



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ & ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΜΣ ΓΕΩΧΩΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Αξιοποίηση πληροφορίας από αισθητήρες μη επανδρωμένων  
υποβρύχιων οχημάτων για την 3D ανακατασκευή υποβρύχιων σκηνών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ελένη Διαμαντή

ΑΜ: 1 6 1 3

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ

Γ. Καρράς

Έλ. Πέτσα

Λ. Γραμματικόπουλος

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2020

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Η διπλωματική αυτή εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση ενός κύκλου μεταπτυχιακών σπουδών στη Γεωπληροφορική και μίας δεκαετίας προσωπικής ενασχόλησης με το αντικείμενο της υποβρύχιας γεωμετρικής τεκμηρίωσης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου Γιώργο Καρρά, Έλλη Πέτσα και Λάζαρο Γραμματικόπουλο για την παρότρυνσή τους να προσεγγίσω το ιδιαίτερα πολύπλοκο, αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά ενδιαφέρον, θέμα της 3D ανακατασκευής υποβρύχιων σκηνών, βαθύτερα στη θεωρητική του βάση. Επίσης, ευχαριστώ τους θαλασσινούς μου φίλους και συνεργάτες που χωρίς αυτούς τα δέκα αυτά χρόνια θα ήταν απλώς “μια τρύπα στο νερό”.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο “Αξιοποίηση Πληροφορίας από Αισθητήρες μη Επανδρωμένων Υποβρύχιων Οχημάτων για την 3D Ανακατασκευή Υποβρύχιων Σκηνών” εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος “Γεωχωρικές Τεχνολογίες” του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η εργασία είναι αποτέλεσμα εκτενούς βιβλιογραφικής έρευνας σε μεθόδους τρισδιάστατης ανακατασκευής αντικειμένων μελέτης που υπάρχουν στο υποβρύχιο περιβάλλον, με αξιοποίηση δεδομένων από αδρανειακούς, ακουστικούς και οπτικούς αισθητήρες που φέρονται από μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα. Ενώ αρχικά εξετάζονται ενδελεχώς είδη υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων και αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαρτογράφησης, επίκεντρο της εργασίας μπορεί να θεωρηθεί η αξιοποίηση των δεδομένων εικόνας κυρίως για την (κατά κανόνα αυτόματη) ανακατασκευή του χώρου και τον υπολογισμό της θέσεων της κάμερας ή της τροχιάς του οχήματος, με τα δεδομένα πλοήγησης και ηχοβολισμού να λειτουργούν συνεπικουρικά για τις ανάγκες της πλοήγησης του οχήματος καθώς και την εξασφάλιση κλίμακας και γεωαναφοράς της χαρτογράφησης. Μέσα από την ανάλυση της επίδρασης που έχει η απώλεια των χρωμάτων, της απορρόφησης και της σκέδασης του φωτός στο νερό, καταγράφονται αλγόριθμοι αποκατάστασης και ενίσχυσης υποβρύχιας εικόνας που εκμεταλλεύονται τον υπολογισμό χαρτών βάθους για την μοντελοποίηση των φαινομένων και τη ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων. Η καθοριστική επίδραση του φαινομένου της διάθλασης αποτυπώνεται στην άρση του κλασικού μοντέλου της κάμερας σημειακής οπής, της συνθήκης συγγραμμικότητας και της κλασικής επιπολικής γεωμετρίας. Η βαθμονόμηση του συστήματος κάμερας-θήκης ή ο σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους υποβρύχιων εικόνων προσεγγίζονται μέσω “γενικών” μοντέλων κάμερας και “γενικευμένης” επιπολικής γεωμετρίας. Μεταξύ άλλων προτείνεται η υπόθεση ενός εικονικού προβολικού κέντρου, όπου είναι δυνατό να συγκλίνουν οι διαθλώμενες ακτίνες, ώστε να ισχύει η συνθήκη συγγραμμικότητας, η υπόθεση μιας εικονικής κάμερας που αντιστοιχεί σε κάθε διαθλώμενη ακτίνα ή ακόμα και η μεταφορά ενός 3D σημείου του χώρου στο επίπεδο της θήκης, μέσω γεωμετρικών δεσμεύσεων του συστήματος κάμερας-θήκης, ώστε η ακτίνα να μην θεωρείται πια διαθλώμενη. Αναλύονται μεθοδολογικές προσεγγίσεις και αποτελέσματα επιλύσεων τεχνικών SfM, VSLAM και VO σε εφαρμογές των πεδίων της ωκεανογραφικής έρευνας, της ενάλιας αρχαιολογίας, των λιμενικών έργων και κατασκευών όσο και της υπεράκτιας βιομηχανίας.

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

## **Integration of Sensor Data from Unmanned Underwater Vehicles for the 3D Reconstruction of Underwater Scenes**

Master Thesis

**Eleni Diamanti**

March 2020

### **ABSTRACT**

In recent years, there is a growing interest in ocean mapping and monitoring, in the fields of both science and industry, partly due to the availability of low cost unmanned underwater vehicles (UUVs) with one or more payload sensors, but also due to a gaining interest of implementing state-of-the-art computer vision algorithms using underwater data. This Master Thesis examines a palette of challenges, emerging through the fusion of navigation and imaging data, acquired by UUV sensors, for the needs of 3D reconstruction of underwater scenes. First, an investigation on marine robotic platforms and their promising steps towards ocean mapping is made as well as a study on inertial, sonar and visual payload sensors. Next, underwater acoustic positioning techniques are analyzed in terms of their operation methods, cost effectiveness, flexibility and level of accuracy on navigation of underwater vehicles and subsequent position triangulation. Yet, the main motivation of this Thesis' was to investigate thoroughly the automatic vision-based 3D reconstruction of underwater scenes, through the adaptation of SfM and VSLAM algorithms to underwater image formation with underwater housings. Thus, the major parameters of light attenuation and refraction need to be studied. Pinhole camera model is no longer valid, and the refractive light propagation model is described through more general camera models which are not characterized by a single view-point. Alike, when it comes to views distorted by refraction, classic epipolar geometry needs to be generalized, and epipolar lines turn into curves. Underwater camera calibration and relative orientation approaches are also studied, in which virtual perspective centers for restoring collinearity and virtual cameras for each ray are computed. The Thesis also reviews SLAM, Visual SLAM and Visual Odometry algorithms along with their application to underwater scenarios. Different approaches and evaluation of results, derived by the fusion of navigation and imaging data for 3D reconstruction applications within oceanographic sciences, maritime archaeology, marine and offshore industry, are presented.

**Keywords:** Unmanned Underwater Vehicles, AUV, ROV, Navigation Sensors, Underwater Acoustic Positioning Systems, Underwater Optics, Refraction, Refractive SfM, Underwater Reconstruction, Underwater SLAM, Visual Odometry

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή .....	1
1   Υποβρύχια Οχήματα .....	4
1.1    Αυτόνομα Οχήματα Επιφανείας - ASV (Autonomous Surface Vehicles) .....	7
1.2    Βαθυσκάφη – DSV (Deep Submergible Vehicles).....	11
1.3    Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα - AUV (Autonomous Underwater Vehicles) .....	13
1.4    Τηλεκατευθυνόμενα οχήματα - ROV (Remote Operated Vehicles) .....	18
1.5    Αισθητήρες καταγραφής και πλοήγησης (Mapping Sensors) .....	23
2   Underwater Acoustic Positioning Systems.....	29
2.1    Τεχνικές Long Baseline (LBL) .....	30
2.2    Τεχνικές Short Baseline (SBL) .....	31
2.3    Τεχνικές Ultra-Short Baseline (USBL) .....	34
2.4    Τεχνικές GPS Intelligent Buoys (GIB).....	38
2.5    Σύγκριση μεθόδων.....	40
3   Βαθμονόμηση υποβρύχων οπτικών συστημάτων .....	42
3.1    Οπτική στο υποβρύχιο περιβάλλον .....	42
3.2    Αλγόριθμοι επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας .....	44
3.2.1    Αλγόριθμοι αποκατάστασης υποβρύχιας εικόνας.....	45
3.2.2    Αλγόριθμοι ενίσχυσης υποβρύχιας εικόνας .....	51
3.2.3    Υβριδικές μέθοδοι επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας .....	54
3.3    Γεωμετρία συστήματος υποβρύχιας κάμερας.....	56
3.4    Βαθμονόμηση συστήματος υποβρύχιας κάμερας.....	62
4   Το πρόβλημα SfM υπό την επίδραση της διάθλασης(Refractive SfM) .....	67
4.1    Ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων .....	68
4.2    Σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους υποβρύχων εικόνων .....	70
4.3    Συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης.....	77
4.4    Πυκνή συνταύτιση υποβρύχων εικόνων.....	77
4.5    Εφαρμογές 3D ανακατασκευής με λήψεις από υποβρύχια οχήματα.....	80
5   Το πρόβλημα SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον .....	98
5.1    Γενική διατύπωση του προβλήματος SLAM .....	100
5.2    Κατηγοριοποίηση μεθοδολογιών SLAM .....	101
5.2.1    Extended Kalman Filter SLAM .....	103
5.2.2    Fast SLAM .....	104

5.2.3	Graph SLAM .....	105
5.2.4	ORB-SLAM2.....	107
5.3	Οπτική Οδομετρία .....	109
5.4	Εφαρμογές Visual SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον .....	110
6	Ανακεφαλαίωση & Ερευνητικό ενδιαφέρον .....	116
	Βιβλιογραφία .....	120
	Ιστότοποι .....	130

# Εισαγωγή

Η αλματώδης ανάπτυξη και διαρκής βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων και αισθητήρων για την πλοήγηση, τον προσδιορισμό θέσης και την καταγραφή γεωμετρικής και οπτικής πληροφορίας, συντελούν στην αυτοματοποίηση μεθόδων τρισδιάστατης ανακατασκευής και αναπαράστασης του χώρου με υψηλά επίπεδα ακρίβειας και ταχύτητας. Η συλλογή της πληροφορίας κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας είναι πλέον δυνατή και σε περιοχές μειωμένης προσβασιμότητας. Συγκεκριμένα, το συχνά απαγορευτικό για άλλες προσεγγίσεις υποβρύχιο περιβάλλον (μειωμένες έως μηδενικές ορατότητες, αυξημένα βάθη) καθιστά τη χρήση μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων, με ενσωματωμένους αισθητήρες πλοήγησης και χαρτογράφησης, μοναδική λύση για πληθώρα εφαρμογών ωκεανογραφίας, υπεράκτιας βιομηχανίας (βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, καλώδια ενέργειας και τηλεπικοινωνιών, θαλάσσια αιολικά πάρκα κ.ά.), κατασκευών (λιμενικές εγκαταστάσεις, γέφυρες, αγωγοί κ.ά.), θαλάσσιας βιολογίας (παρακολούθηση θαλάσσιων ενδιαιτημάτων) και ενάλιας αρχαιολογίας (έρευνα και τεκμηρίωση ενάλιων αρχαιολογικών θέσεων). Οι δύο βασικές κατηγορίες μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων - τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUV) και τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV) - απαντώνται σε σημαντικό πλήθος βιβλιογραφικών αναφορών, σχετικά με τις δυνατότητες χαρτογράφησης που προσφέρουν. Χωρίς το κόστος τους να αποτελεί απαγορευτικό πλέον παράγοντα, καταγράφονται υποβρύχια οχήματα, στελεχωμένα με απλά συστήματα αισθητήρων, των οποίων η συλλεγόμενη πληροφορία αξιοποιείται από την εφαρμογή των αλγορίθμων της Όρασης Υπολογιστών, με εξαγωγή εντυπωσιακών αποτελεσμάτων τρισδιάστατης ανακατασκευής του υποβρύχιου χώρου.

