισμό της θέσης του οχήματος σε κάθε βήμα εφαρμογής του αλγορίθμου. Κάνοντας χρήση ενός πιθανοτικού μοντέλου, το φίλτρο EKF εγγυάται την απόδοση αξιόπιστου χάρτη. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε σφάλματα που σχετίζονται με τη λήψη των δεδομένων ενώ η συνεχής ενημέρωση με τα νέα σημεία από τα οποία περνάει το κινούμενο όχημα καθιστούν τη διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται πλέον με τη χρήση βέλτιστων τεχνικών όπως είναι η μέθοδος δέσμης. Παρ' όλα αυτά το φίλτρο EKF θεωρείται καλό εργαλείο στην περίπτωση που συνδυάζονται δεδομένα από πολλούς αισθητήρες εξαιτίας του γεγονότος ότι κάνει χρήση στατιστικών μέτρων αβεβαιότητας για την αξιολόγηση του κάθε αισθητήρα καθώς και την απόδοση σχετικού βάρους κατά την τελική επίλυση.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση της διαδικασίας EKF-SLAM. Όταν τα δεδομένα συλλέγονται κατά την εφαρμογή του EKF σε χρόνο t προβλέπεται η θέση του οχήματος στο χρόνο αυτό και ταυτόχρονα τα χαρακτηριστικά σημεία που ανιχνεύονται ταυτίζονται με τα αντίστοιχα του χάρτη. Η συνταύτιση των σημείων επιτρέπει την ανανέωση του χάρτη κάθε χρονική στιγμή. Αν προκύψουν χαρακτηριστικά σημεία, τα οποία δεν ανιχνεύονται στο χάρτη, τότε η διαδικασία ξεκινάει πάλι από την αρχή και επαναλαμβάνεται προοδευτικά (Debeunne et al, 2020).

4.4 Fast-SLAM

Ο αλγόριθμος Fast-SLAM ανήκει στην κατηγορία φίλτρων Particle (Particle Filters) και επέφερε θεμελιώδεις αλλαγές στο σχεδιασμό και την αντιμετώπιση του πιθανοτικού SLAM. Ο τρόπος λειτουργίας του επικεντρώνεται στη χρήση σωματιδίων (particles) για να περιγράψει την κατάσταση χαρακτηριστικών σημείων, από τα οποία προκύπτει ατομικός χάρτης που θεωρείται ανεξάρτητος. Έτσι το πρόβλημα της χαρτογράφησης αντιμετωπίζεται ξεχωριστά με κάθε νέο σημείο που εισάγεται κατά την κίνηση του ρομπότ ενώ ο προσδιορισμός της θέσης τους πραγματοποιείται με εφαρμογή EKF.

Το πρώτο πλεονέκτημα που προκύπτει από την εφαρμογή του αλγορίθμου Fast-SLAM είναι ότι ο θόρυβος από την κίνηση του οχήματος δεν επηρεάζει την ακρίβεια των δεδομένων και το δεύτερο επισημαίνει ότι αν κάποιες παρατηρήσεις δεν συσχετίζονται σε κάποια σωματίδια, τότε αυτά έχουν μικρότερα ποσοστά πιθανοτήτων και δεν λαμβάνονται υπόψη στα επόμενα βήματα της επίλυσης. Επίσης τα φίλτρα Particle περιγράφουν επαρκώς μη-γραμμικά μοντέλα κίνησης ή μοντέλα που περιγράφονται με Γκαουσιανές κατανομές.

Ο αλγόριθμος Fast SLAM υπολογίζει ολόκληρη την τροχιά του κινούμενου συστήματος ενώ πάνω σε αυτή αποδίδονται ανεξάρτητες θέσεις χαρακτηριστικών. Η λειτουργία του αλγορίθμου περιγράφεται ως εξής:

για η αριθμό σωματιδίων, κάθε σωματίδιο αποτελείται από μία υπολογισμένη θέση του κινούμενου οχήματος x_t^k και μια ομάδα φίλτρων EKF με μέση τιμή $\mu_{i,t}^k$ και συμμεταβλητότητα $\Sigma_{j,t}^k$.

Τα στάδια επίλυσης του αλγορίθμου, τα οποία επαναλαμβάνονται κατά τη διάρκεια της επίλυσης η φορές είναι τα παρακάτω:

(α) Η ανάκτηση (retrieval), όπου η θέση του οχήματος x_{t-1}^k ανακτάται από την ομάδα των σωματιδίων Y_{t-1}^k .

(β) Η πρόβλεψη (prediction), όπου η θέση του οχήματος προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση $x_t^k \sim p(x_t | x_{t-1}^k, u_t)$.

(γ) Η ενημέρωση της μέτρησης (observation update) κατά την οποία για κάθε παρατήρηση z_t^i ενός χαρακτηριστικού υπάρχει ένα χαρακτηριστικό θ_j του χάρτη και η παρατήρηση περιλαμβάνεται στο φίλτρο EKF με ταυτόχρονη ενημέρωση της μέσης τιμής $\mu_{j,t}^k$ και της συμμεταβλητότητας $\Sigma_{j,t}^k$.

(δ) Το βάρος w^k (importance weight), το οποίο υπολογίζεται για κάθε νέο σωματίδιο.

(ε) Η επανάληψη της δειγματοληψίας (resampling) συναρτήσει των συντελεστών βάρους.

(στ) Η κατανομή του δείγματος των η σωματιδίων βάσει του πιθανοτικού μοντέλου κίνησης (Montemerlo et al, 2003).

Ο αλγόριθμος Fast SLAM λειτουργεί με διάφορες παραλλαγές ανάλογα με τις αντιστοιχίες των παρατηρήσεων z_t^i ενός χαρακτηριστικού και των χαρακτηριστικών θ_j του χάρτη ή με τον τρόπο αναπαράστασης των χαρακτηριστικών. Στην πρώτη περίπτωση περιγράφεται η υπόθεση γνωστών αντιστοιχιών, η οποία μπορεί μεν να αποτελεί σπάνια μορφή του αλγορίθμου, είναι όμως η περισσότερο εξηγηματική της λειτουργίας αυτού καθώς και η υπόθεση των άγνωστων αντιστοιχιών που περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές συσχέτισης δεδομένων όπως αυτή της μέγιστης πιθανότητας. Η δεύτερη περίπτωση παρουσιάζει την αναπαράσταση των οροσίων landmarks ως ευθειών (Montemerlo et al, 2003).

4.5 Συνδυασμός LiDAR και VISUAL SLAM

Τα τελευταία χρόνια, αντικείμενο μελέτης όσον αφορά στους αλγορίθμους SLAM αποτελεί ο τομέας της επίτευξης της αυτονομίας του κινούμενου οχήματος που χρησιμοποιείται σε μία εφαρμογή. Τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα χρησιμοποιούν τεχνολογία LiDAR ή/και φωτογραφικές μηχανές προκειμένου να λάβουν πληροφορία για το υπό μελέτη περιβάλλον. Τέτοιου τύπου συστήματα έχουν ενσωματωμένες συσκευές D-GPS (Differential GPS) και SBAS (Satellite Based Augmentation Systems) όταν το επιτρέπει η εκάστοτε εφαρμογή ή Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης (IMU), όταν δεν υπάρχει κάλυψη από δορυφόρους. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση εφαρμογών σε εξωτερικό περιβάλλον, τα συστήματα GNSS δεν είναι πάντα αξιόπιστα με αποτέλεσμα η ακρίβεια του μοντέλου να είναι της τάξης μερικών εκατοστών. Για το λόγο αυτό, εξελιγμένες τεχνικές συνδυασμού φωτογραφικών μηχανών και LiDAR, μαζί με αισθητήρες IMU ελαττώνουν σημαντικά την πιθανότητα απόκλισης εξαιτίας σωρευτικών σφαλμάτων κατά την εφαρμογή.

Ο συνδυασμός των δύο αυτών αισθητήρων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς ο κάθε ένας από αυτούς λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο με αποτέλεσμα ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων τους να υπερέχει σε απόδοση. Για παράδειγμα, οι σαρωτές laser είναι σημαντικοί όσον αφορά στην ανίχνευση αντικειμένων σε έναν χώρο αλλά παράλληλα θεωρούνται ευαίσθητοι σε καιρικές συνθήκες όπως είναι η βροχή, ενώ από την άλλη οι κάμερες

χρησιμοποιούνται για τη σημασιολογική αναπαράσταση του χώρου αλλά δεν μπορούν να λειτουργήσουν κάτω από συνθήκες ελλιπούς φωτισμού. Συνεπώς ο συνδυασμός των δύο θα μπορούσε να εξισορροπήσει τα μειονεκτήματα του κάθε αισθητήρα και να μειώσει αισθητά την αβεβαιότητα που προκύπτει για κάθε σημείο από το οποίο περνάει το κινούμενο όχημα και κατ' επέκταση να περιορίσει την απόκλιση του τελικού μοντέλου. (Debeunne et al, 2020)

Προτού παρουσιασθεί εκτενώς η περίπτωση του συνδυασμού αισθητήρων LiDAR και καμερών ως δούμε την κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

4.6 VISUAL SLAM

Η μέθοδος visual-SLAM είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στον τομέα της χαρτογράφησης με ταυτόχρονο εντοπισμό θέσης και θεωρείται τεχνική στην αιχμή της τεχνολογίας καθώς η όραση αποτελεί το βασικό μέσο αντίληψης του κόσμου γύρω μας. Είναι γνωστό ότι το ανθρώπινο μάτι μπορεί να αντιληφθεί δύο μόνο διαστάσεις ενώ η τρίτη που αφορά στο βάθος των αντικειμένων ανακτάται μέσω μιας σειράς διαδικασιών στις οποίες προβαίνει ο εγκέφαλος και αφορούν κυρίως υπολογισμούς της διαφορετικής παρατήρησης μεταξύ των δύο οφθαλμών. Η ικανότητα λοιπόν του ανθρώπου να βλέπει τρισδιάστατα, προέρχεται από την αποθηκευμένη εμπειρία τού εγκεφάλου για τα αντικείμενα που παρακολουθεί. Στην ανθρώπινη αυτή λειτουργία, ουσιαστικά, βασίζεται και η Όραση Υπολογιστών κατά τη διαδικασία ανακατασκευής του τρισδιάστατου χώρου, διαδικασία κατά την οποία, οι μικρές διαφορές που μπορεί να έχουν δύο εικόνες καθώς επίσης και η χρήση των κατάλληλων γεωμετρικών μοντέλων, μπορούν να ανακτήσουν την τρίτη διάσταση του βάθους.

Ο αλγόριθμος V-SLAM στοχεύει στον σταδιακό υπολογισμό των διαδοχικών θέσεων της κάμερας μέσω παρατήρησης της κίνησης των pixel σε μια ακολουθία εικόνων. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με διαφορετικούς τρόπους. Μία πρώτη προσέγγιση, γνωστή και ως feature based visual-SLAM, αναφέρεται στην ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων από εικόνα σε εικόνα. Άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η χρήση RGB-D ή ToF (Time of Flight) φωτογραφικών μηχανών, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα απόδοσης και της τρίτης διάστασης του βάθους καθώς και κάμερες συμβάντων (event cameras), που ανταποκρίνονται στις τοπικές αλλαγές της φωτεινότητας (Debeunne et al, 2020).

Ο αλγόριθμος V-SLAM προτείνεται ιδιαίτερα στην επίλυση προβλημάτων όπου δεν παρουσιάζονται έντονες διαφοροποιήσεις στο περιβάλλον χαρτογράφησης, τόσο ως προς τα αντικείμενα όσο και ως προς την υφή αυτών, δεδομένου ότι ο εντοπισμός των χαρακτηριστικών σημείων γίνεται μέσα από εικόνες.

Για την καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου V-SLAM, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί το πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργεί ο εν λόγω αλγόριθμος, το οποίο ουσιαστικά περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια (Taketomi et al, 2017):

- **Initialization:** για την έναρξη λειτουργίας του αλγορίθμου είναι απαραίτητο να ορισθεί ένα συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων για τον υπολογισμό των θέσεων της κάμερας καθώς και για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου.
- **Tracking:** το τμήμα του χάρτη που έχει ήδη δημιουργηθεί, εντοπίζεται στην τρέχουσα εικόνα με σκοπό τον εντοπισμό της θέσης της μηχανής τη στιγμή της λήψης πάντα σε σχέση με το χάρτη. Το βήμα αυτό διενεργείται με αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων ανάμεσα στην εικόνα και τον χάρτη.
- **Mapping:** ο χάρτης δημιουργείται προοδευτικά υπολογίζοντας τη δομή του τρισδιάστατου χώρου όταν η κάμερα λαμβάνει πληροφορία από άγνωστη περιοχή όπου δεν έχει χαρτογραφηθεί

ακόμα.

➤ **Relocalization:** σε κάποιες περιπτώσεις όπου το στάδιο του διαδοχικού εντοπισμού αποτυγχάνει, κυρίως εξαιτίας της γρήγορης κίνησης της κάμερας, είναι απαραίτητο να γίνει επαναεντοπισμός της θέσης του κινούμενου οχήματος, πάντα σε συνάρτηση με το χάρτη.

➤ **Global map optimization:** ο χάρτης που έχει δημιουργηθεί μέχρι στιγμής περιλαμβάνει ένα σωρευτικό σφάλμα, το οποίο προκύπτει από τον υπολογισμό της απόστασης που έχει διανύσει το κινούμενο όχημα. Προκειμένου αυτός να βελτιστοποιηθεί, χρησιμοποιείται η τεχνική του κλεισίματος βρόχου (loop closing). Ένας κλειστός βρόχος δημιουργείται όποτε η κάμερα αναγνωρίζει ότι έχει περάσει ξανά από κάποια αρχική περιοχή που έχει αποδοθεί στον χάρτη. Κατά τον εντοπισμό τέτοιων βρόχων υπολογίζεται το σφάλμα στην κίνηση του οχήματος. Στο στάδιο αυτό της διαδικασίας χρησιμοποιείται η ίδια τεχνική με το αμέσως προηγούμενο στάδιο του επανεντοπισμού. Ουσιαστικά, ο επανεντοπισμός διενεργείται για την ανίχνευση της θέσης της κάμερας ενώ ο εντοπισμός των κλειστών βρόχων διενεργείται για την απόκτηση ενός χάρτη με γεωμετρική ακρίβεια.

Οι εφαρμογές V-SLAM διενεργούνται με πολλαπλούς τρόπους ανάλογα με τους αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή της πληροφορίας και βάσει αυτών χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

■ Feature based SLAM

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος SLAM στηρίζεται στην ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων (feature points) και χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος δέσμης ή μέθοδος με φίλτρα. Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών σημείων και ταυτόχρονα της θέσης του ρομπότ που πραγματοποιείται με φίλτρο EKF έχει περιορισμένες δυνατότητες σε περιπτώσεις μεγάλων χώρων διότι απαιτείται η λήψη πολλών εικόνων και κατά συνέπεια αυξάνει ο χρόνος υπολογισμού. Αντίθετα, η μέθοδος δέσμης χρησιμοποιεί την ανίχνευση επαναλαμβανόμενων κλειστών βρόχων προκειμένου να γίνει ανίχνευση των keyframes που υπάρχουν ήδη.

■ Direct SLAM

Σε αντίθεση με την παραπάνω μέθοδο, η προσέγγιση direct SLAM χρησιμοποιεί απευθείας μία εικόνα χωρίς τη χρήση ανιχνευτή χαρακτηριστικών σημείων (feature points) και περιγραφέντων. Μία τέτοια προσέγγιση πραγματοποιεί αλληλοαναφορά (registration) σε δύο συνεχόμενες φωτογραφίες βασισμένη στα γεωμετρικά στοιχεία των feature points, όμως θεωρείται ιδιαίτερα χρονοβόρα.

■ RGB-D SLAM

Οι αισθητήρες RGB-D βασίζονται στο δομημένο φως (πρόκειται για διαδικασία προβολής ενός τυποποιημένου σχεδίου εικονοστοιχείων σε μία επιφάνεια) και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους και του μικρού μεγέθους τους. Έχουν τη δυνατότητα απόδοσης του τρισδιάστατου χώρου σε πραγματικό χρόνο αλλά ενδείκνυται κυρίως για εφαρμογές εσωτερικού χώρου καθώς είναι ευαίσθητοι στο φυσικό φως και επίσης το εύρος χρήσης τους κυμαίνεται περίπου στα 5m.

VISUAL BASED SLAM			
	Feature based	Direct	RGB-D
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Μικρό μέγεθος • Μικρό βάρος • Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν απαιτείται ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων • Απόδοση semi-dense* χάρτη 	<ul style="list-style-type: none"> • Απόδοση της διάστασης του βάθους στον τελικό χάρτη • Άμεση ανίχνευση του βάθους
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Ευαίσθητη σε θέματα υψής και φωτισμού 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλο υπολογιστικό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Ευαίσθητη στο φυσικό φως • Αποδίδει σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου • Μεγάλος όγκος δεδομένων • Αποδίδει σε περιορισμένες κλίμακες

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά μεθόδων εφαρμογής V-SLAM ανάλογα με τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται

* Χάρτης που δεν περιλαμβάνει τη διάσταση του βάθους για κάθε pixel του στερεοζεύγους παρά μόνο για μερικά υποσύνολα κινούμενων pixel.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω ο τομέας της έρευνας της μεθόδου Visual SLAM είναι ευρύς και ανατρέχοντας κανείς στην παγκόσμια βιβλιογραφία μπορεί να εντοπίσει ακόμα περισσότερες μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος SLAM. Ωστόσο, δύο είναι οι βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνεται το V-SLAM:

4.6.1 Στερεοσκοπικό SLAM (Stereo-Vision SLAM)

Στην περίπτωση αυτή οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των αντικειμένων στον χώρο του κινούμενου συστήματος (ρομπότ), προκύπτουν από την συνταύτιση εικονοσημείων σε στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων.

Η πλειοψηφία των εφαρμογών SLAM βασίζεται σε δεδομένα τα οποία αποδίδουν τρισδιάστατη πληροφορία του κάθε ορόσημου σε πραγματικό χρόνο με αποτέλεσμα να μπορεί να παρατηρείται διαρκώς η απόσταση του ρομπότ από το κάθε ορόσημο. Το γεγονός ότι είναι γνωστό το σχήμα του κάθε χαρακτηριστικού αντικειμένου στο χώρο καθιστά την παραπάνω διαδικασία εφικτή.

Ορίζοντας ως σημείο αναφοράς το ρομπότ, η κατάσταση των παρατηρούμενων αντικειμένων μπορεί να υπολογισθεί από μία μόνο παρατήρηση. Με άλλα λόγια, ένα χαρακτηριστικό σημείο μετατρέπεται σε ορόσημο (με τρεις διαστάσεις) από την συνταύτιση των χαρακτηριστικών σημείων σε δύο εικόνες. Η επίλυση του προβλήματος επέρχεται με εφαρμογή εκτεταμένου φίλτρου Kalman, στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα από τις παρατηρήσεις του ρομπότ (Lemaire et al, 2007).

4.6.2 Μονοσκοπικό SLAM (Monocular-Vision SLAM)

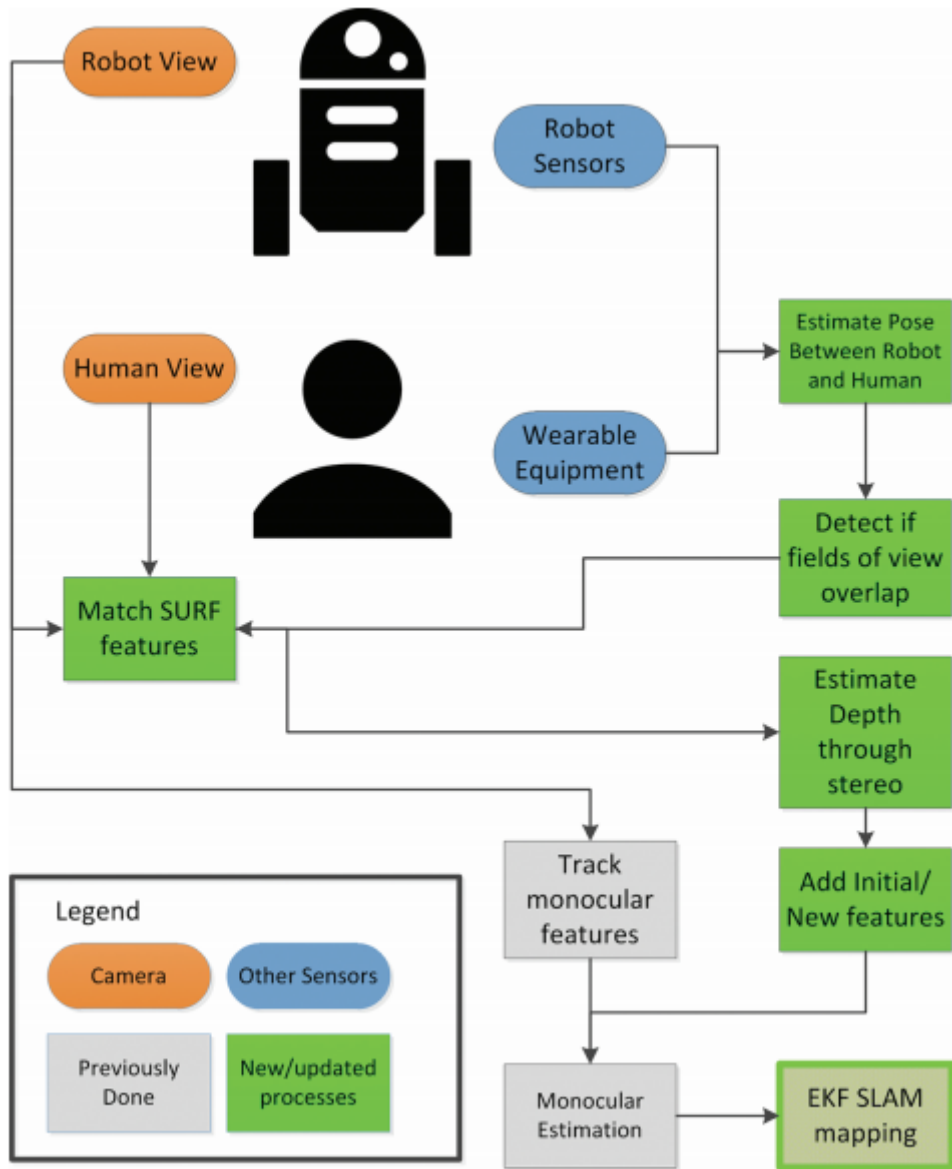
Η τεχνική V-SLAM με χρήση μίας μόνο κάμερας (monocular camera) άρχισε να χρησιμοποιείται τη δεκαετία του 2000 και αρχικά βασιζόταν στον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση χαρακτηριστικών σημείων (feature-based approach). Στη συνέχεια, ο εν λόγω αλγόριθμος εξελίχθηκε με αποτέλεσμα ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση να διενεργούνται απ' ευθείας από μία εικόνα (direct approach) ενώ αργότερα με την εμφάνιση των αισθητήρων RGB-D προτάθηκαν αλγόριθμοι V-SLAM, οι οποίοι προβαίνουν στην επίλυση του προβλήματος συνδυάζοντας μονοσκοπικές

εικόνες και μέτρηση του βάθους της εικόνας (RGB-D camera-based approach) (Taketomi et al, 2017).

Κατά την εφαρμογή μονοσκοπικού V-SLAM, ο αισθητήρας δεν είναι σε θέση να αποδώσει επαρκή πληροφορία ούτως ώστε να υπολογισθεί η πλήρης κατάσταση ενός ορόσημου από μία μόνο παρατήρηση, οπότε η πληροφορία εξάγεται από πολλαπλές παρατηρήσεις οι οποίες συνδυάζονται από διαφορετικές στάσεις του ρομπότ.

Αρχικά, σε εφαρμογές χαρτογράφησης με εναέρια ρομποτικά συστήματα, σε περιβάλλοντα όπου δεν είναι εφικτή η χρήση GPS, θεωρείται απαραίτητη η ενσωμάτωση επιπλέον αισθητήρων στην ήδη υπάρχουσα Αδρανειακή Μονάδα προκειμένου να επιτευχθεί αυτονομία του ρομποτικού συστήματος σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Ένα ρομποτικό σύστημα θεωρείται αυτόνομο, όταν μπορεί να ανιχνεύει τη θέση του, ταυτόχρονα να μπορεί να δημιουργήσει χάρτη του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται και παράλληλα να γνωρίζει τη νέα του θέση την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή. Οι οπτικοί αισθητήρες αποτελούν μια καλή εναλλακτική λύση για αυτόνομη πλοήγηση με απουσία GPS εξαιτίας του μειωμένου τους κόστους, του χαμηλού τους βάρους και της αξιοπιστίας που παρέχουν από άποψη πληροφορίας (Wang et al, 2013).

Πιο αναλυτικά, προκειμένου να υπολογισθούν οι θέσεις και η κίνηση του οχήματος από τα δεδομένα της κάμερας που βρίσκεται ενσωματωμένη σε αυτό, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ομογραφίας στην περίπτωση επίπεδου αντικειμένου και η μέθοδος επίλυσης πινάκων (essential ή fundamental matrix) για μη-επίπεδο αντικείμενο. Όταν δύο εικόνες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, μία ομογραφία χρησιμοποιείται για να χαρτογραφήσει τη μία εικόνα ως προς την άλλη. Η διαδικασία αυτή διενεργείται με εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε εικόνα για να γίνει η αντιστοιχία μεταξύ τους (SIFT, SURF), στη συνέχεια το σύνολο των λανθασμένων αντιστοιχιών (outliers) δεν λαμβάνονται υπόψη προκειμένου ένας ακόμα αλγόριθμος (RANSAC) να ξεχωρίσει το σύνολο των χαρακτηριστικών σημείων (inliers) με σκοπό να προσδιοριστούν οι παράμετροι του μοντέλου της κίνησης με έξι βαθμούς ελευθερίας. Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις που έχει λάβει η Αδρανειακή Μονάδα, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την εφαρμογή του εκτεταμένου φίλτρου Kalman (EKF). Η ανανέωση των μετρήσεων ξεκινάει κάθε φορά όταν ολοκληρώνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων της κίνησης από τις εικόνες σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Έτσι υπολογίζονται οι θέσεις του UAV κάθε χρονική στιγμή καθώς και τα σημεία ορόσημα στο χώρο (Wang et al, 2013). Κατά την περίπτωση μη επίπεδου αντικειμένου, οι θέσεις του οχήματος υπολογίζονται με τη χρήση πινάκων (essential ή fundamental matrix), οι οποίοι περιγράφουν τη γεωμετρική σχέση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά σημεία ενός στερεοσκοπικού ζεύγους καμερών (Mur-Artal et al, 2015).



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα ροής monocular EKF-SLAM με ρομπότ το οποίο έχει ενσωματωμένους τους κατάλληλους αισθητήρες και την ανθρώπινη παρουσία με κράνος πάνω στο οποίο είναι επίσης προσαρτημένοι αισθητήρες, ο συνδιασμός των οποίων αυξάνει δραματικά την απόδοση του συστήματος (Guerra et al, 2016).