Στους δημοφιλέστερους τύπους αισθητήρων ενός υποβρύχιου οχήματος ανήκουν τα υδρόφωνα που λειτουργούν ως αναμεταδότες ηχητικών σημάτων, τα αδρανειακά συστήματα, όπως η Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης (IMU) που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αδρανειακής επιτάχυνσης, της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής και του μαγνητικού πεδίου, ο αισθητήρας DVL για τη μέτρηση της φαινόμενης ταχύτητας του οχήματος ως προς τον πυθμένα, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα ηχοβολιστικά συστήματα (single beam, multibeam & side scan sonars, sub-bottom profilers) για τη συλλογή βαθυμετρικής και άλλης γεωμετρικής πληροφορίας. Η αδυναμία διάδοσης των δορυφορικών σημάτων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη και διαρκή βελτίωση των ακουστικών συστημάτων πλοήγησης και εντοπισμού θέσης. Τεχνικές που χρησιμοποιούν τα υδρόφωνα ως αναμεταδότες, προσαρμοσμένους σε υποβρύχια οχήματα και πλωτά μέσα υποστήριξης ή ποντισμένους στην περιοχή εργασιών, χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση των οχημάτων, την απόδοση κλίμακας στο προς χαρτογράφηση αντικείμενο και τη σύνδεση της καταγραφόμενης γεωμετρικής και οπτικής πληροφορίας με το σύστημα των γεωγραφικών συντεταγμένων. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι αξιοποίησης των ηχητικών κυμάτων που στέλνουν και λαμβάνουν τα υδρόφωνα είναι οι τεχνικές LBL, SBL, USBL και GIB, οι διαφορές των οποίων προκύπτουν από τη γεωμετρία των συστημάτων τους και τα επίπεδα ακριβείας που συχνά ενισχύονται από το συνδυασμό των ακουστικών τεχνικών πλοήγησης με γυροσκόπια και αισθητήρες DVL.

Οι κάμερες αποτελούν τα βασικά όργανα που χρησιμοποιούν οι αλγόριθμοι SfM, SLAM και VO για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου, προσαρμόζονται με διαφορετικούς τρόπους στα υποβρύχια οχήματα (monocular, stereo cameras) και διακρίνονται όχι μόνο από την εσωτερική τους γεωμετρία αλλά και από τη γεωμετρία του συστήματος στεγανοποίησής τους. Οι

ιδιαιτερότητες του υποβρύχιου περιβάλλοντος επηρεάζουν τόσο τη γεωμετρία του συστήματος κάμερας-θήκης όσο και την ποιότητα της τελικής καταγεγραμμένης εικόνας. Για την επιτυχή εφαρμογή των αλγορίθμων SfM και SLAM κρίνεται απαραίτητη η κατανόηση της υποβρύχιας εικόνας, όπως αυτή διαμορφώνεται υπό την επιρροή των φαινομένων της οπτικής στο νερό. Αλγόριθμοι επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν φαινόμενα όπως η απορρόφηση και σκέδαση του φωτός όσο και η απώλεια των χρωμάτων από τις αρχικές εικόνες, με στόχο αφενός την ποιοτική βελτίωση των εικόνων και αφετέρου την ενίσχυση των αλγορίθμων ανίχνευσης και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών σημείων σε εφαρμογές πολυεικονικής συνταύτισης. Το κυριότερο φαινόμενο ωστόσο που επηρεάζει άμεσα μία εφαρμογή υποβρύχιας τρισδιάστατης ανακατασκευής είναι αυτό της διάθλασης. Η μοντελοποίηση της γεωμετρίας της ακτίνας, καθώς αυτή διαπερνά διαφορετικά μέσα (αέρας, υλικό θήκης, νερό), αποτελεί τη βάση για την επιτυχή βαθμονόμηση του συστήματος της υποβρύχιας κάμερας και τη βελτίωση των επιπέδων ακριβείας του σχετικού προσανατολισμού του στερεοζεύγους των υποβρύχιων εικόνων, της επίλυσης SfM και της πυκνής συνταύτισης. Η επίδραση της διάθλασης καταργεί κλασικές έννοιες όπως το μοντέλο της κάμερας σημειακής οπής, τη συνθήκη συγγραμμικότητας, την τυπική επιπολική γεωμετρία και τις επιπολικές ευθείες, και στη θέση τους εισάγονται όροι όπως οι “γενικές” και non-Single-View-Point κάμερες, η “γενικευμένη” επιπολική γεωμετρία και οι επιπολικές “καμπύλες”. Υποθέσεις εικονικών προβολικών κέντρων για την αποκατάσταση της συνθήκης συγγραμμικότητας και εικονικές κάμερες που μεταφέρουν το σημείο του τρισδιάστατου προβολικού χώρου στο επίπεδο της θήκης εικόνας, ώστε ο προβολικός μετασχηματισμός του στο επίπεδο της θήκης να υλοποιηθεί όπως στο κλασικό μοντέλο της κεντρικής προβολής, προτείνονται προς αποκατάσταση της αλλοιωμένης λόγω διάθλασης γεωμετρίας.

Η ανάγκη συνεχούς προσδιορισμού της θέσης ενός υποβρύχιου οχήματος σε συνδυασμό με τη χαρτογράφηση του περιβάλλοντος χώρου σε πραγματικό χρόνο ενισχύει την τάση εφαρμογής τεχνικών SLAM, με αξιοποίηση των δεδομένων των αισθητήρων του οχήματος. Οι τεχνικές VSLAM και VO τείνουν να υπερτερούν σε ακρίβεια, συνοχή και αποτελεσματικότητα έναντι των μεθόδων dead reckoning που διατηρούν σφάλματα ολίσθησης. Συχνότερα αναφερόμενοι σε υποβρύχιας εφαρμογές, οι αλγόριθμοι Extended Kalman Filter, FastSLAM, GraphSLAM, ORB-SLAM2, SVO-2 και DSO αποδίδουν ικανοποιητικά, από άποψη ακριβείας και υπολογιστικού κόστους, αποτελέσματα.

### **Δομή Εργασίας**

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η έρευνα σχετικά με τις κατηγορίες των υποβρύχιων οχημάτων και τους αισθητήρες που αυτά φέρουν για τη συλλογή πληροφορίας με σκοπό την αξιοποίησή της στον προσδιορισμό της θέσης και της τροχιάς του οχήματος καθώς και την τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου. Οι βασικές κατηγορίες υποβρύχιων οχημάτων που καταγράφονται είναι τα Αυτόνομα Οχήματα Επιφανείας (ASV), τα Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (AUV) και τα Τηλεκατευθυνόμενα Υποβρύχια Οχήματα (ROV), με βάση την αρχή λειτουργία τους και τις δυνατότητες αξιοποίησής τους για εφαρμογές τρισδιάστατης ανακατασκευής υποβρύχιων σκηνών. Έπειτα, καταγράφονται οι δημοφιλέστεροι αισθητήρες (αδρανειακοί, ακουστικοί, οπτικοί) για την πλοήγηση και τη συλλογή δεδομένων χαρτογράφησης.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύονται οι κυρίαρχες τεχνικές υποβρύχιας ακουστικής με σκοπό τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης θέσης του υποβρύχιου οχήματος, οι οποίες είναι οι Long Baseline (LBL), Short Baseline (SBL), Ultra Short Baseline (USBL) και GPS Intelligent Buoys (GIB), ως προς την αρχή λειτουργίας τους, την ευελιξία εφαρμογής τους και τα επίπεδα ακριβείας.



Το 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αφιερώνεται στη μελέτη της επιρροής των συνθηκών και φαινομένων του υποβρύχιου περιβάλλοντος αρχικά στην υποβρύχια εικόνα και έπειτα στο σύστημα “κάμερα-θήκη-αντικείμενο”. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου καταγράφονται οι φυσικές παράμετροι της Οπτικής υποβρυχίως ώστε να κατανοηθεί ο τρόπος δημιουργίας της υποβρύχιας εικόνας, ενώ στο δεύτερο μέρος διερευνώνται αλγόριθμοι ενίσχυσης και αποκατάστασης των εικόνων, με σκοπό τη διόρθωσή τους από τα φαινόμενα που επιδρούν και την ενίσχυση των αλγορίθμων ανίχνευσης και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών σημείων. Στο τρίτο μέρος του κεφαλαίου αναλύεται η γεωμετρία του συστήματος της υποβρύχιας κάμερας, συμπεριλαμβανομένων των γεωμετρικών δεσμεύσεων των θηκών στεγανοποίησης και διερευνώνται μέθοδοι βαθμονόμησης του συστήματος.

Το 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αφορά τη μελέτη του προβλήματος SfM, με βάση την αναίρεση του μοντέλου της κάμερας σημειακής οπής και της κλασικής επιπολικής γεωμετρίας. Μελετώνται οι δημοφιλέστεροι ανιχνευτές και περιγραφείς χαρακτηριστικών σημείων για υποβρύχιας λήψεις, διερευνώνται σύγχρονες προσεγγίσεις αποκατάστασης του σχετικού προσανατολισμού, συνόρθωσης δέσμης και πυκνής συνταύτισης υποβρύχιων εικόνων, υπό το πρίσμα του φαινομένου της διάθλασης, και καταγράφονται βιβλιογραφικές αναφορές εφαρμογών τρισδιάστατης ανακατασκευής από τα επιστημονικά πεδία της ωκεανογραφικής έρευνας, ενάλιας αρχαιολογίας, λιμενικών έργων και υπεράκτιας βιομηχανίας. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα χαρακτηριστικών εφαρμογών τρισδιάστατης ανακατασκευής υποβρύχιων αντικειμένων στα οποία έχει εργαστεί η υπογράφοσα, κατά την τελευταία δεκαετία.

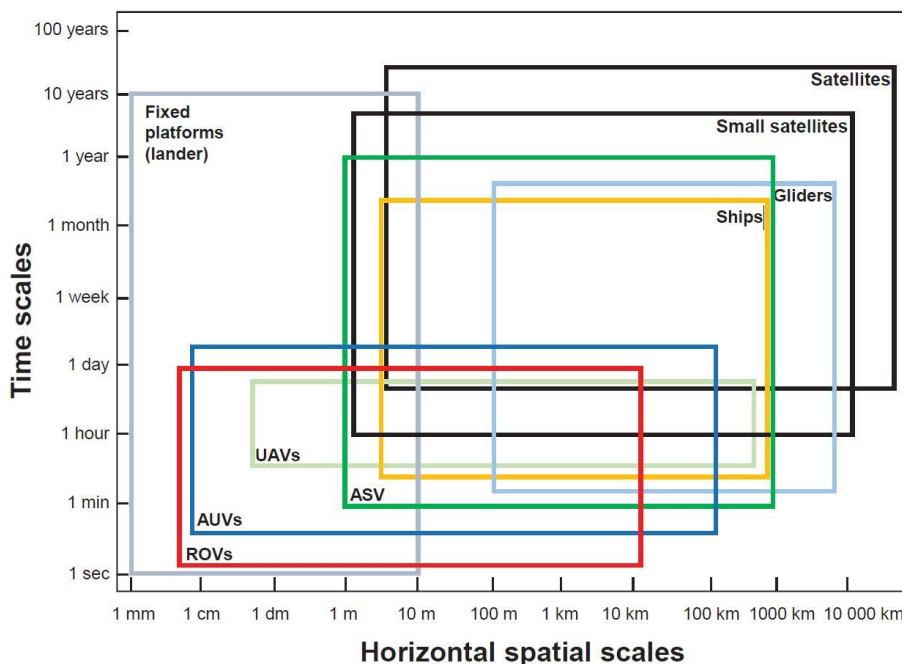
Το 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρεται στο πρόβλημα του Ταυτόχρονου Εντοπισμού Θέσης και Χαρτογράφησης (SLAM) στο υποβρύχιο περιβάλλον με ανάλυση των δημοφιλέστερων αλγορίθμων SLAM και αποτελεσμάτων από τη σχετική βιβλιογραφία.

Το 6<sup>ο</sup> και τελευταίο Κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας συνοψίζει όλα τα πεδία που πραγματεύεται η βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τους τρόπους χαρτογράφησης και τρισδιάστατης ανακατασκευής του υποβρύχιου χώρου, ενώ τονίζεται, τέλος, το πολλαπλό ερευνητικό ενδιαφέρον που προκύπτει από κάθε τμήμα της έρευνας αυτής.

# 1 | Υποβρύχια Οχήματα

Η επιστημονική έρευνα σχετικά με τη χρήση υποβρύχων ρομποτικών συστημάτων για εφαρμογές πλοήγησης, χαρτογράφησης, τεκμηρίωσης και ερμηνείας του υποβρύχιου κόσμου, επικεντρώνεται σήμερα στην ανάπτυξη αυτοματισμών, τη μείωση του οικονομικού και χρονικού κόστους, τα επίπεδα αυτονομίας και ευελιξίας των μεθόδων, την ποσοτική και ποιοτική βελτίωση της συλλεγόμενης πληροφορίας, τη γεωμετρική ακρίβεια και τη μεθοδολογική αποτελεσματικότητα.

Τα μέσα για τη χαρτογράφηση και ερμηνεία του υποβρύχιου περιβάλλοντος, ωστόσο, δεν περιορίζονται στο ίδιο το υποβρύχιο περιβάλλον, αλλά επεκτείνονται και πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε έρευνας ή εργασίας, ως προς τα επίπεδα ανάλυσης, ακρίβειας, χωρικής κάλυψης και χρονικών πλαισίων, υποδεικνύουν ποιο μέσο ή ποιος συνδυασμός μέσων θα χρησιμοποιηθούν. Από χωρική άποψη, οι ανάγκες κυμαίνονται από την τεκμηρίωση υποβρύχιων αρχαιολογικών θέσεων ή τεχνικών έργων που απαιτούν υψηλή ανάλυση έως και τη χαρτογράφηση φαινομένων όπως η κίνηση των θαλάσσιων ρευμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Επίσης, απαντώνται έντονες χρονικές διαφοροποιήσεις ως προς τις απαιτήσεις τεκμηρίωσης, όπως π.χ. για την αποτύπωση της γρήγορης κίνησης ομάδων ψαριών ή μικροοργανισμών ή και της κλιματικής αλλαγής που αντιστοιχεί σε δεκαετίες ή και αιώνες. Τέτοιες χωροχρονικές διαφοροποιήσεις διαμορφώνουν τελικά την επιλογή του μέσου ή των μέσων που υποστηρίζουν τις εφαρμογές τεκμηρίωσης του θαλάσσιου κόσμου (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Χωροχρονική κατηγοριοποίηση χρήσης ρομποτικών συστημάτων και οχημάτων (εναέριων-επιφανείας-υποβρύχιων) για τη χαρτογράφηση του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Παρουσίαση της σχέσης χωρική κάλυψη (ανάλυση) – χρόνος (Nornes, 2018).

Για επίπεδα ευρείας χωρικής και χρονικής κάλυψης, δηλαδή χαμηλής χωρικής ανάλυσης και αραιής χρονικής καταγραφής, τις πιο διαδεδομένες λύσεις προσφέρει η τηλεπισκόπηση, με επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων. Σε μικρότερα ύψη, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles - UAV), εξίσου διαδεδομένα, χρησιμοποιούνται για ευρείες χωρικές καλύψεις και πολύ μικρότερα χρονικά πλαίσια. Με τη διαρκή εξέλιξη των εναέριων μέσων καταγραφής οπτικής και γεωμετρικής πληροφορίας, δεδομένα όπως αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες, δεδομένα Lidar κ.ά., αξιοποιούνται από ένα ευρύ φάσμα επιστημών, των οποίων η πληρέστερη χαρτογράφηση του υποβρύχιου περιβάλλοντος, αποτελεί βασικό στοιχείο.

Στα επίπεδα της επιφάνειας της θάλασσας, τα επανδρωμένα πλωτά μέσα, τα οποία διαθέτουν πλήθος δυνατοτήτων, οργάνων και συστημάτων αισθητήρων για καταγραφή γεωμετρικής πληροφορίας (ηχοβολιστικά όργανα), πλοήγηση και προσδιορισμό υποβρύχιας θέσης σε συνδυασμό με δορυφορικές παρατηρήσεις, καταγραφή φυσικών παραμέτρων (αλατότητα, θερμοκρασία κ.ά.) και για περιορισμένα βάθη οπτική πληροφορία ενισχύονται ή και αντικαθίστανται από αυτόνομα συστήματα με αισθητήρες και όργανα συλλογής όλης της προαναφερθείσας πληροφορίας, τα επονομαζόμενα *Αυτόνομα Οχήματα Επιφανείας* (*Autonomous Surface Vehicles – ASV*). Στα άνω της επιφάνειας της θάλασσας ή “χερσαία” αυτόνομα συστήματα ανήκουν επίσης ωκεανογραφικές πλατφόρμες και αγκυροβόλια σε παράκτιες περιοχές (συχνά απαντώνται ως *landers*, *benthic landers*, *moorings*, *ocean observatories*) που καταγράφουν παρατηρήσεις για βενθικούς οργανισμούς ή φυσικές παραμέτρους, με δυνατότητα μεγάλης χρονικής κάλυψης. Το χωρικό εύρος που καλύπτουν είναι ανάλογο των αισθητήρων που διαθέτουν και συνήθως περιορισμένο, εντός ενός τοπικού συστήματος (Nornes, 2018).

Στα κάτω της επιφάνειας της θάλασσας οχήματα, η βασική κατηγοριοποίηση αφορά κυρίως σε δύο κατηγορίες: τα *μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα* (*Unmanned Underwater Vehicles - UUV*) και τα *επανδρωμένα βαθυσκάφη* (*Deep Submergible Vehicles - DSV*). Η πρώτη κατηγορία, στα οχήματα της οποίας δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη φυσικής παρουσίας χειριστή ή πληρώματος εντός του οχήματος, διαχωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: τα *αυτόνομα υποβρύχια οχήματα* (*Autonomous Underwater Vehicles - AUV*) και τα *τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα* (*Remote Operated Vehicles - ROV*). Αν και συχνά οι μεθοδολογικές και λειτουργικές διαδικασίες των δύο υποκατηγοριών των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων, των ROV και των AUV, επικαλύπτονται, οι βασικές τους διαφορές αφορούν τρία στοιχεία: την πηγή τροφοδοσίας του υποβρύχιου οχήματος, το βαθμό αυτονομίας του (αν καθοδηγείται από χειριστή ή είναι προγραμματισμένο) και τη συνδεσιμότητά του με την επιφάνεια. Η συχνότερη διάκριση μεταξύ των δύο έγκειται στο ότι τα ROV είναι συνδεδεμένα μέσω καλωδιώσεων με την επιφάνεια και το κέντρο ελέγχου, οπότε και η τροφοδοσία, η μετάδοση δεδομένων και ο χειρισμός τους είναι καθαρά θέμα καλωδίου, κάτι που στα AUVs δεν ισχύει. Πέραν αυτού, τα οχήματα ROV διακρίνονται ανάλογα με τον όγκο και τη λειτουργία τους σε *Observation* ή *Inspection-class* ROVs, που είναι η απλούστερη μορφή ενός ROV σε όγκο και σε πλήθος αισθητήρων, σε *Working-class* ROVs, που ο όγκος τους είναι υπερπολλαπλάσιος των πρώτων και το πλήθος και η συνδεσμολογία των αισθητήρων που φέρουν αρκετά πιο σύνθετη, ενώ χρησιμοποιούνται σε πιο απαιτητικές επιχειρήσεις, και, τέλος, σε *Special Use-ROVs* που αναφέρεται σε ROV οχήματα που σχεδιάστηκαν για εξειδικευμένες εφαρμογές και περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά και από τις δύο άλλες κατηγορίες (Christ & Wernli, 2013). Για τα