Η προσέγγιση αυτή όπως εφαρμόστηκε από τους Wang et al. (2013) παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα που αφορά στην τιμή της επιτάχυνσης που λαμβάνεται από την Αδρανειακή Μονάδα (IMU), η οποία παρουσιάζει μία απόκλιση που είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ενώ συγχρόνως εμφανίζεται και μια απόκλιση στον υπολογισμό της κλίμακας. Το εν λόγω πρόβλημα κατάφεραν να ξεπεράσουν οι Urzua et al (2017) σε αντίστοιχη εφαρμογή του αλγορίθμου Visual-SLAM με χρήση συστήματος το οποίο περιλαμβάνει monocular camera τοποθετημένη έτσι ώστε να κοιτάει προς τα κάτω, αισθητήρα υπερήχων για τον υπολογισμό της κλίμακας και ένα βαρόμετρο για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή αντί για IMU χρησιμοποιεί βαρόμετρο για τον υπολογισμό της μεταβολής του ύψους του δαπέδου σε σχέση με το UAV ως συνάρτηση της μεταβολής της ατμοσφαιρικής πίεσης. Επιπλέον αποδεικνύεται ότι στην εφαρμογή των Urzua et al (2017), η χρήση βαρόμετρου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να βελτιώσει το αποτέλεσμα των

παρατηρήσεων της μετρητικής κλίμακας η οποία σε αντιδιαστολή με τα αποτελέσματα του επιταχυνσιόμετρου παρουσιάζεται μικρότερη. Το βαρόμετρο άλλωστε χρησιμοποιείται ευρέως ως αισθητήρας Αδρανειακού Συστήματος Πλοήγησης (INS) με σκοπό τη μείωση του σφάλματος.

4.7 LiDAR SLAM

Οι σαρωτές laser θεωρούνται ο ακρωγωνιαίος λίθος τόσο των δισδιάστατων όσο και των τρισδιάστατων χαρτογραφήσεων. Το LiDAR αποτελεί τεχνολογία που εύκολα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την εφαρμογή της τεχνικής SLAM λόγω του νέφους σημείων που αποδίδει.

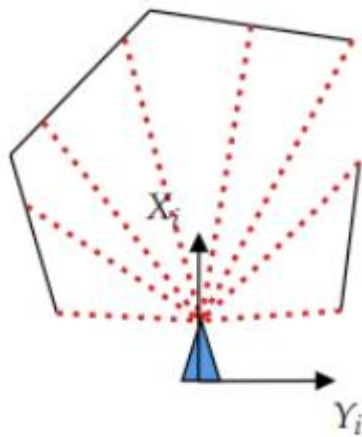
Οι πρώτες απόπειρες επίλυσης του προβλήματος SLAM με συσκευή LiDAR περιελάμβαναν έναν σαρωτή laser, ο οποίος τοποθετούνταν σε διαφορετικά σημεία του προς αποτύπωση χώρου. Με τον τρόπο αυτό, ενώ μπορούσε κανείς να αποφύγει τυχόν παραμορφώσεις λόγω της κίνησης, δεν είχε επαρκή δεδομένα για εφαρμογές πλοήγησης. Το εν λόγω πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την ενσωμάτωση μονάδων IMU στα κινούμενα συστήματα LiDAR, οι οποίες αρχικά παρέχουν τη δυνατότητα διόρθωσης παραμορφώσεων της κίνησης δημιουργώντας ένα μοντέλο αυτής με δεδομένη την ταχύτητα του κινούμενου οχήματος και, δευτερευόντως, είναι σε θέση να υπολογίζουν την τροχιά της κίνησης.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται την τελευταία δεκαετία στις εφαρμογές πλοήγησης με LiDAR παραμένει η ίδια. Η αντιμετώπιση, ωστόσο, του προβλήματος SLAM χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: στην προσέγγιση της συνταύτισης των σαρώσεων (scan matching) μέσω της βελτιστοποίησης γραφήματος (graph optimization) και στη χρήση φίλτρων particle σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο χάρτη πλήρωσης (occupancy grid map) [Debeunne et al, 2020].

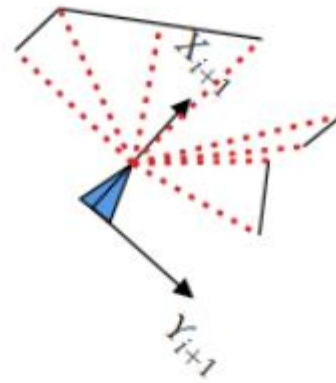
4.7.1 Συνταύτιση σαρώσεων (Scan-Matching) και βελτιστοποίηση γραφήματος (Graph Optimization)

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία συνταύτισης σαρώσεων με LiDAR θεωρείται θεμελιώδης για τη δημιουργία τρισδιάστατου χάρτη εν κινήσει αποδίδοντας μεγάλη ακρίβεια στο τελικό μοντέλο. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της αλληλοαναφοράς είναι ο ICP (Iterative Closest Point), ο οποίος θεωρείται ιδιαίτερα εύρωστος, ιδιότητα που μπορεί να ενισχυθεί αν λάβει κανείς υπόψη τα επίπεδα αντικείμενα που υπάρχουν στις σαρώσεις (planar structures of scans). Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος PSM (Polar Scan Matching), ο οποίος λειτουργεί βάσει των πολικών συντεταγμένων που καταγράφονται από το laser scanner και πραγματοποιεί συνταύτιση σημείων αντί για νέφους σημείων.

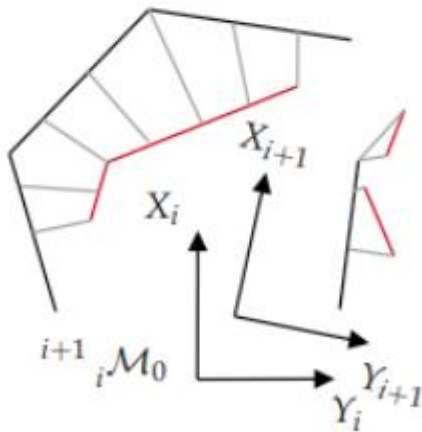
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη συνόρθωση ενός γραφήματος προκειμένου να ελαττωθούν τα σφάλματα από την κίνηση του ρομπότ. Ουσιαστικά, η τροχιά του κινούμενου συστήματος (θέση και στροφές) αναπαρίσταται μέσω ενός γραφήματος, όπου κάθε κόμβος αναπαριστά μία μέτρηση του αισθητήρα (σάρωση) από συγκεκριμένη θέση, και οι ακμές που ενώνουν τους κόμβους αναπαριστούν τη δέσμευση που ορίζει η παρατήρηση (μετασχηματισμός μεταξύ δύο σαρώσεων μέσω ICP). Ενώ η μέθοδος αυτή επιτρέπει την εφαρμογή SLAM σε χώρους μεγάλης κλίμακας δεδομένης της εξίσου μεγάλης εμβέλειας που διαθέτει και χρησιμοποιεί ιδιαίτερα απλή διαδικασία κλεισίματος βρόχων, απαιτεί ακριβή υπολογισμό των ακμών μεταξύ των κόμβων.



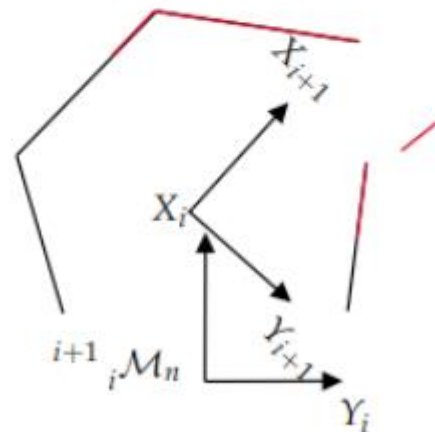
Σάρωση σε χρόνο i



Σάρωση σε χρόνο $i+1$



Πρώτη υπόθεση μετασχηματισμού και αναζήτηση της κοντινότερης γειτονιάς σημείων



Τελικός μετασχηματισμός ύστερα από την μείωση της τελευταίας απόστασης

Εικόνα 4.4: Λειτουργία ICP αλγορίθμου, σύμφωνα με την οποία σε κάθε επανάληψη εξάγονται τα κοντινότερα σημεία ανάμεσα σε δύο σαρώσεις. Από τη συνταύτιση που πραγματοποιείται υπολογίζεται ένας μετασχηματισμός που εφαρμόζεται στην αμέσως επόμενη σάρωση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί ικανοποιητική λύση (Debeunne et al, 2020).

4.7.2 Χάρτης πλήρωσης (occupancy map) και φίλτρο particle

Από την άλλη η εφαρμογή φίλτρων σωματιδίων (particle filter) σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο χάρτη πλέγματος πλήρωσης (occupancy grid map) αποτελεί ακόμα μία μέθοδο επίλυσης του προβλήματος LiDAR SLAM. Στην περίπτωση αυτή κάθε σωματίδιο/σημείο αναπαριστά μία πιθανή θέση του ρομπότ στο χάρτη. Η μέθοδος αυτή, που θεωρείται ιδιαίτερα δημοφιλής, αποδίδει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας ιδιαίτερα για 2D εφαρμογές. Ωστόσο δεν ενδείκνυται για 3D εφαρμογές λόγω του τεράστιου αριθμού σωματιδίων που απαιτούνται για την κατασκευή του χάρτη με αποτέλεσμα η υπολογιστική δύναμη που χρειάζεται να μην είναι καθόλου αμελητέα.

Ακόμα ένα αρνητικό της μεθόδου αφορά στο κλείσιμο των βρόχων όπου και στην περίπτωση αυτή η διαδικασία καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη.

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία lidar χρησιμοποιείται ευρέως στην αποτύπωση σπηλαίων ενώ φημίζεται για την απόδοση υψηλής ανάλυσης τρισδιάστατη πληροφορία. Ωστόσο, παρά την υψηλή απόδοση που προσφέρει ο σαρωτής laser, η δυνατότητα χρήσης του εντός σπηλαίου περιορίζεται αφενός λόγω του μεγέθους του, καθώς η ανομοιογενής επιφάνεια του σπηλαίου και τα στενά περάσματα δεν ευνοούν τη χρήση τριπόδου που απαιτείται για τη λήψη μετρήσεων, και αφετέρου λόγω του υψηλού του κόστους.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων προσέγγισης του προβλήματος SLAM τόσο μέσω της βελτιστοποίησης γραφήματος όσο και μέσω της χρήσης του αλγόριθμου χάρτη πλήρωσης. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εφαρμογής, γίνεται και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

LiDAR BASED SLAM		
	Graph based	Occupancy map
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Επίλυση του SLAM σε μεγάλες κλίμακες • Η διαδικασία loop closing είναι ιδιαίτερα απλή 	<ul style="list-style-type: none"> • Δημοφιλής μέθοδος • Εύκολη κατά την εφαρμογή • Ιδιαίτερα ακριβής για 2D LiDAR
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτεί ακριβή στατιστικό υπολογισμό των κόμβων και των ακμών • Ο χάρτης αποτελεί προαιρετικό βήμα 	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε 3D εφαρμογές • Απαιτείται μνήμη τεράστιας χωρητικότητας για περιβάλλον μεγάλης κλίμακας • Το loop closing είναι δύσκολη διαδικασία

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά εφαρμογής LiDAR BASED SLAM ανάλογα με τις διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται

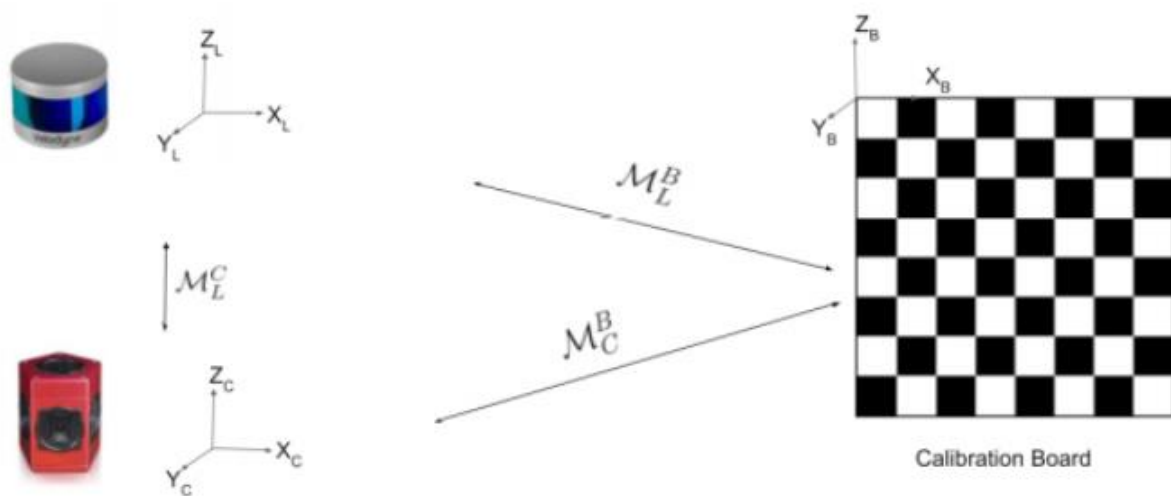
4.8 Visual-LiDAR SLAM

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η επίλυση του προβλήματος SLAM μπορεί να επιτευχθεί με επιτυχία τόσο με οπτικούς αισθητήρες όσο και με αισθητήρα lidar παρά τα μειονεκτήματα που συνεπάγεται η χρήση της εκάστοτε μεθόδου. Ακόμα και αν το Visual-SLAM παρέχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεν μπορεί κανείς να παραβλέψει τη μικρή εμβέλεια στην περίπτωση χρήσης μίας μόνο κάμερας (monocular camera), τη δυσκολία υπολογισμού αξιόπιστου βάθους στην περίπτωση πολλών καμερών (stereo-vision), συχνά χρονοβόρα διαδικασία δημιουργίας του χάρτη (π.χ. μέσω feature-based SLAM), τη δυσκολία χρήσης αισθητήρων RGB-D σε εξωτερικό περιβάλλον ή σε χώρο ελλειπούς φωτισμού κ.α.. Η προσέγγιση 3D LiDAR SLAM, από την άλλη, προτείνει λύσεις οι οποίες επικεντρώνονται στην ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων στο χώρο αλλά τα νέφη σημείων που παράγονται δεν είναι ιδιαίτερα πυκνά ούτως ώστε να θεωρούνται επαρκή. Όπως και να έχει όμως, δεν μπορεί κάποιος να αγνοήσει το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου που αφορά στη μεγάλη εμβέλεια που διαθέτει και στην επίσης μεγάλη ακρίβεια του τελικού χάρτη.

Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός των δύο αυτών καλά μελετημένων προσεγγίσεων θα αποτελούσε κλειδί στις σύγχρονες εφαρμογές σε περιβάλλοντα συγκεκριμένων ιδιοτήτων και απαιτήσεων. Ωστόσο ο συνδυασμός τους απαιτεί την προσαρμογή κάποιων ενδιάμεσων βημάτων τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

4.8.1 Βαθμονόμηση των αισθητήρων

Το βήμα αυτό είναι σίγουρα απαραίτητο και μεγάλης βαρύτητας για να προκύψει η βέλτιστη ακρίβεια του συστήματος. Η βαθμονόμηση των δύο αισθητήρων (σχετικός μετασχηματισμός μεταξύ τους) μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε offline είτε online. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει χειροκίνητη μέτρηση κοινών σημείων μεταξύ κάμερας και lidar ή αυτόματη βαθμονόμηση όπου πραγματοποιείται εξαγωγή ευθειών με σκοπό να υπολογιστεί ο βέλτιστος μετασχηματισμός μεταξύ των δύο αισθητήρων. Σε κάθε περίπτωση σημειώνεται ότι η offline τεχνική δεν είναι σε θέση να αποδώσει βέλτιστη βαθμονόμηση καθώς οι εξωτερικές παράμετροι μπορεί συχνά να μεταβληθούν ενώ απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες στο περιβάλλον εργασίας.



Εικόνα 4.5: Αρχή λειτουργίας εξωτερικής βαθμονόμησης. Στόχος είναι να βρεθεί ο μετασχηματισμός M_{CL} ανάμεσα στο LiDAR και την κάμερα. (Debeunne et al, 2020)

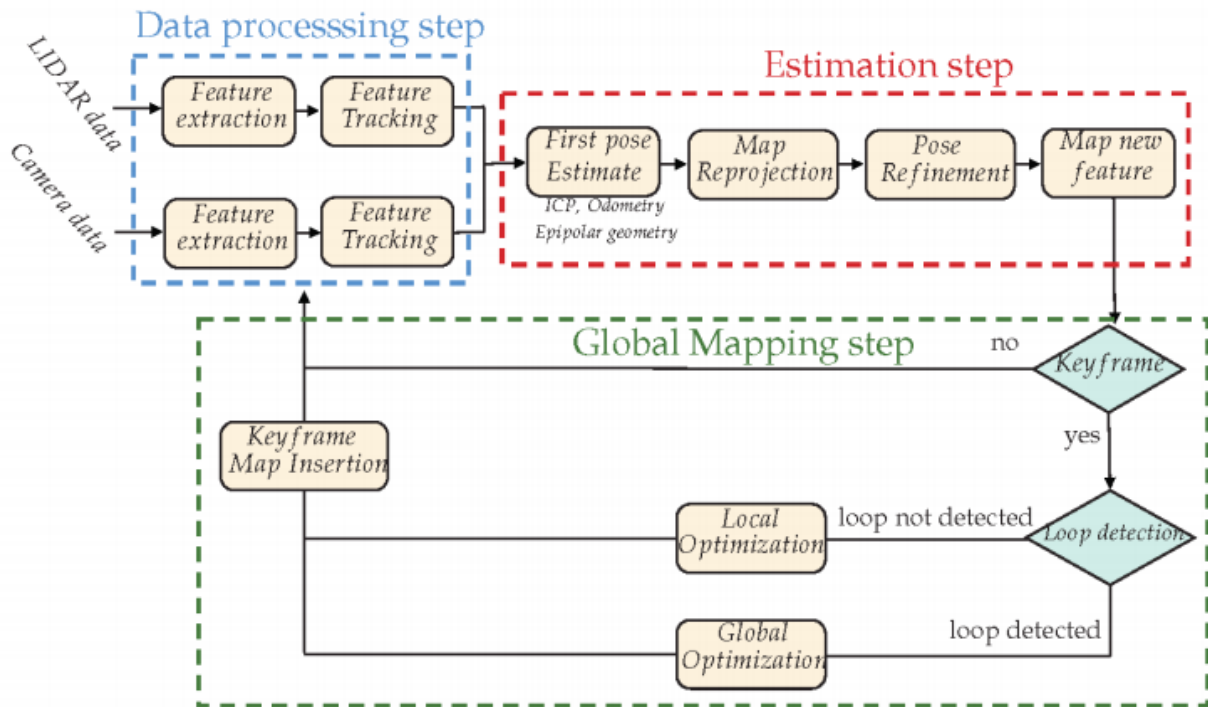
Μία από τις online τεχνικές βαθμονόμησης από την άλλη, βασίζεται στην εφαρμογή ενός Συνελκτικού Νευρωνικού Δικτύου (Convolutional Neural Network). Το CNN χρησιμοποιεί ως δεδομένα τις αποκλίσεις μεταξύ της κάμερας και του LiDAR και εξάγει (output) ακριβείς παραμέτρους βαθμονόμησης σε πραγματικό χρόνο.

4.8.2 Προσαρμογή του φίλτρου EKF

Έχει αποδειχθεί ότι το φίλτρο EKF μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί κατά την επίλυση του προβλήματος Visual-LiDAR SLAM.

Οι Liu et al. (2013) προτείνουν μια διαφορετική προσέγγιση χρήσης του φίλτρου EKF σύμφωνα με την οποία, αρχικώς, γίνεται ένας συσχετισμός των δεδομένων και από τους δύο αισθητήρες με αποτέλεσμα να αποδίδεται μεγαλύτερη ακρίβεια στο τελικό αποτέλεσμα της εφαρμογής SLAM. Οι Xu et al. (2018) παρουσιάζουν επίσης εφαρμογή της μεθόδου SLAM με συνδυασμό κάμερας RGB-D και LiDAR. Σκοπός τους είναι να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα που προκύπτει από την αστοχία ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων ανάμεσα στις εικόνες. Ουσιαστικά η λύση που προτείνουν δεν έχει να κάνει τόσο με συνδυασμό των δύο αισθητήρων, όσο με τη χρήση μηχανισμού που είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τον κάθε αισθητήρα ξεχωριστά επιλέγοντας κάθε

φορά πότε πρέπει να γίνει η εναλλαγή ανάμεσα στους δύο. Έτσι η θέση του LiDAR χρησιμοποιείται κάθε φορά για τον εντοπισμό του νέφους σημείων ενώ τα δεδομένα της κάμερας χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία 3D χάρτη. Τέλος οι Lopez et al (2017) ενσωματώνουν διαφορετικούς αλγορίθμους SLAM τελευταίας τεχνολογίας που βασίζονται σε δεδομένα όρασης και αδρανειακές μονάδες μέτρησης και με εφαρμογή του φίλτρου EKF επιχειρούν να λύσουν το πρόβλημα της χαρτογράφησης με ταυτόχρονο εντοπισμό. Το 2D LiDAR παράγει 2,5D χάρτη και είναι σε θέση να υπολογίζει την τροχιά του κινούμενου συστήματος.



Εικόνα 4.6: Το πλαίσιο λειτουργίας Visual-LiDAR SLAM το οποίο ακολουθεί τη δομή του κλασικού προβλήματος SLAM χωριζόμενο σε τρία στάδια: επεξεργασία δεδομένων, υπολογισμός, χαρτογράφηση. (Debeunne et al, 2020)

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ

Η ανακατασκευή του τρισδιάστατου χώρου σε πραγματικό χρόνο ταυτόχρονα με τον εντοπισμό της θέσης του κινούμενου συστήματος (SLAM), είναι μέθοδος η οποία παρουσιάζει μεγάλη ανταπόκριση στον τομέα της τεκμηρίωσης, διάσωσης, προστασίας και μελέτης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Οι λύσεις που προσφέρει η εξέλιξη της τεχνολογίας ποικίλουν, ενώ οι διαφορετικές προσεγγίσεις στη μέθοδο εφαρμογής εξαρτώνται κατά περίπτωση από το είδος της μελέτης που γίνεται (αρχαιολογική, γεωλογική κ.λπ.) ή του χώρου που ερευνάται (ιστορικό μνημείο, ανασκαφικό πεδίο εξωτερικού ή εσωτερικού χώρου κ.λπ.). Συνεπώς, η αποτελεσματικότητα της απεικόνισης ενός χώρου ενδιαφέροντος για την απόκτηση 3D δεδομένων αξιολογείται ανάλογα με την προσαρμογή της κάθε μεθόδου στις ανάγκες και τις απαιτήσεις του εκάστοτε περιβάλλοντος.

Αναφορικά με τον τρόπο κίνησης της πλατφόρμας πάνω στην οποία βρίσκονται τοποθετημένοι οι απαιτούμενοι αισθητήρες, τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε οχήματα εδάφους, αέρος ή θαλάσσης που κινούνται είτε ανεξάρτητα είτε με τη βοήθεια χειριστή που δίνει τις κατάλληλες εντολές και σε φορητές συσκευές τοποθετημένες σε τσάντες τύπου backpack ή τρόλεϊ ή απλά χειρός.



Εικόνα 5.1: Drone θαλάσσης, κινούμενη συσκευή χαρτογράφησης τοποθετημένη σε τσάντα backpack, ιπτάμενο drone

Σχετικά με τις μεθόδους χαρτογράφησης και τις αντίστοιχες συσκευές που χρησιμοποιούνται, στη συνέχεια παρουσιάζονται εφαρμογές αποτύπωσης σπηλαίων σε παγκόσμια κλίμακα με χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων τόσο με UAV όσο και με επίγειες κάμερες καθώς και με τεχνολογία LiDAR σε χειροκίνητες συσκευές και drone.

5.1 Χαρτογράφηση σπηλαίων με χειροκίνητη συσκευή LiDAR

Η περίπτωση του σπηλαίου Koonalda της Ν. Αυστραλίας

Οι Zlot & Bosse (2014) παρουσιάζουν τη διαδικασία χαρτογράφησης του σπηλαίου Koonalda στην περιοχή του Nullarbor στη Νότια Αυστραλία χρησιμοποιώντας χειροκίνητη πλατφόρμα με την ονομασία ZEBEDEE, η οποία περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο ένα 2D laser scanner υπέρυθρης ακτινοβολίας, το οποίο είναι αρκετά ελαφρύ ώστε να θεωρείται εύκολος ο χειρισμός του κατά τη διάρκεια της χαρτογράφησης.

Ο σαρωτής εκπέμπει παλμούς laser υψηλής συχνότητας, οι οποίοι αντανακλούν στις επιφάνειες του σπηλαιού και επιστρέφουν στον αισθητήρα. Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή του σήματος σε μετρήσεις απόστασης σε σχέση με το χρόνο που χρειάζεται το scanner για να λάβει τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές καλύπτουν πεδίο 270° καταγράφοντας 43.200 σημεία/δευτερόλεπτο ενώ το όργανο διαθέτει εμβέλεια 35m στο εσωτερικό της σπηλιάς και η ακρίβειά του εκτιμάται στα 1-3cm.

Στη συγκεκριμένη πλατφόρμα αυτό που θεωρείται καινοτόμο, τουλάχιστον για την εποχή του, είναι το γεγονός ότι το laser scanner είναι τοποθετημένο επάνω σε ελατήρια προκειμένου να γίνεται μετατροπή της κίνησης του χειριστή σε περιστροφική κίνηση του scanner. Ουσιαστικά, η ταλαντευόμενη κίνηση του scanner έχει σαν αποτέλεσμα το οπτικό πεδίο της συσκευής να εκτείνεται από 150° έως 180° με αποτέλεσμα να αποδίδεται η τρισδιάστατη άποψη του χώρου κάθε δευτερόλεπτο.

Πέραν της βασικής αυτής συσκευής, η πλατφόρμα περιλαμβάνει επίσης Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης για τον υπολογισμό της τροχιάς της και έναν φορητό Ηλεκτρονικό Υπολογιστή από όπου γίνεται ο χειρισμός των αισθητήρων.

Καθώς ο σαρωτής laser ταλαντεύεται πάνω στα ελατήρια, σαρώνει το χώρο καταγράφοντας μία σάρωση κάθε δευτερόλεπτο. Σε χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων έχει δημιουργηθεί επαρκής επικάλυψη ανάμεσα στις σαρώσεις με αποτέλεσμα να μπορούν να εντοπισθούν χαρακτηριστικά σημεία στο περιβάλλον του σπηλαιού και συνεπώς να μπορεί να καθοριστεί η τροχιά από τη γεωμετρία των επιφανειών.