οχήματα AUV από την άλλη μεριά, μια προσπάθεια ταξινόμησης έχει γίνει με βάση την κατασκευαστική δομή τους και την κίνησή τους υποβρυχίως. Η πιο συνηθισμένη κατηγορία οχημάτων AUV είναι αυτή της “τορπίλης” η οποία διαθέτει μια προπέλα στην πρύμνη της και επιφάνειες-φτερά για τον έλεγχο των περιστροφικών κινήσεων και της κατακόρυφης κίνησης. Μία άλλη υποκατηγορία των οχημάτων AUV είναι τα *Underwater Gliders AUV* (ή *Υποβρύχια Υδροπτερα*), των οποίων βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι η πρόωσή τους δεν επιτυγχάνεται με κινητήρες και προπέλες, αλλά με μεταβολή της πλευστότητάς τους μέσω της κίνησης των πτερυγίων τους και με αλλαγή της άνωσής τους μέσω εσωτερικών δεξαμενών και αντλιών, ενώ διακρίνονται σε τρεις βασικές υποκατηγορίες, το *Slocum glider*, το *Spray glider* και το *Seaglider* (Bellingham, 2009). Επίσης, μία κατηγορία μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων είναι εκείνη των *ρυμουλκούμενων συστημάτων* (*Towed Vehicle Systems*) που αφορά ένα αρκετά ευρύ πεδίο συσκευών, οργάνων ή συστημάτων και οργάνων ρυμουλκούμενων από πλοία ή μικρότερα σκάφη. Μία τυπική διάκριση μεταξύ των ρυμουλκούμενων συστημάτων είναι τα γεωφυσικά συστήματα και τα συστήματα μετάδοσης εικόνας· στα πρώτα προσαρμόζονται ηχοβολιστικά όργανα, μαγνητόμετρα, βυθόμετρα, τομογράφοι υποδομής πυθμένα κ.ά., ενώ τα δεύτερα φέρουν κάμερες καταγραφής εικόνας και βίντεο. Τα επιχειρησιακά βάθη των ρυμουλκούμενων συστημάτων μπορούν να φτάσουν μέχρι και μερικές χιλιάδες μέτρα (Steele et al., 2009). Τέλος, μία κατηγορία υποβρυχίων ρομπότ που συνδυάζουν χαρακτηριστικά από επιμέρους υποκατηγορίες (όπως ρομπότ που δρουν και ως AUV και ως ROV) είναι τα επονομαζόμενα *υβριδικά υποβρύχια οχήματα* (*Hybrid Underwater Vehicles - HUV*). Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το HUV Swimmer της γαλλικής εταιρίας Cybernetix, το οποίο ως AUV μεταφέρει ένα ROV σε μία υποβρύχια βάση ή γενικά κάποιον υποβρύχιο στόχο μεγάλου βάθους, όπου υπάρχει πλήρες σύστημα τροφοδοσίας και ελέγχου του μεταφερόμενου ROV, με σκοπό να ελαχιστοποιούνται οι ανάγκες για ογκώδεις και δαπανηρές καλωδιώσεις μέχρι το σημείο εργασίας.

Τα υποβρύχια ρομποτικά συστήματα, αυτόνομα και μη, φέρουν αισθητήρες καταγραφής και μετάδοσης εικόνας (κάμερες υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με φωτιστικά μέσα) που έχουν δώσει στα επιστημονικά πεδία της Φωτογραμμετρίας και της Όρασης Υπολογιστών τη δυνατότητα να επεκταθούν, ήδη από τη δεκαετία του '60, όπου και έγιναν οι πρώτες απόπειρες φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων με βαθυσκάφη από τους Pollio και Bass (Da Silva, 2012), σε δυσπρόσιτα υποβρύχια περιβάλλοντα, όπως τα εξαιρετικά μεγάλα βάθη των 6.000 m και οι μεγάλες ωκεάνιες εκτάσεις. Οι Kwasnitschka et al. (2016) δίνουν μια καταγραφή μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων (AUV - ROV), των τελευταίων δύο δεκαετιών (1996-2016), που φέρουν εικονιστικά συστήματα και έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη φωτορεαλιστική ανακατασκευή του υποβρυχίου περιβάλλοντος. Καταγράφονται εκεί, με χρονολογική σειρά, οι τύποι των υποβρυχίων οχημάτων, οι μέθοδοι ανακατασκευής του χώρου (*Mosaicking*, *Structured Light*, Φωτογραμμετρία είτε στέρεο είτε *Structure from Motion*), οι τύποι των αισθητήρων, οι περιοχές και τα βάθη που μελετήθηκαν. Στη συνέχεια, επιχειρείται μία αναλυτικότερη μελέτη των βασικότερων ρομποτικών συστημάτων (υποβρυχίων και επιφανείας) μέσα από την πορεία της τεχνολογικής εξέλιξής τους, τα όργανα και τους αισθητήρες που φέρουν, τις μεθόδους πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης που χρησιμοποιούν καθώς και πεδίων εφαρμογών που εξυπηρετούν, με έμφαση στις εφαρμογές χαρτογράφησης και ανακατασκευής, γεωμετρικής και εικονιστικής, του υποβρυχίου περιβάλλοντος.

## 1.1 Αυτόνομα Οχήματα Επιφανείας - ASV (Autonomous Surface Vehicles)

Τα Αυτόνομα Οχήματα Επιφανείας (Autonomous Surface Vehicles - ASV), κατηγορία των Μη Επανδρωμένων Οχημάτων Επιφανείας (Unmanned Surface Vehicles - USV) αποτελούν ειδική κατηγορία των ρομποτικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη θάλασσα και διαφοροποιούνται, εξ ορισμού από τα υποβρύχια οχήματα, αφού κινούνται στην επιφάνεια της θάλασσας. Διαθέτουν ηχοβολιστικούς αισθητήρες και δυνατότητα πλοήγησης μέσω δορυφορικών δεκτών και υποστηρίζονται από ένα σταθερό κέντρο ελέγχου, εγκατεστημένο σε κάποιο σκάφος υποστήριξης είτε και χερσαίο, απ' όπου δίνονται όλες οι εντολές και καταγράφεται όλη η συλλεγόμενη πληροφορία. Τα οχήματα ASV, αν και σε αντίθεση με τα υποβρύχια οχήματα έχουν περιορισμούς στα είδη των μετρήσεων και της πληροφορίας που μπορούν να συλλέξουν, είναι σε θέση να καλύψουν περιοχές ενδιαφέροντος πολύ μεγάλης εμβέλειας λόγω της διαρκούς και αξιόπιστης επικοινωνίας που έχουν με το κέντρο ελέγχου μέσω δορυφορικών μετρήσεων. Η ανάπτυξη και βελτίωση των οχημάτων ASV είναι αλματώδης την τελευταία δεκαετία και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλαπλές εφαρμογές, είτε υποστηρικτικά των AUV και ROV είτε αυτόνομα. Κατά την αυτόνομη χρήση τους, το μέγιστο επιχειρησιακό βάθος αξιόπιστης λειτουργίας ανέρχεται στα 10 m, ανάλογα με τη γεωμορφολογία του πυθμένα, τις συνθήκες της περιοχής εργασιών και τους αισθητήρες που διαθέτουν. Συνήθως, τα οχήματα ASV διαθέτουν βενζινοκινητήρες κάτι που επιτρέπει την κίνησή τους με μεγάλη ταχύτητα σε σύγκριση με άλλα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα. Σε ερευνητικό επίπεδο έχουν κατασκευαστεί αντίστοιχα ηλεκτροκίνητα οχήματα επιφανείας (WHOI Jetyak, Coimbra Squirtle, ASV C-Cat, MIT SCOUT) με εξίσου καλές επιδόσεις και αισθητά χαμηλότερο κόστος (Kimball, 2014). Επίσης, μοντέλα οχημάτων ASV εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή, αιολική ή κυματική, κάτι που αποτελεί μεγάλη πρόκληση από την άποψη της αυτονομίας τους. Τέτοια παραδείγματα είναι το πρώτο ιστιοφόρο ASV, από την εταιρία Unmanned Ocean Vehicles (UOV), που στα ιστία του φέρει φωτοβολταϊκά πάνελ και εκμεταλλεύεται ταυτόχρονα ηλιακή και αιολική ενέργεια και το ASV της Liquid Robotics, που παράλληλα με την ηλιακή, χρησιμοποιεί κυματική ενέργεια για την κίνηση των προπελών του, επιτυγχάνοντας αυτονομία της τάξης των 142 ημερών και 2500 ναυτικών μιλίων λειτουργίας (Manley, 2008).

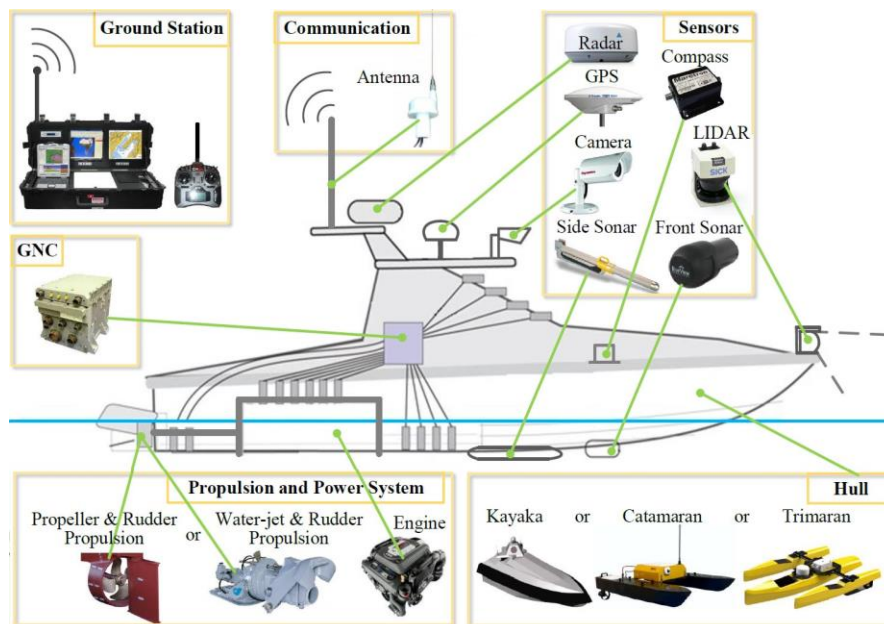
Με τη δυνατότητα κίνησης σε μεγάλη ταχύτητα και την ενσωμάτωση δορυφορικών παρατηρήσεων από δέκτες GNSS που είναι προσαρμοσμένοι στο όχημα επιφανείας, γίνεται δυνατή η κάλυψη μεγάλων εκτάσεων και η χαρτογράφησή τους σε υψηλή ανάλυση. Οι αισθητήρες που διαθέτουν τα οχήματα ASV είναι μεταξύ άλλων ηχοβολιστικά συστήματα (απλής ή πολλαπλής δέσμης), οπτικοί αισθητήρες (κάμερες RGB και RGBD, υποβρύχια υπερφασματικές κάμερες), μαγνητόμετρα, γυροσκοπικές πυξίδες, δέκτες GPS κ.ά., προσφέροντας υψηλής ανάλυσης πληροφορία για εκτεταμένες περιοχές σε μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός ότι το όχημα κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας χαρακτηρίζεται αφενός ως πλεονέκτημα λόγω της δυνατότητας λήψεων δορυφορικών παρατηρήσεων σε πραγματικό χρόνο και αφετέρου ως μειονέκτημα λόγω της έκθεσης του οχήματος στις επικρατούσες στην περιοχή συνθήκες (ρεύματα, κυματισμός, κίνηση σκαφών) (Nornes, 2018).