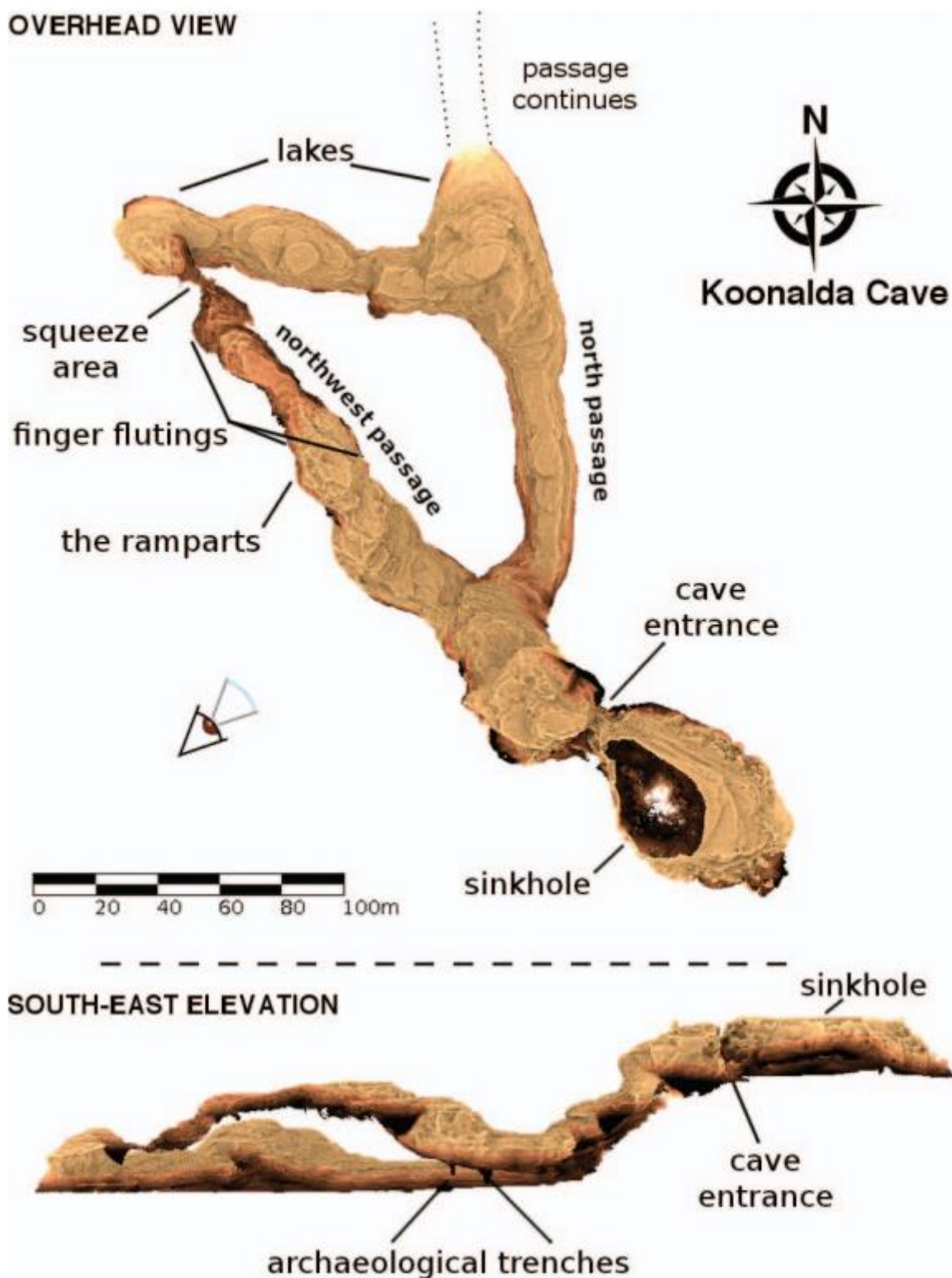
Καθώς το μήκος της τροχιάς μεγαλώνει με την απόκτηση νέων μετρήσεων κάθε χρονική στιγμή, προκύπτουν μικρά σφάλματα τα οποία οδηγούν σε αποκλίσεις κατά την επίλυση και σαφώς δεν μπορούν να αγνοηθούν. Στο σημείο αυτό ο αλγόριθμος SLAM που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της αρχικής τροχιάς του scanner χρησιμοποιείται επίσης και για διορθώσεις στην τροχιά της κινητής συσκευής βελτιστοποιώντας τα δεδομένα που έχουν ληφθεί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της διαδικασίας του κλεισίματος βρόχων (loop closure) με τη διαφορά ότι εφαρμόζεται καθ' όλη τη διάρκεια σάρωσης του περιβάλλοντος της σπηλιάς.

Ακόμα ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην εν λόγω εφαρμογή είναι εκείνος της αναγνώρισης θέσης (place recognition algorithm), ο οποίος προκαλεί διορθώσεις στην τροχιά της κινητής συσκευής αναγνωρίζοντας σημεία του περιβάλλοντος τα οποία έχουν ήδη σαρωθεί αρκετές φορές (κλείσιμο βρόχου). Ο εν λόγω αλγόριθμος παρέχει επίσης τη δυνατότητα αυτόματου προσανατολισμού πολλαπλών χαρτών, εφόσον υπάρχει ικανοποιητικό ποσοστό επικάλυψης μεταξύ τους, τόσο για την περίπτωση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους όσο και για την πιθανότητα διαφορετικοί χρήστες να σαρώνουν το σπήλαιο ταυτόχρονα.



Εικόνα 5.2: Χαρτογράφηση σπηλαίου Koonalda με τη συσκευή ZEBEDEE και τα αντίστοιχα μέρη που την αποτελούν (Zlot & Bosse, 2014).

Το σπήλαιο Koonalda αποτελεί αντικείμενο αρχαιολογικής και σπηλαιολογικής μελέτης καθώς περιέχει ενδείξεις που μαρτυρούν την ανθρώπινη ύπαρξη μέσα σε αυτό όπως είναι σχέδια από δάχτυλα που απεικονίζονται στις βραχώδεις επιφάνειες και έχουν σχηματιστεί από ασβεστίτη. Για το λόγο αυτό, τα τρισδιάστατα μοντέλα απεικόνισης της σπηλιάς πρέπει να είναι υψηλής ανάλυσης προκειμένου τα δεδομένα που παράγονται να είναι κατάλληλα για την ενίσχυση της αρχαιολογικής και γεωμορφολογικής μελέτης. Το επίπεδο της λεπτομέρειας στην απόδοση του 3D μοντέλου εξαρτάται από την πυκνότητα του νέφους σημείων που παράγεται, η οποία είναι σε



Εικόνα 5.3: Ολοκληρωμένος τρισδιάστατος χάρτης του σπηλαιού Koonalda, ο οποίος απεικονίζει την καταβόθρα, τα διαφορετικά επίπεδα καθώς και το στενό περασμα, τα οποία είναι χαρακτηριστικά του σπηλαιού (Zlot & Bosse, 2014).

άμεση συνάρτηση με το χρόνο που αφιερώνει ο χειριστής κατά τη διάρκεια σάρωσης τμημάτων του σπηλαίου. Επιπρόσθετα, μια εικονική περιήγηση στο εσωτερικό του σπηλαίου θα μπορούσε να δώσει τη δυνατότητα στο ευρύ κοινό να το επισκεφθεί καθώς αυτό δεν είναι ευρέως προσβάσιμο.

Η περίπτωση του σπηλαίου “Κουτούκι” Παιανίας Αττικής

Στην κατηγορία των κινούμενων LiDAR με χρήση χειροκίνητης συσκευής laser scanner, ανήκει η συσκευή της GeoSLAM ZEB-REVO, η οποία ακριβώς επειδή δε χρειάζεται να παραμένει ακίνητη κατά τη διαδικασία της σάρωσης, προσφέρει τη δυνατότητα περιήγησης στο χώρο και μέτρησης ακόμα και δυσπρόσιτων σημείων. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι της τάξης των 2-3cm ενώ θεωρείται κατάλληλη για χαρτογράφηση πολύπλοκων εσωτερικών χώρων όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης GPS όπως είναι τα σπήλαια. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα με την οποία σαρώνει το χώρο (43.200 σημεία/δευτερόλεπτο) οδηγεί στην αποτύπωση ομοιόμορφα καταναμημένων σημείων σε όλες τις γραμμές σάρωσης παράγοντας ομαλότερα, καθαρότερα και με λιγότερο θόρυβο δεδομένα.



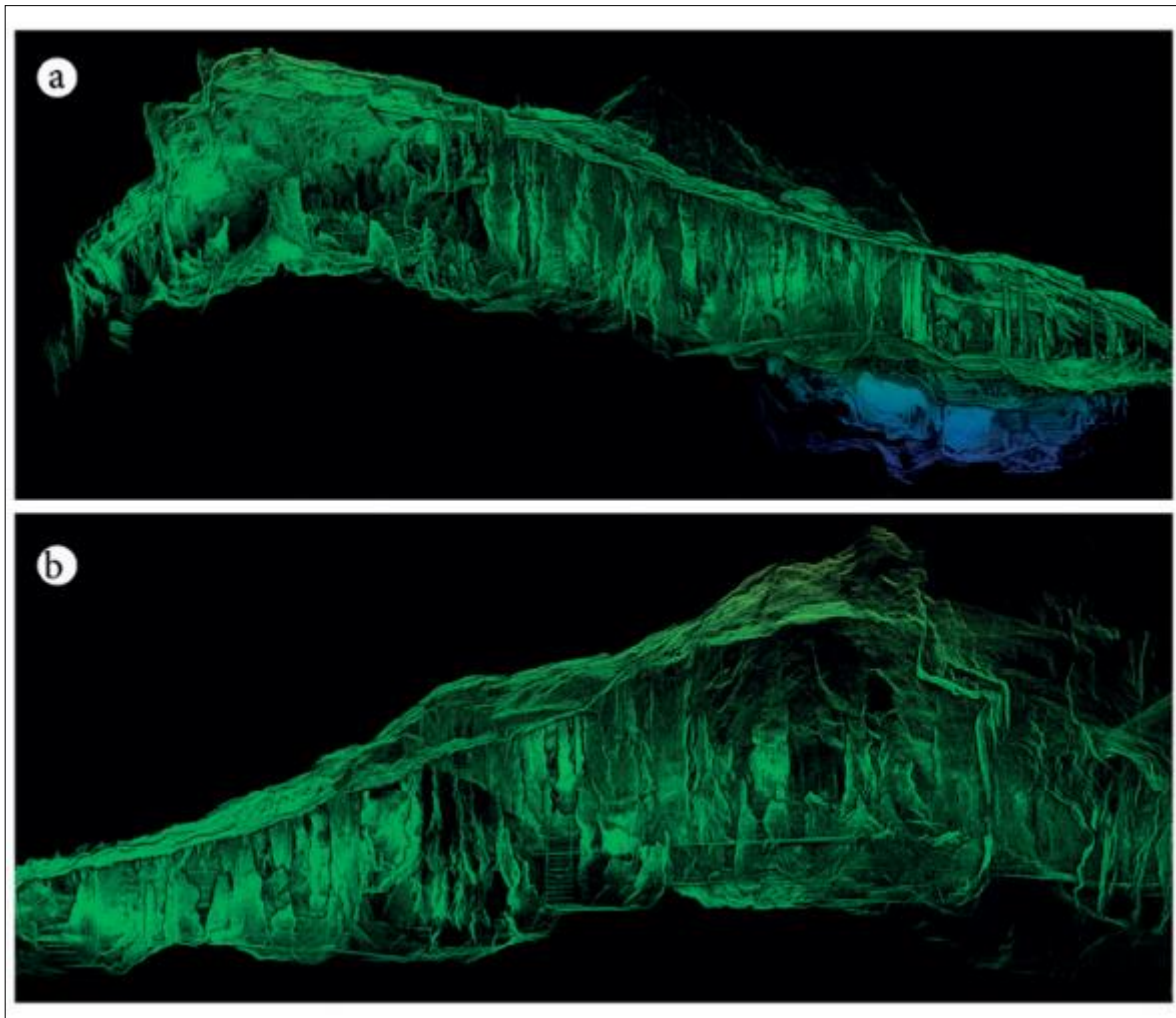
Εικόνα 5.4: Χειροκίνητη συσκευή κινητής χαρτογράφησης GeoSLAM ZEB-REVO

Το ZEB-REVO χρησιμοποιεί αλγόριθμους SLAM, οι οποίοι αφού επεξεργαστούν τα δεδομένα από τις μετρήσεις του laser σε συνδυασμό με τα δεδομένα του IMU για τη θέση της χειροκίνητης συσκευής κάθε χρονική στιγμή, εφαρμόζουν ρουτίνες αναγνώρισης χαρακτηριστικών μέσα στο σπήλαιο για να εκτελέσουν το cloud-to-cloud registration. Το γεγονός ότι η συνένωση των νεφών σημείων εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, επιτρέπει στους χειριστές της συσκευής να γνωρίζουν τι έχει σαρωθεί προτού ολοκληρωθεί η εργασία με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν κενά τα οποία αποτελούν πρόβλημα κατά την off line επεξεργασία των δεδομένων.

Ο αλγόριθμος SLAM λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να διαιρεί τη σαρωμένη επιφάνεια σε τομείς και να ανιχνεύει σημεία μέσα σε κάθε τομέα. Αν δεν ανιχνευθούν σημεία μέσα σε έναν τομέα, τότε ο αλγόριθμος δεν τα συμπεριλαμβάνει. Για το λόγο αυτό η ομοιόμορφη κατανομή των σημείων οδηγεί σε μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα κατά την εφαρμογή της μεθόδου SLAM καθώς δημιουργεί ένα πληρέστερο νέφος σημείων.