Τα πρώτα μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας κατασκευάστηκαν κατά τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο με τους Καναδούς να αναπτύσσουν πρώτοι το USV COMOX, ένα τορπιλοβόλο σκάφος για να συμμετάσχει στη μεγαλύτερη απόβαση της ιστορίας, εκείνη στην Νορμανδία. Η χρήση του εκεί περιορίστηκε σε ευθύγραμμες πορείες, δημιουργώντας ένα παραπέτασμα καπνού για την

κάλυψη των αποβατικών δυνάμεων. Την ίδια σχεδόν χρονική περίοδο το Αμερικάνικο Ναυτικό ανέπτυξε διάφορα μη επανδρωμένα σκάφη για εργασίες όπως η πόντιση ναρκών, η εξουδετέρωση εκρηκτικών, οι ασκήσεις διάσωσης, η καταγραφή μετεωρολογικών φαινομένων ή η ναρκαλιεία που αποτελεί βασική δραστηριότητα, με τους περισσότερους πολεμικούς στόλους έκτοτε να διαθέτουν μη επανδρωμένα ναρκαλιευτικά σκάφη (Bertram, 2008).

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας στα ηλεκτρονικά, διαθέτοντας πλέον τη δυνατότητα του ελέγχου, της τηλεκατεύθυνσης, της αναμετάδοσης εικόνας σε πραγματικό χρόνο και της ακριβούς γεωαναφοράς της θέσης τους καθώς και πλήθος αισθητήρων και συστημάτων, τα μη επανδρωμένα σκάφη επιφανείας βρίσκουν πολλές χρήσεις σε μεγάλο εύρος της έρευνας και της βιομηχανίας, πέραν των αμιγώς στρατιωτικών σκοπών, μεταξύ των οποίων υδρογραφικές, τοπογραφικές, γεωλογικές, μετεωρολογικές και περιβαλλοντικές μελέτες. Οι Liu et al. (2016) επιχειρούν μια καταγραφή οχημάτων ASV/USV από το 1985 ως και το 2016 ανά ερευνητικό στόχο, λειτουργία και τελικά αποτελέσματα εφαρμογής, αλλά ο κατάλογος αυτός δεν μπορεί παρά να παραμένει ελλιπής με την διαρκή εξέλιξη των οχημάτων επιφανείας από πλευράς κατασκευής, αυτονομίας, απόδοσης και δυνατότητας εισαγωγής αισθητήρων. Μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας αναπτύσσονται, βελτιώνονται και χρησιμοποιούνται παράλληλα για στρατιωτικούς, ερευνητικούς και τελικά εμπορικούς σκοπούς. Δεκάδες πλέον εμπορικά ASV είναι διαθέσιμα με δυνατότητες και κόστος ανάλογα των πεδίων εφαρμογής.

Τα δομικά στοιχεία (Εικόνα 1.2) ενός μη επανδρωμένου οχήματος επιφανείας είναι: (i) το κατασκευαστικό μέρος τους, δηλαδή το ίδιο το σκάφος (συνηθέστεροι τύποι σκαφών είναι τα φουσκωτά, τα καγιάκ, τα καταμαράν και τα τριμαράν και επιλέγονται ανάλογα με τη χρήση του οχήματος), (ii), το σύστημα πρόωσης (προπέλες ή/και water jet), (iii) τον κινητήρα, (iv) το σύστημα πλοήγησης και ελέγχου (Guidance Navigation Control – GNC), (v) τους αισθητήρες πλοήγησης και συλλογής δεδομένων (GPS, IMU, sonar, radar, Lidar, κάμερες κ.ά.), (vi) το κέντρο ελέγχου (είτε σε κάποια χερσαία εγκατάσταση είτε εν πλω σε σκάφος υποστήριξης) και (vii) το σύστημα επικοινωνίας (ενσύρματο ή ασύρματο) με το κέντρο ελέγχου.



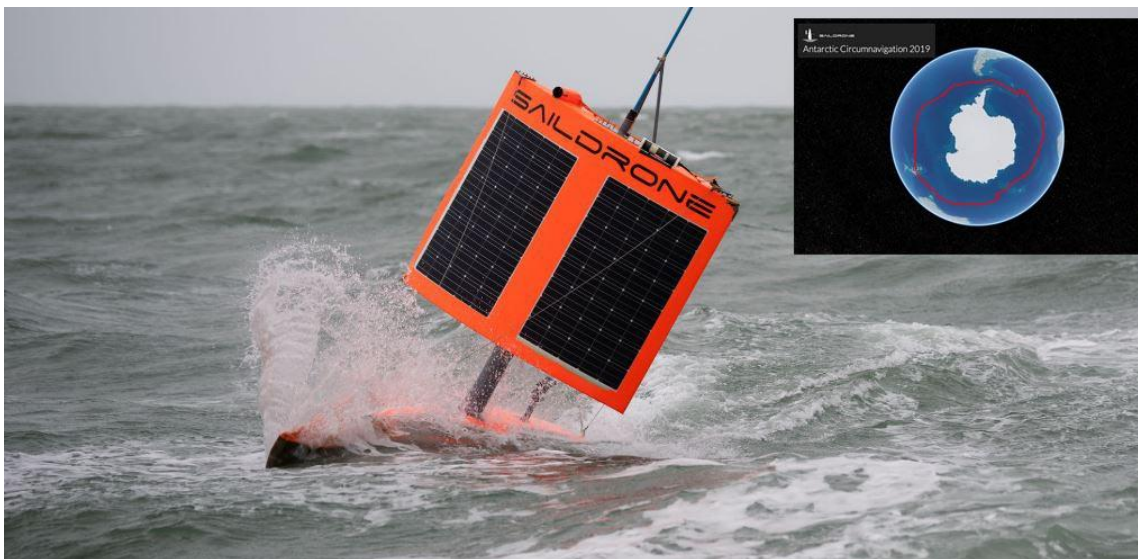
Εικόνα 1.2: Δομικά στοιχεία ενός Αυτόνομου Οχήματος Επιφανείας (Liu et al., 2016)

Από τα πρώτα οχήματα ASV της ακαδημαϊκής κοινότητας ήταν το ARTEMIS που κατασκευάστηκε το 1993 από το MIT (MIT Sea Grant College Program), που έμοιαζε με αλιευτική τράτα αλλά με πολύ μικρότερο μέγεθος και χρησιμοποιήθηκε για συλλογή βαθυμετρικών δεδομένων. Το ARTEMIS διαδέχθηκε το 1998, πάλι από το MIT, το AutoCAT ή ACES (Autonomous Coastal Exploration System), ένα όχημα ASV, το οποίο αναβαθμίστηκε σημαντικά τόσο στα μηχανολογικά μέρη του όσο και στους αισθητήρες για συλλογή υδρογραφικών δεδομένων (Manley, 2008).

Αντίστοιχα, το Ωκεανογραφικό Ινστιτούτο Woods Hole κατασκεύασε το 2014 ένα αυτόνομο όχημα επιφανείας, το Jetpak, ένα κλασικό καγιάκ ποταμού μήκους 3 m και βάρους 160 kg, εξοπλισμένο με βενζινοκινητήρα, μονάδα εκτόξευσης νερού (water jet) στην πρύμνη του για έλεγχο της κίνησής του, κέντρο ελέγχου και επικοινωνίας (Guidance Navigation & Control - GNC), δορυφορικό δέκτη, ηχοβολιστικά όργανα και όργανα μετρήσεων βενθικών παραμέτρων (Nornes, 2018). Κινείται είτε αυτόνομα, προγραμματισμένο να ακολουθεί συγκεκριμένες πορείες, είτε με τηλεχειρισμό και είναι κατάλληλο για χαρτογράφηση του πυθμένα ή μέτρηση φυσικών παραμέτρων σε περιοχές με μικρά βάθη, αντί για χρήση υποβρύχιων ρομπότ, ή περιοχές καταδυτικά ακατάλληλες. Το Jetpak χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια από το WHOI σε συνεργασία με πανεπιστήμια όπως το NTNU (Norwegian University of Science & Technology) και άλλους ερευνητικούς φορείς σε εφαρμογές χαρτογράφησης και παρακολούθησης φαινομένων στον Αρκτικό Κύκλο.

Όμοια με το Woods Hole, το πανεπιστήμιο του Aarhus κατασκεύασε ένα αυτόνομο όχημα επιφανείας, το Arctic Research Centre Autonomous Boat (ARCAB) για τη λήψη βυθομετρικών και ωκεανογραφικών δεδομένων στη Γροιλανδία και σε άλλες περιοχές του Αρκτικού Ωκεανού. Το ASV ARCAB, τύπου καταμαράν, διαθέτει μπαταρίες συνολικής αυτονομίας δύο ωρών και μπορεί να κινηθεί είτε ενσύρματα με τηλεκατεύθυνση είτε ασύρματα με προγραμματισμό της πορείας του. Διαθέτει επίσης δέκτη GNSS, έναν αισθητήρα Lidar για την αποφυγή εμποδίων στην επιφάνεια και ένα ηχοβολιστικό σύστημα για τις βυθομετρίες (Carlson et al., 2019).

Ο Εθνικός Ωκεανογραφικός και Ατμοσφαιρικός Οργανισμός των ΗΠΑ (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) εισάγει στην έρευνά του ήδη από το 2007 μία κατηγορία οχημάτων USV, τα Saildrones, για την παρακολούθηση και τη χαρτογράφηση κλιματολογικών φαινομένων και κινήσεων ψαριών και θηλαστικών, σε δυσπρόσιτες περιοχές του Αρκτικού και του Ειρηνικού Ωκεανού. Τα Saildrones κινούνται με αιολική και ηλιακή ενέργεια, φέρουν αισθητήρες συλλογής δεδομένων και όργανα πλοήγησης και προγραμματίζονται να ακολουθούν συγκεκριμένες πορείες. Τον Ιανουάριο του 2019 ένας “στόλος” από Saildrones προγραμματίστηκε, στο πλαίσιο του προγράμματος Saildrone Antarctic Circumnavigation (Εικόνα 1.3), να επιχειρήσει με αφετηρία τη Νέα Ζηλανδία τον πρώτο αυτόνομο περίπλου της Ανταρκτικής, με τρία από τα Saildrones να καλύπτουν περί τα 22.000 χιλιόμετρα επιστρέφοντας επιτυχώς στο σημείο εκκίνησης, σε 196 ημέρες, έχοντας συλλέξει υψηλής ποιότητας και ανάλυσης περιβαλλοντικά δεδομένα με ταυτόχρονη γεωαναφορά τους, ενώ κατέγραφαν με κάμερες, ανά διαστήματα, την πορεία και τις επικρατούσες συνθήκες.



Εικόνα 1.3: Ο πρώτος περίπλους της Ανταρκτικής από αυτόνομα οχήματα επιφανείας Saildrones ([www.saildrone.com](http://www.saildrone.com))

Οι Leedekerken et al. (2010) προτείνουν τη δημιουργία μίας αυτόνομης πλατφόρμας επιφανείας για την αποτύπωση περιοχών και αντικειμένων που θεωρούνται ημιβυθισμένα, όπως λιμενικές εγκαταστάσεις και υποδομές (λιμάνια, προβλήτες, γέφυρες κ.ά.). Η ταυτόχρονη τεκμηρίωση εντός και εκτός νερού επιτυγχάνεται με συλλογή γεωμετρικής πληροφορίας από ηχοβολιστικό όργανο και σύστημα Lidar - κάμερες - ραντάρ, ενώ το όχημα, τύπου καγιάκ, είναι εξοπλισμένο επίσης με δέκτη GNSS, σύστημα IMU και τεχνικές dead reckoning που ενισχύονται από DVL, για την πλοήγηση του οχήματος και τη γεωαναφορά του συστήματος. Για ζητήματα όπως η διακοπή του σήματος GPS, οι στροφές του οχήματος λόγω κυματισμού και ρευμάτων ή η κίνηση των υπό μελέτη αντικειμένων λόγω περιβάλλοντος (όπως οι πλωτές κατασκευές ή ο αναδιαμορφωμένος πυθμένας) προτείνουν την εφαρμογή αλγορίθμων SLAM που λειτουργούν ως εργαλεία συνόρθωσης των επιμέρους μοντέλων που προκύπτουν από τις παρατηρήσεις sonar και lidar. Για τη συνένωση των νεφών πάνω και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βασισμένοι στον γνωστό αλγόριθμο ICP.

Οι Papadopoulos et al. (2014), παρόμοια με τους Leedekerken et al. (12), προτείνουν τη δημιουργία ενός αυτόνομου οχήματος επιφανείας (SCOUT kayak) για την ταυτόχρονη τρισδιάστατη ανακατασκευή και απεικόνιση ημιβυθισμένων θαλάσσιων και παράκτιων κατασκευών και υποδομών, όπως γέφυρες και λιμενικές εγκαταστάσεις, ή ακόμα και κινούμενων μονάδων, όπως πλατφόρμες, πλωτές προβλήτες ή σκάφη, τόσο πάνω όσο και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή αντικειμένων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας προσαρμόστηκε πάνω στο ASV ένας σαρωτής Lidar, με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του την ταχύτητα σάρωσης, που στόχος ήταν να υπερβαίνει την ταχύτητα της κίνησης του ASV και του σαρωνόμενου αντικειμένου. Για τη σάρωση των υποβρύχιων μερών, στο όχημα προσαρμόστηκε ένα μονοδεσμικό σόναρ πλευρικής σάρωσης. Για τη συλλογή όλων των σαρώσεων καθώς και τις κινήσεις του οχήματος ASV, το όχημα είναι εξοπλισμένο με σύστημα διασυνδεδεμένων υπολογιστών, το οποίο συνδέεται με καλώδιο με το κέντρο ελέγχου για περιπτώσεις τηλεκατεύθυνσης είτε προγραμματίζεται να λειτουργεί αυτόνομα μέσω του λογισμικού MOOS. Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή των ημιβυθισμένων αντικειμένων, η ομάδα επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και εφαρμογή τριών ειδών αλγορίθμων: ενός για τη



συνένωση και βελτιστοποίηση των τρισδιάστατων νεφών για τα εκτός νερού τμήματα που προέκυπταν από τις σαρώσεις Lidar, ενός για τη δημιουργία τρισδιάστατων επιφανειών από τα εκτός νερού συνενωμένα νέφη και, τέλος, ενός αρχικά για τον τριγωνισμό των υποβρύχιων τρισδιάστατων νεφών και στη συνέχεια για τη συνένωση των επιμέρους τρισδιάστατων επιφανειών των βυθισμένων και των μη βυθισμένων τμημάτων (Papadopoulos et al., 2014).

Σε ενάλιες αρχαιολογικές έρευνες, τα αυτόνομα οχήματα επιφανείας βρίσκουν εφαρμογή στην τεκμηρίωση βυθισμένων, έως το βάθος των 10 m, ή/και ημιβυθισμένων αρχαιολογικών θέσεων. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το ASV Pladgyros που δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Ζάγκρεμπ για τις ανάγκες της τεκμηρίωσης της αρχαίας βυθισμένης πόλης της Παραλίου Καισαρείας στο Ισραήλ. Το Pladgyros είναι ένα μικρού μεγέθους ρομπότ επιφανείας, εξοπλισμένο με σύστημα ROS για την αυτόνομη κίνηση, πλοήγηση και επικοινωνία του με το χερσαίο κέντρο ελέγχου. Το σύστημα πλοήγησής του αποτελείται από αισθητήρες INS, GPS και DVL, αποδίδοντας μια οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των 10-15 cm. Η υποθαλάσσια γεωμετρική πληροφορία συλλέγεται από το DVL (με μια πυκνότητα των 40 σημείων ανά m<sup>2</sup>) και από φωτογραμμετρική επεξεργασία βίντεο από δύο κάμερες προσαρμοσμένες στο κάτω τμήμα του ρομπότ. Από τον συνδυασμό των δεδομένων από το DVL, την εικονιστική πληροφορία και την ταυτόχρονη γεωαναφορά του μοντέλου από τους δέκτες GPS/INS, προέκυψαν βυθομετρικοί χάρτες, τρισδιάστατα μοντέλα πυθμένα και ορθοφωτοχάρτες που εμπλούτισαν την πλατφόρμα GIS της ερευνητικής αποστολής (Vasilijevic, 2015).

## 1.2 Βαθυσκάφη – DSV (Deep Submergible Vehicles)

Στην κατηγορία των επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων, τα βαθυσκάφη (Deep Submergible Vehicles - DSV) επιχειρούν καταδύσεις σε βάθη και συνθήκες, όπου άλλα υποβρύχια οχήματα αδυνατούν να προσεγγίσουν, για χρονικά διαστήματα 8 έως 10 ωρών, με δυνατότητα μεταφοράς 2 έως 4 ατόμων. Οι κατακόρυφες αποστάσεις που διανύουν είναι συνήθως υπερπολλαπλάσιες των οριζόντιων. Η πρώτη και μεγαλύτερου βάθους επιστημονική κατάδυση πραγματοποιήθηκε το 1960 από τους Jacques Piccard και Donald Walsh, στο βαθύτερο σημείο των ωκεανών, την Τάφρο των Μαριαννών, με το ελβετικό βαθυσκάφος Trieste, φτάνοντας το βάθος των 10.915 m και μένοντας στον πυθμένα για 20 λεπτά, σε μία παραμονή στο βυθό συνολικής διάρκειας εννέα ωρών (Steele et al., 2009). Ωστόσο, το μεγαλύτερο αριθμό καταδύσεων στην ιστορία της ωκεανογραφικής έρευνας (εκτιμώνται άνω των 4.500) έχει εκτελέσει το βαθυσκάφος Alvin, ιδιοκτησίας του αμερικανικού ναυτικού, το οποίο κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία το 1964 από το ωκεανογραφικό ινστιτούτο Woods Hole. Αν και καταδύεται ήδη από τότε, το Alvin παραμένει τεχνολογικά στην κορυφή των επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων, αφού διαρκώς αναβαθμίζεται με πληθώρα καινοτομιών για τη συγκεκριμένη κατηγορία οχημάτων. Εργονομική καμπίνα χωρητικότητας τριών ατόμων, βελτιωμένες συνθήκες ορατότητας, μεγαλύτερο οπτικό εύρος παρατήρησης, σημαντικά αυξημένοι χρόνοι παραμονής στο βυθό, σύγχρονα φωτιστικά μέσα, κάμερες υψηλής ανάλυσης, μείωση χρόνου προσέγγισης του πυθμένα, μεγαλύτερη ευελιξία κινήσεων, σύγχρονα γεωφυσικά όργανα και τέλος επιχειρησιακό βάθος 6.500 m είναι μεταξύ των χαρακτηριστικότερων καινοτομιών του. Η επιστημονική ομάδα του Woods Hole αποσυναρμολογεί το βαθυσκάφος για επιθεώρηση και ανακατασκευή σχεδόν κάθε τρία με πέντε χρόνια. Η πιο γνωστή στο ευρύ κοινό επιχείρηση του βαθυσκάφους Alvin ήταν αυτή του εντοπισμού του ναυαγίου του Τιτανικού, το 1986, σε βάθος 3.700 m.

Λίγα χρόνια αργότερα, στα τέλη της δεκαετίας του 60, καταγράφονται οι πρώτες απόπειρες φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων σε αρχαιολογικές θέσεις που εντοπίστηκαν σε μεγάλα βάθη, από τους Pollio και Bass, με χρήση των βαθυσκαφών Pegasus, Star III και Aluminaut. Στα βαθυσκάφη αυτά προσαρμόστηκαν συστήματα καμερών ώστε να καταγράφουν στεροσκοπικές εικόνες, κάτι που επιχειρήθηκε επίσης από τον Γάλλο αρχαιολόγο Liotu το 1973, με το βαθυσκάφος Asherah για τη φωτογραμμετρική τεκμηρίωση αρχαίου ναυαγίου στη Μασσαλία. Η εισαγωγή γεωμετρικών δεσμεύσεων στο φωτογραμμετρικό μοντέλο επετεύχθη με μία σταθερή μεταλλική κατασκευή γνωστών διαστάσεων που τοποθετήθηκε στο ναυάγιο (Da Silva, 2012).