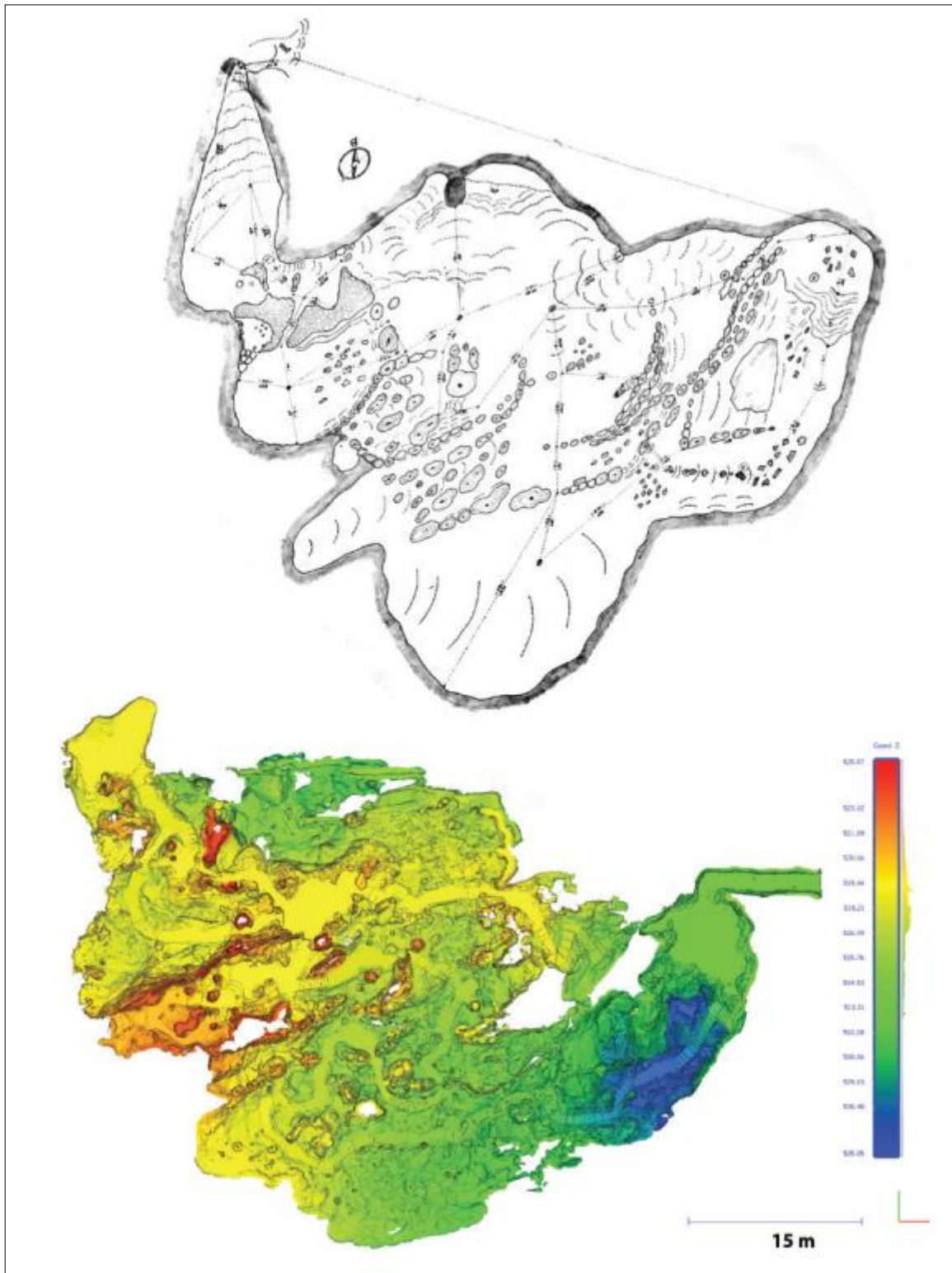
Οι Konsolaki et al. (2020), προχώρησαν στην απόδοση του τρισδιάστατου μοντέλου του σπηλαίου “Κουτούκι” στην Παιανία με χρήση χειροκίνητης συσκευής laser scanner (Geo-SLAM ZEB-REVO). Η εν λόγω συσκευή λειτουργεί με εκπομπή υπέρυθρων ακτίνων laser, οι οποίες προσκρούουν στις

επιφάνειες του σπηλαιίου με μέγιστη εμβέλεια 25-30m, μετρώντας εκατομμύρια σημεία στο χώρο (x, y, z) μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα ανακατασκευάζοντας έτσι το εσωτερικό της σπηλιάς σε πραγματικό χρόνο αποδίδοντας το σχήμα, το μέγεθος καθώς και τους φυσικούς σχηματισμούς της. Για τον εντοπισμό της θέσης της κάθε χρονική στιγμή η χειροκίνητη συσκευή διαθέτει μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU).



Εικόνα 5.5: Απεικόνιση πυκνού νέφους σημείων μέρους της σπηλιάς από διαφορετικές οπτικές γωνίες (Konsolaki et al, 2020).

Η σημασία της εφαρμογής της μεθόδου SLAM στο σπήλαιο “Κουτούκι”, σε συνδυασμό με τη χρήση απαραίτητων λογισμικών για τη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων, είναι καθοριστική από άποψη επιστημονικής μελέτης. Η offline επεξεργασία των μετρήσεων οδήγησε στην απόδοση του πυκνού νέφους σημείων του σπηλαιίου με εναλλαγή αποχρώσεων, η οποία αντιπροσωπεύει την υψομετρική διαβάθμιση του χώρου. Επιπρόσθετα, από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DSM), προέκυψαν οι ισοϋψείς καμπύλες του σπηλαιίου με ακρίβεια που φτάνει τα 5cm, η επεξεργασία των οποίων μπορεί να γίνει σε πρόγραμμα GIS. Η αποθήκευση αυτών των δεδομένων και η μελλοντική καταγραφή νέων, επιτρέπει στους ερευνητές να μελετήσουν την εξέλιξη του σπηλαιίου στο πέρασμα του χρόνου.



Εικόνα 5.6: Χαρτογράφηση σπηλαίου “Κουτούκι” με παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης (1963) σε αντιδιαστολή με τον χάρτη υψηλής ανάλυσης κατόπιν χρήσης χειροκίνητης συσκευής laser scanner (konsolaki et al, 2020).

Πιο συγκεκριμένα, οι Konsolaki et al (2020) κατάφεραν να προσδιορίσουν εντός του σπηλαίου, τον ακριβή αριθμό των κολώνων, οι οποίες σχηματίζονται με την ένωση ενός σταλακτίτη με έναν σταλαγμίτη, και αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό σπηλαιοθεμάτων στο Κουτούκι. Στη συνέχεια κατέταξαν αυτές σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το υψόμετρο που βρίσκεται η βάση τους και ανάλογα με το ύψος της κάθε μίας, πληροφορία η οποία αποκτήθηκε με τη διαδικασία της

εφαρμογής του αλγορίθμου SLAM και η οποία θα ήταν σχεδόν αδύνατο να καταγραφεί με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο χαρτογράφησης. Τα δεδομένα τα οποία απεικονίσθηκαν γραφικά, οδήγησαν σε περαιτέρω αναλύσεις σχετικά με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του σπηλαίου καθώς και τον τρόπο εξέλιξής του.

Η αξιοποίηση του αλγορίθμου SLAM σε συνδυασμό με τη χρήση state-of the-art τεχνολογίας για τη χαρτογράφηση του σπηλαίου είναι καθοριστικής σημασίας αν αναλογιστεί κανείς ότι η χαρτογράφηση του χώρου έγινε το 1963 με παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης και όργανα που διέθεταν εκείνη την εποχή και φυσικά τα ανάλογα σφάλματα. Στον αντίποδα, παρουσιάζεται χάρτης του χώρου υψηλής ανάλυσης, με έμφαση στη λεπτομέρεια ύστερα από μέτρηση 4.500.000 σημείων του χώρου με τη χειροκίνητη συσκευή laser scanner.

5.2 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι χαρτογράφησης με UAV

Οι Zhang et al (2017) παρουσιάζουν τις δυνατότητες των Συστημάτων μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών (UAV) σε συνδυασμό με τη χρήση φωτογραμμετρικών μεθόδων στη χαρτογράφηση ενός σπηλαίου. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για ένα τέτοιο έργο είναι τύπου τετρακόπτερο και περιλαμβάνουν τρισδιάστατους αισθητήρες (κάμερες RGB-D) , ένα υποσύστημα του οποίου η λειτουργία περιορίζεται στο να εντοπίζει και να αποφεύγει εμπόδια, υποσύστημα προσδιορισμού της τροχιάς του UAV και φυσικά έναν χειριστή με υψηλή κατάρτιση στον χειρισμό drones.



Εικόνα 5.7: Σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους κατάλληλο για πτήση εντός σπηλαίου

Το Data Processing and Control Center, είναι η κύρια υπολογιστική μονάδα και βρίσκεται σε υπολογιστή εκτός του συστήματος του drone για λόγους περιορισμού κατανάλωσης ενέργειας

δεδομένου ότι το UAV λειτουργεί με μπαταρίες και η χρήση ενέργειας εντός σπηλαίου είναι περιορισμένη. Το DPCC πραγματοποιεί την επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό την ανακατασκευή του χώρου σε πραγματικό χρόνο ταυτόχρονα με τη δημιουργία όδευσης, διαδικασία που καθιστά δυνατή την αλληλεπίδραση του χειριστή με το drone.

Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης εφαρμογής αποτελεί η χρήση αισθητήρων RGB-D στο σύστημα του UAV, οι οποίοι παρέχουν αποτελέσματα με σχετικά μεγάλη ακρίβεια αποτυπώνοντας τη λεπτομέρεια των αντικειμένων του χώρου και στις τρεις διαστάσεις. Επιπρόσθετα οι RGB εικόνες που παράγονται επιτρέπουν την απόδοση χρώματος στα προς αποτύπωση αντικείμενα στον τελικό χάρτη. Οι αισθητήρες RGB-D εκτός της κάμερας, διαθέτουν επίσης προβολέα υπέρυθρων σε συνδυασμό με μονοχρωματικό αισθητήρα που επιτρέπει την καταγραφή του χώρου ακόμα και υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Η ένταση του φωτός που είναι απαραίτητη για την απόδοση τρισδιάστατου χάρτη πρέπει να είναι η βέλτιστη δυνατή δεδομένου ότι το drone διαθέτει περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας. Οι Zhang et al (2017) προτείνουν τη δυνατότητα χρήσης επιπρόσθετων drones (drone swarms), τα οποία λειτουργούν επικουρικά στο εγχείρημα της χαρτογράφησης φωτίζοντας την περιοχή που αποτυπώνεται κάθε φορά, τονίζοντας ότι τέτοιου τύπου λύσεις με δυνατότητα χρήσης παραπάνω του ενός UAV θα καταφέρουν να προσπελάσουν τυχόν εμπόδια. Οι Yin et al. (2013) προτείνουν έναν αλγόριθμο ανίχνευσης σημείων με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας ανεξάρτητα από τυχόν μεταβολές στον φωτισμό του περιβάλλοντος.

Μια μεγάλη πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος SLAM αφορά στον εντοπισμό των κλειστών βρόχων, διαδικασία κατά την οποία αξιοποιείται προσωρινή, χωρική πληροφορία με σκοπό την ανακατασκευή του τρισδιάστατου χώρου σε πραγματικό χρόνο. Για την αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος εφαρμόζονται σχετικοί αλγόριθμοι όπως είναι ο Bag of Word (BoW). Η πρόκληση αυτή σε συνδυασμό με την έλλειψη φωτισμού έχει ως συνέπεια τη λήψη περισσότερων εικόνων και μάλιστα από πολλαπλές οπτικές γωνίες, καθώς οι κάμερες RGB-D καλύπτουν μικρό εύρος λήψης κάτω από τέτοιες συνθήκες φωτισμού, ενώ το σπήλαιο αποτελεί περιβάλλον χωρίς μεγάλη ποικιλομορφία στα χρώματα. Για την προσπέλαση του συγκεκριμένου εμποδίου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Iterative Closest Point (ICP) που αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο συνένωσης νεφών, ο οποίος όμως αποτυγχάνει στην περίπτωση που παραχθούν θολές εικόνες λόγω της γρήγορης κίνησης του αισθητήρα και εξαιτίας του γεγονότος ότι ο χώρος δεν παρουσιάζει χρωματικές αντιθέσεις ή έντονες ακμές. Η αστοχία αυτή θεραπεύεται με την αξιοποίηση δεδομένων από τον αισθητήρα IMU, ο οποίος αναγνωρίζει σε πραγματικό χρόνο την κινητική κατάσταση του drone και τις μεταβολές αυτής σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις, παράγοντας δεδομένα με αποτέλεσμα να καθιστά το όλο σύστημα περισσότερο αξιόπιστο σε απότομες κινήσεις.

5.3 Χαρτογράφηση σπηλαίου με συνδυασμό αισθητήρων LiDAR και φωτογραφικών μηχανών ενσωματωμένους σε UAV

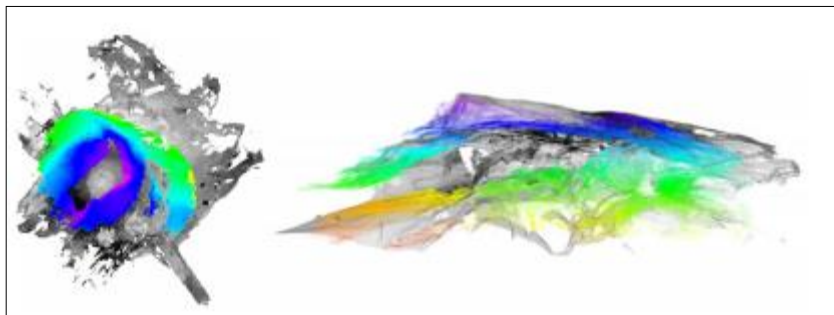
Η περίπτωση του σπηλαίου Laurel στη νοτιοδυτική Πεσουλβάνια των Ηνωμένων Πολιτειών

Οι Tabid et al (2020), παρουσιάζουν τη μέθοδο χαρτογράφησης του σπηλαίου Laurel που βρίσκεται στη Νοτιοδυτική Πεσουλβάνια των Ηνωμένων Πολιτειών με χρήση αυτόνομου εναέριου συστήματος. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει κάμερα τοποθετημένη κατακόρυφα για τον υπολογισμό της θέσης του κάθε χρονική στιγμή, μία δεύτερη κάμερα καταγραφής της διάστασης του βάθους για τη δημιουργία του χάρτη και ειδικό φωτισμό που φωτίζει το χώρο μπροστά και

κάτω από το drone, καθώς μιλάμε για συνθήκες απόλυτου σκότους στο εσωτερικό του σπηλαίου. Ενσωματωμένος στο drone βρίσκεται και αισθητήρας laser scanner για τη δημιουργία ολοκληρωμένου χάρτη του χώρου σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 5.8: Σύστημα UAV κατά τη διάρκεια συλλογής δεδομένων εντός του σπηλαίου με σκοπό τη χαρτογράφηση αυτού σε παραγματικό χρόνο (Tabid et al, 2020).