Από το 2000 και έπειτα, πραγματοποιούνται σημαντικές επιτυχίες φωτογραμμετρικής τεκμηρίωσης ενάλιων αρχαιολογικών ερευνών με χρήση βαθυσκαφών. Δύο από τα πιο γνωστά project είναι το VENUS και το GROPLAN από το γαλλικό επιστημονικό κέντρο CNRS, τον γαλλικό οργανισμό ενάλιας αρχαιολογίας DRASSM και τη γαλλική εταιρία COMEX που κατασκευάζει και χρησιμοποιεί τα βαθυσκάφη. Στο VENUS project πραγματοποιήθηκαν, ήδη από το 2000, καταδύσεις με το βαθυσκάφος REMORA 2000, πληρώματος δύο ατόμων, επιχειρησιακού βάρους 610 m και επιχειρησιακού χρόνου πέντε ωρών, στο ρωμαϊκό ναυάγιο Port- Miu C στη Μασσαλία σε βάθος 105 m, με σκοπό τη λήψη εικόνων για φωτογραμμετρική επεξεργασία και τη συλλογή βυθομετρικών δεδομένων από ηχοβολιστικό όργανο πολλαπλής δέσμης. Πιο πρόσφατα, το 2014, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος GROPLAN, το βαθυσκάφος REMORA 2000 (Εικόνα 1.4) συνέχισε την ερευνητική του δράση σε φοινικικό ναυάγιο που βρέθηκε στη Μάλτα σε βάθος 110 m. Για τη φωτογράφιση του χώρου τοποθετήθηκαν τρεις κάμερες (AVT Prosilica) σε μπάρα στο μπροστινό μέρος του βαθυσκαφών, ενώ παράλληλα εξασφαλίστηκε σταθερή παροχή φωτισμού HMI στην περιοχή φωτογράφισης. Η βαθμονόμηση των καμερών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: το πρώτο αφορούσε τη βαθμονόμηση του κάθε συστήματος κάμερα - housing για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού, ενώ το δεύτερο στάδιο βαθμονόμησης, που εκτελείτο πριν από κάθε κατάδυση, αφορούσε το σύστημα των τριών καμερών. Το δεύτερο στάδιο βαθμονόμησης ήταν εκείνο που εξασφάλισε και την κλίμακα στο φωτογραμμετρικό μοντέλο. Τα δεδομένα από τις κάμερες μεταδίδονταν ενσύρματα στον υπολογιστή εντός του βαθυσκαφών, όπου με μεθοδολογία Οπτικής Οδομετρίας (Visual Odometry), ήταν δυνατή η ανακατασκευή του 3D χώρου του ναυαγίου σε πραγματικό χρόνο (Drap et al., 2015).



Εικόνα 1.4: Το βαθυσκάφος REMORA 2000 στο ναυάγιο Xlendi ([www.groplan.eu](http://www.groplan.eu))

Γνωστό στα ελληνικά χωρικά ύδατα είναι το βαθυσκάφος ΘΕΤΙΣ, τύπου REMORA 2000, που κατασκευάστηκε το 1999 από την COMEX για λογαριασμό του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.), αγγίζοντας ένα συνολικό κόστος περίπου δύο εκατομμυρίων ευρώ. Το ΘΕΤΙΣ ζυγίζει περίπου πέντε τόνους, έχει χωρητικότητα δύο ατόμων, διαθέτει κάμερες υψηλής ανάλυσης, προβολείς, δύο υδραυλικούς βραχίονες με δυνατότητα ανέλκυσης αντικειμένων

βάρους έως και 100 kg, πρόσθιο ηχοβολιστικό, αντλία αναρρόφησης και είναι δυνατό να φέρει πλήθος επιστημονικών οργάνων μέτρησης και δειγματοληψίας νερού και ιζήματος. Το επιχειρησιακό του βάθος είναι 610 m και ο επιχειρησιακός του χρόνος οκτώ με εννέα ώρες. Από το 2000 έως σήμερα το ΘΕΤΙΣ έχει χρησιμοποιηθεί σε δεκάδες ερευνητικές αποστολές με αντικείμενα την ενάλια αρχαιολογία (αρχαία και νεότερα ναυάγια), τα βενθικά οικοσυστήματα όπως οι κοραλλιογενείς περιοχές, τα υποθαλάσσια ηφαίστεια (Κολούμπο, Νίσυρος, Μήκος κ.ά.), η πόντιση επιστημονικών οργάνων για γεωφυσικές και περιβαλλοντικές μελέτες και οι έρευνες εντοπισμού ναυτικών ή αεροπορικών ατυχημάτων στη θάλασσα. Το 2016 το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. συνεργάστηκε με το Woods Hole συνεργάστηκαν σε ένα ερευνητικό πρόγραμμα για τη διερεύνηση περιοχών με υποψία υδροθερμικών κοιτασμάτων σε Μήλο και Σαντορίνη σε βάθη από 90 έως 350 m. Το βαθυσκάφος ΘΕΤΙΣ εξοπλισμένο με τελευταίας τεχνολογίας αισθητήρες μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων, σόναρ αποφυγής εμποδίων και σύστημα πλοήγησης υψηλής ακρίβειας ανέλαβε την λεπτομερή και ακριβή χαρτογράφηση των θέσεων υδροθερμικών ευρημάτων σε πραγματικό χρόνο. Ως σύστημα πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης επιλέχθηκε η μέθοδος Long Baseline, που ενισχύθηκε από παρατηρήσεις dead reckoning μέσω αισθητήρων καταγραφής της ταχύτητας Doppler (DVL). Μεταξύ των αποτελεσμάτων της έρευνας, παρήχθησαν χάρτες των τριών εντοπισμένων θέσεων με υδροθερμική δραστηριότητα σε Μήλο και Σαντορίνη σε βάθη 115 και 340 m αντίστοιχα (Camilli et al., 2016).

### **1.3 Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα - AUV (Autonomous Underwater Vehicles)**

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUVs) είναι μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα που λειτουργούν χωρίς ενσύρματη τροφοδοσία, κινούνται με ενέργεια που προέρχεται από ενσωματωμένες μπαταρίες και προγραμματίζονται έτσι ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες αποστολές και να επιστρέφουν στην αφετηρία τους ή σε προκαθορισμένους σταθμούς για επαναφόρτιση, ανταλλαγή δεδομένων ή ραδιοεπικοινωνία με το σκάφος υποστήριξης ή το δορυφόρο. Το πρώτο AUV κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένων Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου της Washington από τους Murphy, Francois και Ewart, το 1957, αρχικά με το όνομα SPURV (Special Purpose Underwater Research Vehicle) με σκοπό τη μελέτη παραμέτρων όπως η διάχυση και η μετάδοση του ήχου στο νερό. Το όχημα αυτό κατασκευάστηκε με χαρακτηριστικά αυτονομίας 5.5 ωρών και μέγιστο βάθος τα 3.000 m. Αργότερα, το 1973, το αμερικάνικο ναυτικό κατασκεύασε το αυτόνομο όχημα AUSS (Advanced Unmanned Search System) για στρατιωτικές επιχειρήσεις όπως η βύθιση των πυρηνικών υποβρυχίων USS Thresher και USS Scorpion και η ανίχνευση βόμβας υδρογόνου στην Ισπανία. Στα τέλη της δεκαετίας του '80, η νορβηγική εταιρία Kongsberg κατασκεύασε το AUV HUGIN, αυτονομίας 24 ωρών και μέγιστου επιχειρησιακού βάθους 1000 m, το οποίο διέθετε εξελιγμένους αισθητήρες πλοήγησης και κάμερες υψηλής για την εποχή ανάλυσης, για την χαρτογράφηση περιοχών ενδιαφέροντος και τη συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων. Το ωκεανογραφικό ινστιτούτο Woods Hole κατασκεύασε το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα ABE (Autonomous Benthic Explorer), αυτονομίας 34 ωρών και επιχειρησιακού βάθους 5.000 μέτρων (Κανακάκης, 2007). Το 1980 πραγματοποιήθηκε στο Durham των ΗΠΑ το πρώτο συνέδριο αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων ("International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology") όπου συμμετείχαν 24 σύνεδροι. Το 1987 ο αριθμός των συνέδρων είχε φτάσει τους 320, μεταξύ των οποίων εκπροσωπήθηκαν περισσότερες από 100 εταιρείες, 20 πανεπιστήμια και 20 ομοσπονδιακές υπηρεσίες, από εννέα συνολικά χώρες (Blidberg, 2001).

Από τις αρχές του '90 έως και σήμερα, ο επιστημονικός οργανισμός IEEE OES (Institute of Electrical and Electronics Engineers – Oceanic Engineering Society) διοργανώνει κάθε δύο χρόνια παγκόσμιο συνέδριο με αποκλειστική θεματολογία τα AUVs (Autonomous Underwater Vehicle Symposium) με μεγάλη συμμετοχή εταιριών και επιστημονικών φορέων. Σήμερα, γύρω στις 20 μεγάλες εταιρίες διαθέτουν πλήρη συστήματα AUV στην αγορά (Kongsberg, Teledyne, Bluefin κ.ά.), ενώ παράλληλα ο αριθμός των εταιριών που ασχολούνται με την ανάπτυξη και την υποστήριξη των επιμέρους τμημάτων και λειτουργιών των AUVs είναι σαφώς μεγαλύτερος. Σύμφωνα με μελέτες της εταιρίας Westwood Global Energy, η παγκόσμια ζήτηση οχημάτων AUV αναμένεται να αυξηθεί κατά 37% το διάστημα 2018-2022, με τον στρατιωτικό τομέα να αντιπροσωπεύει το 70% της ζήτησης.

Με τη διαρκή βελτίωση των υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα απέκτησαν περισσότερες δυνατότητες, όπως μεγαλύτερο επιχειρησιακό εύρος (και επιχειρησιακό βάθος έως και τα 6.000 m), μεγαλύτερη αυτονομία, χαμηλότερο κόστος, δυνατότητα προσαρμογής περισσότερων και τελευταίας γενιάς αισθητήρων, λειτουργία ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και περιβάλλοντος ή ακόμη και δυνατότητα απόκτησης υβριδικού χαρακτήρα (μετατροπή από AUV σε ROV και αντιστρόφως). Η ασύρματη λειτουργία τους, ενώ παρέχει τα πλεονεκτήματα της ταχύτητας και οικονομίας λόγω έλλειψης καλωδίων καθώς και της μη εξάρτησης από σκάφος υποστήριξης, την ίδια στιγμή λειτουργεί σχεδόν απαγορευτικά ως προς τη δυνατότητα μετάδοσης πληροφορίας, όπως εικόνας ή μετρήσεων, σε πραγματικό χρόνο και της λήψης και εκτέλεσης εντολών εν ώρα κατάδυσης. Η ασύρματη λειτουργία τους, η έλλειψη ελέγχου κατά τη διάρκεια της κατάδυσης και το ευρύ επιχειρησιακό πεδίο που καλύπτουν έχουν συμβάλει αρνητικά σε περιπτώσεις ξαφνικής δυσλειτουργίας του οχήματος, με αποτέλεσμα την ολοκληρωτική απώλεια του AUV.