Εικόνα 5.9: Προβολή από πάνω προς τα κάτω και διατομή του χάρτη που δημιουργείται σε παραγματικό χρόνο με τις διαβαθμίσεις των χρωμάτων να συμβολίζουν τη διάσταση z του ύψους (Tabid et al, 2020).

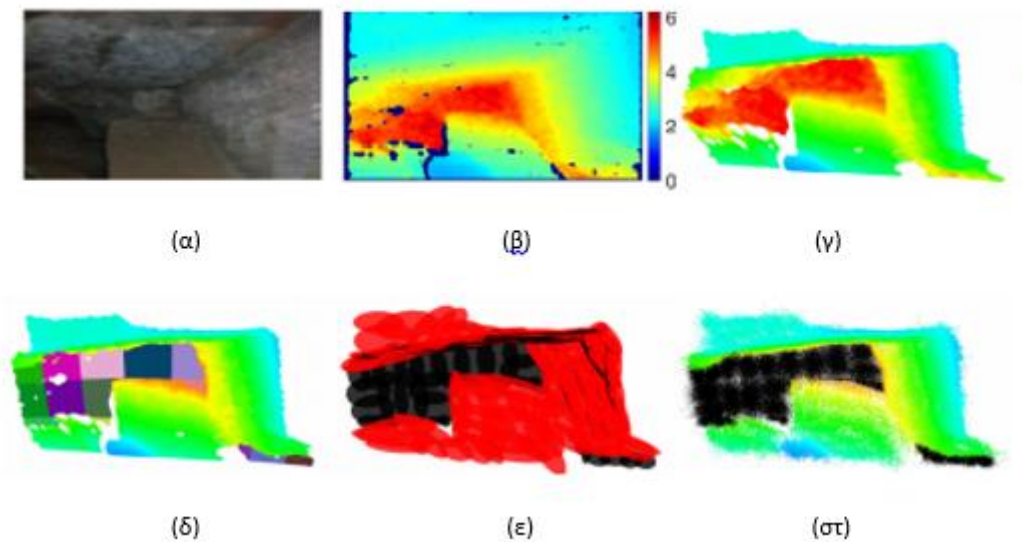
Χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης εφαρμογής αποτελεί η χρήση Gaussian Mixture Models (GMM), τα οποία θεωρούνται ιδανικά για τη δημιουργία του μοντέλου της σπηλιάς καθώς έχουν τη δυνατότητα αναπαράστασης της διάστασης του βάθους σε ικανοποιητικό βαθμό. Ακόμα ένα πλεονέκτημα του κώδικα GMM είναι ότι οι παρατηρήσεις που λαμβάνονται από το laser scanner συμπιέζονται σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην καταλαμβάνουν τεράστιο αποθηκευτικό χώρο. Έτσι ο χάρτης δημιουργείται προοδευτικά, καθώς εισάγονται νέες μετρήσεις κάθε χρονική στιγμή, κατά τη διάρκεια της πτήσης του drone και μόνο τα δεδομένα GMM χρειάζεται να μεταφερθούν από το UAV στον χειριστή.

Πιο αναλυτικά, τα Gaussian Mixture Models λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να κωδικοποιούνται οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες προκειμένου να μεταφερθούν μέσα από κανάλια επικοινωνίας με μικρή εμβέλεια. Έτσι το γκαουσιανό μοντέλο δημιουργεί έναν αρχικό, τοπικό χάρτη από τις πρώτες παρατηρήσεις που καταγράφονται από τους αισθητήρες και ταυτόχρονα βρίσκει τη θέση του ρομπότ στο χώρο σύμφωνα με τον χάρτη αυτό (SLAM). Το μοντέλο GMM αποτελεί το άθροισμα με βάρη των M γκαουσιανών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function-PDF). Η πυκνότητα πιθανότητας του γκαουσιανού μοντέλου εκφράζεται ως εξής:

$$p(x|\Theta) = \sum_{m=1}^M \pi_m N(x|\mu_m, \Lambda_m)$$

όπου:

- $p(x|\Theta)$ είναι η πυκνότητα πιθανότητας για μια τυχαία μεταβλητή x που παραμετροποιείται κατά $\Theta = \{\pi_m, \mu_m, \Lambda_m\}_{m=1}^M$ * $\pi_m \in \mathbb{R}$, το οποίο είναι βάρος τέτοιο ώστε $\sum_{m=1}^M \pi_m = 1$, $0 \leq \pi_m \leq 1$
- μ_m είναι ο μέσος όρος
- Λ_m είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης για την m -οστή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής.



Εικόνα 5.10: Σφαιρική άποψη της μετατροπής των παρατηρήσεων σε GMM. (α) Έγχρωμη εικόνα του χώρου. (β) Εικόνα βάθους αντίστοιχη της έγχρωμης εικόνας (α) με την απόσταση να αναπαρίσταται ως heatmap. (γ) Αναπαράσταση του point cloud της εικόνας βάθους. (δ) Κατά τη χαρτογραφική προσέγγιση, τα σημεία σε απόσταση μικρότερη από μία μέγιστη ακτίνα r θεωρούνται ελεύθερα και προβάλλονται στο χώρο που καταλαμβάνει η εικόνα σαν παράθυρα με διαφορετικό χρώμα (Free Space Windows). (ε) Απεικόνιση του μοντέλου GMM που αναπαριστά με κόκκινο χρώμα τα σημεία που είναι κατειλημμένα στο χώρο και του μοντέλου GMM τα ελεύθερα σημεία με μαύρο χρώμα. (στ) Απεικόνιση των δεδομένων επαναπροσδιορισμού τα οποία υπερτονίζουν ότι η διαδικασία απόδοσης του χάρτη γίνεται με αυθαίρετο αριθμό σημείων.

Ένας τοπικός χάρτης πλήρωσης (Occupancy Grid Map) είναι μία πιθανοτική αναπαράσταση του τρισδιάστατου χώρου σε πλέγματα $m = \{m_1, m_2, \dots, m_{|m|}\}$. Το κάθε πλέγμα θεωρείται ανεξάρτητο και η πιθανότητα κατάληψης για το κάθε ένα ξεχωριστά ορίζεται ως:

$$p(m_i | \mathbf{X}_{1:t}, \Xi_{1:t})$$

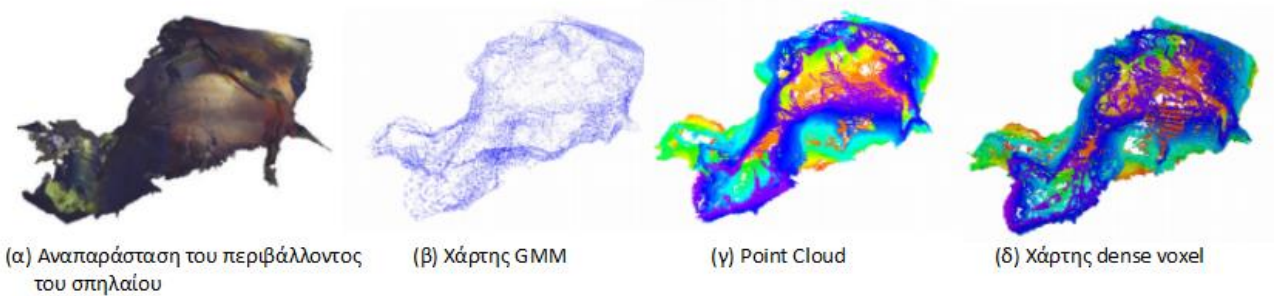
όπου:

- $\mathbf{X}_{1:t}$ αναπαριστά τις θέσεις του ρομπότ μέχρι τη χρονική στιγμή t
- $\Xi_{1:t}$ αναπαριστά τις αντίστοιχες παρατηρήσεις

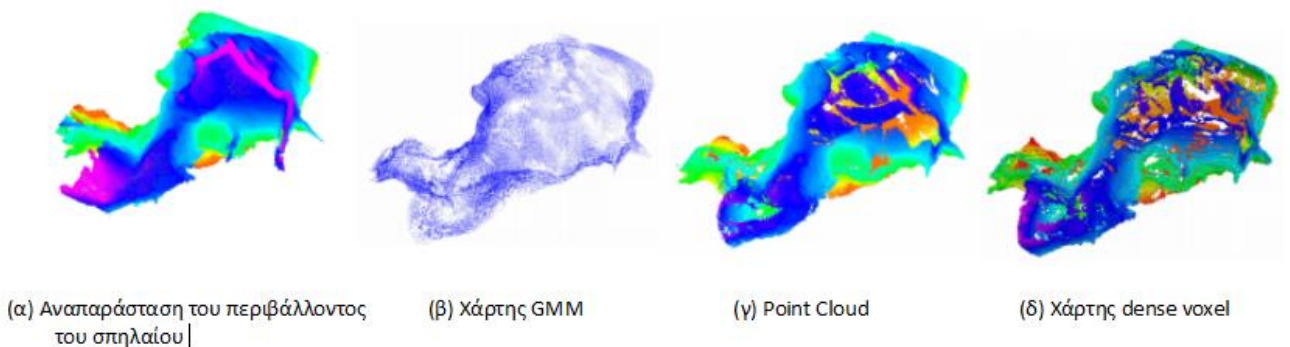
Για κάθε νέα παρατήρηση Ξ_t , ανανεώνεται η τιμή της κατάληψης του πλέγματος.

Στη συνέχεια αντί να γίνει αποθήκευση ολόκληρου του χάρτη κατάληψης πλέγματος m (occupancy grid map), ο οποίος αναπαριστά την κατάληψη για το σύνολο του χώρου που έχει σαρωθεί από την αρχή της εφαρμογής, διατηρείται ένας τοπικός χάρτης πλέγματος m_t που αφορά στο χώρο περιμετρικά της θέσης X_t του ρομπότ. Ο τοπικός αυτός χάρτης ακολουθεί την τροχιά του κινούμενου συστήματος με αποτέλεσμα όταν εμφανίζονται περιοχές από τις οποίες έχει ξαναπεράσει το ρομπότ η κατάληψη (occupancy) να επαναδημιουργείται από τα μοντέλα επιφάνειας.

Αναπαράσταση μοντέλου με αισθητήρα LiDAR



Αναπαράσταση μοντέλου με κάμερα βάθους



6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σπήλαια θεωρούνται από μελετητές της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας ως

συγκεκριμένες περιπτώσεις ακραίου περιβάλλοντος (extreme environment). Από μαθηματική άποψη ο όρος «ακραίο» αναφέρεται στις ακραίες τιμές μιας γκαουσιανής κατανομής και ορίζεται ως κάτι μη συνηθισμένο. Από σπηλαιολογική άποψη, οι ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό ενός σπηλαίου όσον αφορά στο μικροκλίμα, στη μορφολογία αλλά και στις συνθήκες χαμηλού φωτισμού, κατατάσσονται σε ασυνήθιστους χώρους που χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης και έρευνας.

Ο κλάδος της Φωτογραμμετρίας σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους της SfM διαδικασίας έχουν συνεισφέρει τα μέγιστα στον τομέα της σπηλαιολογικής έρευνας και χαρτογράφησης συντελώντας αφενός στη συστηματική μελέτη ενός σπηλαίου από γεωλογικής άποψης, κυρίως σε ότι αφορά στην εξέλιξή του μέσα στο χρόνο, και αφετέρου στην ανασκαφική διαδικασία σε ότι αφορά στην καταγραφή, τεκμηρίωση και αξιολόγηση των ευρημάτων από αρχαιολογική άποψης. Επιπρόσθετα, ένας χάρτης που παράγεται σχετικά γρήγορα και ταυτόχρονα περιέχει σημαντική πληροφορία με μεγάλη ακρίβεια για το εσωτερικό μίας κοιλότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σπηλαιολογική διάσωση με εξίσου μεγάλη επιτυχία.

Οι εξελίξεις στους τομείς της Όρασης Υπολογιστών και της Ρομποτικής τις τελευταίες δύο δεκαετίες προτείνουν καινοτόμες λύσεις σε προβλήματα και εφαρμογές που μέχρι και τα τέλη του προηγούμενου αιώνα φάνταζαν δυσεπίλυτες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διαμορφώνονται νέες προσεγγίσεις επίλυσης του προβλήματος SLAM σε ιδιαίτερα απαιτητικά περιβάλλοντα στα οποία η πρόσβαση αποτελεί ακόμα έναν παράγοντα πρόκλησης.

Αναφορικά με την εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων και ύστερα από την παρουσίαση τεσσάρων εφαρμογών κινητής χαρτογράφησης σπηλαίων με χρήση διαφορετικών μεθόδων κατά περίπτωση, είναι εμφανής η πρόοδος που έχει γίνει από το 2014 έως το 2020 τόσο σε επίπεδο βελτίωσης και εργονομίας των χειροκίνητων συσκευών LiDAR όσο και σε επίπεδο εξέλιξης των Συστημάτων μη Στελεχωμένων Αεροσκαφών.

Ενώ τα προβλήματα που προκύπτουν από την κινητή χαρτογράφηση ενός σπηλαίου έχουν αναλυθεί εκτενώς στην παρούσα εργασία, με βάση αυτά τονίζεται η ανάγκη για μελλοντική βελτίωση των αλγορίθμων επεξεργασίας των δεδομένων ούτως ώστε να απαιτείται λιγότερος υπολογιστικός χρόνος καθώς και η χρήση γρήγορων υπολογιστικών μονάδων για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων. Άλλα θέματα, εξίσου σημαντικά, που προέκυψαν από τη μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας και χρήζουν περαιτέρω εξέλιξης αφορούν στη λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και στη χρήση μπαταριών μεγαλύτερης διάρκειας καθώς και στη μεγαλύτερη εμβέλεια που πρέπει να έχουν οι αισθητήρες και το μικρότερο βάρος για πιο ευέλικτα κινούμενα συστήματα επίσης.

Το θέμα του εντοπισμού της θέσης στο εσωτερικό ενός σπηλαίου αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση καθώς, μεταξύ άλλων, δεν υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης σήματος GPS στο εσωτερικό του. Οι συσκευές beacon, οι οποίες λειτουργούν ως πομποί μετάδοσης σημάτων με μικρή εμβέλεια σε συμβατές, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν το εν λόγω πρόβλημα συλλέγοντας τα δεδομένα και αποθηκεύοντάς τα προκειμένου αυτά να σταλούν σε επόμενο χρόνο στο σύστημα του drone. Στη συνέχεια το drone επικοινωνεί με τα beacons που βρίσκονται τοποθετημένα στο έδαφος προκειμένου να αναγνωρίζεται ένα σημείο από το οποίο έχει περάσει πάλι το UAV. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν κατάλληλοι αλγόριθμοι που θα εντοπίζουν τα βέλτιστα σημεία στα οποία θα πρέπει να τοποθετηθούν οι συσκευές beacon.

Η μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας αφήνει πολλά περιθώρια για περαιτέρω εξέλιξη σε όλους τους τομείς που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία, με αποτέλεσμα εφαρμογές που μέχρι πρότινος θεωρούνταν χρονοβόρες και επίπονες και απαιτούσαν υψηλό κόστος για την εκτέλεσή τους, να μπορούν πλέον να εφαρμόζονται με μεγαλύτερη ευκολία από πλευράς συλλογής των δεδομένων αφήνοντας έτσι το περιθώριο στους ερευνητές αφενός να διαθέτουν ποιοτικό χρόνο στη μελέτη του επιστημονικού κλάδου του ενδιαφέροντός τους και αφετέρου να παράγουν

αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία.

Η ευχή μου για το μέλλον είναι η σπηλαιολογική έρευνα με τη χρήση όλων των διαθέσιμων προηγμένων μέσων τελευταίας τεχνολογίας, να αποτελέσει τον συνδετικό κρίκο που θα ενώσει το παρελθόν της ανθρωπότητας με το μέλλον αυτής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεωργόπουλος, Α., 2008. “Φωτογραμμετρία Ι – Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία. Διαλέξεις μαθήματος 5ου εξαμήνου”. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα
- Γιαννόπουλος, Β., 2000. “Συμβολή στη μελέτη σύγχρονων και παλαιών περιβαλλόντων των πλέον σημαντικών ελληνικών σπηλαίων”. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Γκέκας, Α., 2008. “Δοκιμές Ολοκληρωμένου Δορυφορικού και Αδρανειακού Συστήματος Πλοήγησης”. Διπλωματική εργασία
- Γραμματικόπουλος, Λ., 2007. “Γεωμετρική Πληροφορία από Μεμονωμένες Εικόνες στη Φωτογραμμετρία και την Όραση Υπολογιστών”. Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δημητρίου, Μ., 2013. “Γρήγορος εντοπισμός αντικειμένων, υπολογισμός του πραγματικού τους μεγέθους και αναγνώριση με τη χρήση του αισθητήρα Microsoft Kinect”. Διπλωματική εργασία. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης.
- Ιωαννίδης, Χ., 2016. “Η χρήση των UAV στη γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων – Εξοπλισμός, Λογισμικό, Προϊόντα”. Διημερίδα: Μη επανδρωμένα Εναέρια Συστήματα (UAS) και Χαρτογράφηση”. Αθήνα
- Καρράς, Γ., 1998. “Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στη Φωτογραμμετρία”. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα
- Κωτσάκης, Χ., 2017. “Εγχειρίδιο μετασχηματισμού ομοιότητας”. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Παγούνης, Β., Καλυκάκης, Σ. και Μπιζιά Π., 2004. “Η χρήση της τρισδιάστατης σάρωσης ως μεθοδολογία στην αποτύπωση σπηλαίων. Εφαρμογή στο σπήλαιο Αγίου Γεωργίου Κιλκίς”. Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου. Θεσσαλονίκη.
- Πατώνης, Φ., 2012. “Συνδιασμός των τεχνολογιών χαμηλού κόστους Αδρανειακών Μονάδων Μέτρησης και του Παγκόσμιου Δορυφορικού Συστήματος Πλοήγησης σε Εφαρμογές Φωτογραμμετρίας”. Διδακτορική διατριβή
- Πέτσα, Ε., 2000. “Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας”. ΤΕΙ Αθήνας.
- Aanaes, H., 2003. “Methods for Structure from Motion”. Technical University of Denmark
- American Geosciences Institute, 2021. “What is Lidar and what it is used for.” [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο στο <http://www.americangeosciences.org/critical-issues/faq/what-lidar-and-what-it-used> [Πρόσβαση 19 Ιανουαρίου 2021]
- Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L., 2006. “SURF: Speeded Up Robust Features”. Katholieke Universiteit Leuven. Zurich
- Dang, T., Mascarich, F., Khattak, S., Nguyen, H., Khedekar, N., Papachristos, C. and Alexis K., 2019. “Field-hardened Robotic Autonomy for Subterranean Exploration”.
- Debeunne, C. and Vivet, D., 2020. “A Review of Visual-LiDAR Fusion based Simultaneous Localization and Mapping”. Licensee MDPI, Basel, Switzerland.
- Dellaert, F. and Kaess, M., 2006. “Square Root SAM: Simultaneous Localization and Mapping via Square Root Information Smoothing”. International Journal of Robotics Research (IJRR) 25(12), pp. 1181-1203.
- Durrant-Whyte, H. and Bailey, T., 2006. “Simultaneous Localization and Mapping: Part I”. Tutorial
- El Hakim S., Fryer, J. and Pichard, M., 2004. “Modeling and Visualization of Aboriginal Rock Art in the Baiame Cave”. Proc. of the XXth Congress of ISPRS, Vol XXXV, Part B, pp. 990-995, Istanbul, 12-23 July 2004.
- Endres, F., Hess, J., Sturm, J., Cremers, D. and Burgard, W., 2013. “3-D Mapping With an RGB-D Camera”. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS.
- Geoslam Landmark, 2021. “GeoSLAM Laser Scanner”. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο στο

<http://www.geoslam.landmark.com.gr> [Πρόσβαση 5 Μαρτίου 2021]

Geospatial World, 2020. "What is Lidar technology and how does it work?." [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο στο <http://www.geospatialworld.net/blogs/what-is-lidar-technology-and-how-does-it-work> [Πρόσβαση 19 Ιανουαρίου 2021]

Guerra, E., Bolea, Y., Munguia, R. and Grau, A., 2016. "Recent Developments in Monocular SLAM within the HRI Framework".

Hartley, R. and Zisserman, A., 1999. "Multiple View Geometry". CVPR June, 1999.

Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J. and Rosette, J., 2019. "Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: A Review". Remote Sensing

Kainth, K. and Singh, B., 2020. "Analysis of CCD and CMOS Sensor Based Images from Technical and Photographic Aspects". International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2020).

Kalisperakis I., Mandilaras, T., El Saer A., Stamatopoulou, P., Stentoumis C., Bourou, S. and Grammatikopoulos, L., 2020. "A Modular Mobile Mapping Platform for Complex Indoor and Outdoor Environments". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B1-2020, 2020 XXIV ISPRS Congress (2020 edition)

Konsolaki, A., Vassilakis, E., Gouliotis, L., Kontostavlos, G. and Giannopoulos, V., 2020. "High Resolution Digital 3D Modelling of Subsurface Morphological Structures of Koutouki Cave, Greece".

Khuwatja, A., Chen, Y., Zhao, N., Alouini, M. and Dobbins, P., 2018. "A Survey of Channel Modeling for UAV Communications".

La Scalea, R., Rodrigues, M., Osorio, D. P. M., Lima, C. H., Souza, R. D., Alves, H. and Branco, K. C., 2019. "Opportunities for Autonomous UAV in Harsh Environments".

Lei, X., Feng, B., Wang, G., Liu, W. and Yang Y., 2020. "A novel Fast-SLAM Framework based on 2D Lidar for Autonomous Mobile Robot". Article at "Electronics". MDPI.

Lemaire, T., Berger, C.Jung, I. and Lacroix, S., 2007. "Vision-based SLAM: Stereo and Monocular Approaches". International Journal of Computer Vision.

Lindeberg, T., 1994. "Scale-Space Theory: A Basic Tool for Analysing Structures at Different Scales". Journal of Applied Statistics.

Liu, M., Wang, Y., Leung, H. and Yu, J., 2013. "A Novel Feature-Level Data Fusion Method for Indoor Autonomous Localization". Hindawi Publishing Corporation. Mathematical Problems in Engineering. Volume 2013, Article ID 382619

Livieratos, E., 1992. "Empiric, topographic or photogrammetric recording? Answers to properly phrased questions, in Proceedings of the congress, Terrestrial Photogrammetry and Geographic Information Systems for the documentation of the National Cultural Heritage". Thessaloniki.

Lopez, E., Garcia, S., Barea, R., Bergasa, L., Molinos, E., Arroyo, R., Romera, E. and Pardo, S., 2017. "A Multi-Sensorial Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) System for Low-Cost Micro Aerial Vehicles in GPS-Denied Environments". Article in "sensors". MDPI.

Lowe, D., 2004. "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". Computer Science Department of University of British Columbia. Vancouver

Mavridis, F., Tae Jensen, J. and Kormazopoulou, L., 2013. "Stable Places and Changing Perceptions: Cave Archaeology in Greece". Bar International Series 2558. Published by Archaeopress Publishers of British Archaeological reports.

Mendoza, H. and Corral-Briones, G., 2017. "Analysis of Geometric-Stochastic 3D-MIMO Air-to-ground Channel Model". 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)

Montemerlo M. and Thrun, S., 2003. "Simultaneous Localization and Mapping with Unknown Data Association Using Fast SLAM". Proceedings of the 2003 IEEE. International Conference on Robotics and Automation. Taipei, Taiwan.

- Mosbrucker, A., Major, J., Spicer, K. and Pitlick, J., 2017. *“Camera System Considerations for Geomorphic Applications of SfM Photogrammetry”*. Earth Surface Processes and Landforms.
- Mur-Artal, R., Montiel, J.M.M. and Tardos, J.D., 2015. *“ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System”*. IEEE Transactions on Robotics.
- O’ Connor, J., Smith, M. and James, M., 2017. *“Cameras and Settings for Aerial Surveys in the Geosciences: Optimising Image Data”*. Article in Progress in Physical Geometry.
- Remondino, F., Gaiani, M., Apollonio, F., Ballabeni, A., Ballabeni, M. and Morabito, D., 2016. *“3D Documentation of 40 Kilometers of Historical Porticoes – The Challenge”*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5. Czech Republic.
- Sweeney, C., Sattler, T., Hollerer, T., Turk, M. and Pollefeys, M., 2015. *“Optimizing the Viewing Graph for Structure-from-motion”*. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 801-809.
- Szeliski, R., 2011. *“Computer Vision: Algorithms and Applications”*. Springer Science & Business Media.
- Tabib, W., Goel, K., Yao, J., Boirum, C. and Michaeo, N., 2020. *“Autonomous Cave Surveying with an Aerial Robot”*.
- Taketomi, T., Uchiyama, H. and Ikeda, S., 2017. *“Visual SLAM Algorithms: A survey from 2010 to 2016”*. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications. Review Paper.
- Triggs, B., McLauchlan P., Hartley, R. and Fitzgibbon, A., 2000. *“Bundle Adjustment - A Modern Synthesis”*. In: Vision Algorithms: theory and practice, Spinger, pp. 298-372.
- Turner, D., Lucieer, A. and Watson, C., 2012. *“An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics for Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion Point Clouds”*. Article
- Urban, S. and Hinz, S., 2016. *“Multicol SLAM a Modular Realtime Multi-Camera SLAM System”*. Article
- Urzua, S., Munguia, R. and Grau, A., 2017. *“Vision-based SLAM system for MAVs in GPS-denied environments”*. International Journal of Micro Air Vehicles.
- Wang, C., Wang, T., Liang, J., Zhang, Y., and Zhou, Y., 2013. *“Bearing-only Visual SLAM for Small Unmanned Aerial Vehicles in GPS-denied environments”*. International Journal of Automation and Computing. Beijing University of Aeronautics and Astronautics. Beijing
- Weinmann, M., 2013. *“Visual Features - From Early Concepts to Modern Computer Vision”*. Advanced Topics in Computer Vision, 1-34.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. and Reynolds J.M., 2012. *“Structure-from-Motion Photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications”*. Geomorphology 179 (2012) 300-314.
- Wu, C., 2013. *“Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion”*. 2013 International Conference on 3D Vision.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B. and Seitz, S., 2011. *“Multicore Bundle Adjustment”*. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition
- Xu, Y., Ou, Y. and Xu, T., 2018. *“SLAM of Robot-based on the Fusion of Vision and LiDAR”*. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems. Shenzhen, China.
- Yin, C., Stark, B., Chen, Y., and Zhong, S., 2013. *“Adaptive minimum energy cognitive lighting control: Integer order vs fractional order strategies in sliding mode based extremum seeking”*. Mechatronics 23, p. 863-872.
- Zhang, G. and Chen, Y., 2017. *“3D Cave Mapping Using UAVs as Robotic Co-Archaeologists”*. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), June 13-16, 2017, Miami, FL, USA.
- Zlot, R. and Bosse, M., 2014. *“Three Dimensional Mobile Mapping of Caves”*. Journal of Cave and Karst Studies (p. 191-206). Australia

Zollhofer, M., Stotko, P., Gorlitz, A., Theobalt, C., Niebner, M., Klein, R. and Kolb, A., 2018. *“State of the Art on 3D Reconstruction with RGB-D Cameras”*. Volume 37 (2018), Number 2. STAR – State of The Art Report.

Φωτογραφία εξωφύλλου: Πέννος Χρήστος, Διδάκτορας Γεωλογίας (Η φωτογραφία κέρδισε την πρώτη θέση σε διεθνή διαγωνισμό σπηλαιοφωτογραφίας.)