Ως προς τις εφαρμογές των οχημάτων AUV, σε αυτές συγκαταλέγονται οι στρατιωτικές (ανίχνευση, επιθεώρηση, ταυτοποίηση, μετάδοση πληροφοριών κ.ά.), οι επιθεωρήσεις ναυαγίων σε μεγάλα βάθη (πλοίων και αεροσκαφών), οι ερευνητικές (θαλάσσια βιολογία, ωκεανογραφία, ενάλια αρχαιολογία, φυσική, ρομποτική κ.ά.) και οι εμπορικές (πετρελαιοβιομηχανία, πόντιση αγωγών και καλωδίων, τοπογραφικές μελέτες, κατασκευή υποδομών, εμπόριο κ.ά.). Αντίστοιχα με την μεγάλη απήχηση των drones, τα AUVs χρησιμοποιούνται επίσης και από ένα μεγάλο κοινό σε ερασιτεχνικό επίπεδο.

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα κατασκευάζονται με προδιαγραφές που υποδεικνύονται από τη λειτουργία για την οποία προορίζονται. Τα μεγαλύτερα σε μέγεθος AUVs μπορεί να φτάσουν έως και τα δέκα m σε μήκος και πλεονεκτούν σε αυτονομία, επιχειρησιακό εύρος και δυνατότητες φόρτωσης πολλαπλών λειτουργιών αισθητήρων, ενώ τα μικρότερα AUVs, μεγέθους έως και 0.5 m, χρησιμοποιούνται σε υποστηρικτικές εργασίες χαμηλότερων απαιτήσεων. Οι κατασκευαστές αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: της επιστημονικής έρευνας (πανεπιστήμια και ερευνητικά ιδρύματα), της υπεράκτιας βιομηχανίας (βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, καλώδια, αγωγοί, λιμενικά έργα κ.ά.) και του στρατού. Το συνηθέστερο κατασκευαστικό σχήμα AUV είναι αυτό της επονομαζόμενης τορπίλης, που λόγω ιδανικού υδροδυναμικού σχεδιασμού, μεγέθους και ευκολίας χειρισμού προτιμάται από την πλειοψηφία των χρηστών AUV οχημάτων. Μία άλλη κατηγορία AUV οχημάτων βάσει της κατασκευαστικής δομής τους είναι τα αυτόνομα υποβρύχια υδρόπτερα (Gliders) που αντί για προπέλες ή κινητήρες, κινούνται με αλλαγή της άντωσής τους, με τη βοήθεια πτερυγίων και

εσωτερικών αντλιών. Συγκεκριμένα, για να κινηθεί το όχημα πρέπει κάθε φορά να αλλάζει το βύθισμά του· αρχικά καταδύεται λόγω βάρους και ξεκινά να καταγράφει πορείες, ενώ για να αναδυθεί ένα εσωτερικό μοτέρ δίνει κίνηση σε ένα έμβολο, το οποίο ανοιγοκλείνοντας αποβάλλει νερό και το όχημα αλλάζει πλευστότητα. Τα gliders ενώ κινούνται με πολύ μικρότερες ταχύτητες από τις τορπίλες είναι κατάλληλα για απομακρυσμένες και μεγάλης διάρκειας αποστολές λόγω της τροχιάς που διαγράφουν και των μειωμένων απαιτήσεων σε ενέργεια. Στα υποβρύχια υδρόπτερα κατατάσσονται τρία είδη, με μικρές μεταξύ τους κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις, τα Slocum Gliders, τα Spray Gliders και τα Seagliders (Μπουρμά, 2010).

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα λειτουργούν με ενσωματωμένα συστήματα μπαταριών και η διάρκεια αυτονομίας τους εξαρτάται, εκτός από το είδος των μπαταριών, από το είδος της εργασίας που καλούνται να εκτελέσουν (κατανάλωση αισθητήρων και όγκος συλλεγόμενης πληροφορίας) και την ταχύτητα της κίνησής τους.

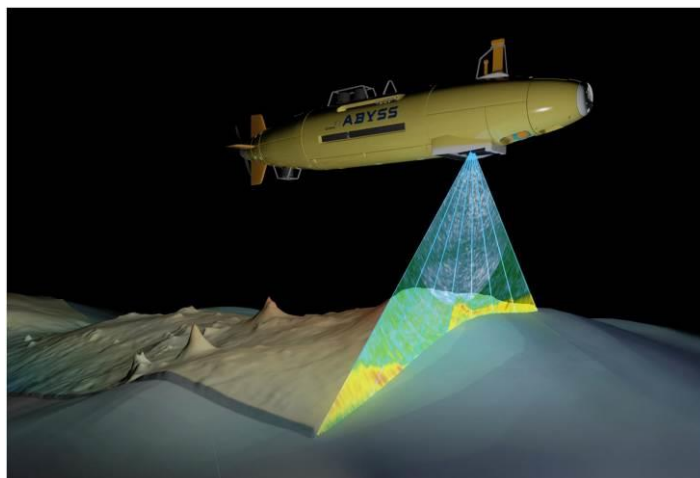
Λόγω της εξασθένησης των ραδιοκυμάτων στο νερό, τα AUVs με το που βυθιστούν, παύουν να βασίζονται σε παρατηρήσεις GPS. Για το λόγο αυτό, η πλοήγηση και ο προσδιορισμός θέσης τους βασίζεται σε τεχνικές αδρανειακής πλοήγησης dead reckoning, που συχνά ενισχύονται με τεχνικές εντοπισμού υποβρύχιας ακουστικής, συνηθέστερες των οποίων είναι οι Long Baseline (LBL), οι Short Baseline (SBL) και οι Ultra Short Baseline (USBL). Πολλά AUVs προγραμματίζονται να αναδύονται στην επιφάνεια ώστε να επανακτούν τη θέση τους με βάση το σήμα GPS που μπορούν να πάρουν στην επιφάνεια και συνεχίζουν την κατάδυσή τους πάλι με τεχνικές dead reckoning. Επίσης, συχνά τοποθετούνται αισθητήρες IMU (Inertial Measurement Unit), αισθητήρες DVL (Doppler Velocity Log) για τη μέτρηση της ταχύτητας μετάδοσης στο νερό ή και αισθητήρες πίεσης για επιπλέον μέτρηση του βάθους του οχήματος, ώστε να συννορθωθούν οι παρατηρήσεις και να δώσουν την ακριβέστερη δυνατή θέση του οχήματος AUV.

Η απουσία καλωδίου μεταξύ ενός οχήματος AUV και ενός μητρικού σκάφους, πέραν του ζητήματος της διαθέσιμης ενέργειας, περιορίζει σημαντικά το σύστημα ελέγχου μιας αποστολής. Ο προγραμματισμός της αποστολής ενός ρομπότ αποτελεί κλασικό πρόβλημα γενικά στα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα και ιδιαίτερα στα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα, δεδομένων των ιδιαιτεροτήτων του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι προγραμματισμού αποστολής αυτόνομων οχημάτων στηρίζονται στην μοντελοποίηση του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το όχημα και έχουν στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου της αποστολής καθώς και της απαιτούμενης ενέργειας. Η αδυναμία μοντελοποίησης του υποβρύχιου περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την αδυναμία συνεχούς προσδιορισμού θέσης του οχήματος μέσω δορυφορικών παρατηρήσεων, οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών αποφυγής εμποδίων και την ενσωμάτωση ενισχυμένων αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, για τον προγραμματισμό της πορείας ενός αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος (Κανακάκης, 2007).

Ένας από τους γνωστότερους τύπους AUV τορπίλης είναι ο REMUS (Remote Environmental Monitoring Units), που αρχικά μοντελοποιήθηκε και κατασκευάστηκε από το Woods Hole αλλά στην πορεία υιοθετήθηκε ως τύπος και δόθηκε από εταιρίες στο εμπόριο. Τα AUV REMUS ανήκουν στις κατηγορίες υποβρύχιων οχημάτων χαμηλού κόστους (low cost) και οι προγραμματισμένες αποστολές τους εκτελούνται από έναν φορητό υπολογιστή. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί επτά διαφορετικοί τύποι AUV REMUS για αποστολές ποικίλων προδιαγραφών και απαιτήσεων· διαφορετικά επιχειρησιακά βάθη (από 100 έως 6.000 m),

διαφορετικά είδη αισθητήρων ανάλογα των αναγκών των εφαρμογών, ποικίλες περιοχές εργασιών (από τούνελς και σπήλαια έως ανοιχτή θάλασσα). Χρησιμοποιούνται για χαρτογραφήσεις, υδρογραφικές μελέτες, παρακολουθήσεις φαινομένων, δειγματοληψίες, πολεμικά αντίμετρα και άλλες εφαρμογές. Για την κίνησή τους χρησιμοποιούν πρυμνιά προπέλα και πλάγια πτερύγια και ως κέντρο ελέγχου διαθέτουν εσωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η πλοήγηση και ο προσδιορισμός της θέσης τους επιτυγχάνεται με ίδρυση δικτύου πομποδεκτών που εκπέμπουν στα 20 – 30 KHz, παίρνουν ως αφετηρία του συστήματος αναφοράς τους παρατηρήσεις GPS (από τα υδρόφωνα επιφανείας) και επιλύουν τριπλευρισμούς με τεχνικές LBL και USBL, αλληλεπιδρώντας με τον πομποδέκτη - στόχο που είναι προσαρμοσμένος στο AUV. Μεταξύ χαρακτηριστικών εφαρμογών των AUV REMUS είναι η αποστολή του REMUS Tunnel Inspection Vehicle, το 2003, για την επιθεώρηση διαρροών σε σήραγγα υδραγωγείου, όπου μετά από 15 ώρες συνεχούς επιθεώρησης και χαρτογράφησης, το ρομπότ συνέλεξε 160.000 εικόνες για τον εντοπισμό διαρροών της σήραγγας. Το 2011, τρία REMUS 6000 διενήργησαν επιτυχώς έρευνες για τον εντοπισμό των μαύρων κουτιών του συντρεμιμένου αεροσκάφους της AirFrance AF447 στον Ατλαντικό Ωκεανό. Το 2012, ένα REMUS 600 επιστρατεύτηκε από το Πολεμικό Ναυτικό των Η.Π.Α. ως ανιχνευτής ναρκών στον Περσικό Κόλπο. Το 2017 ένα REMUS 6000 εντόπισε το τορπιλισμένο USS Indianapolis στα 5.500 m βάθος στις Φιλιππίνες, ενώ το 2018 εντόπισε επίσης επιτυχώς το ναυάγιο του USS Lexington στον Ειρηνικό Ωκεανό σε βάθος 3.000 m. Τέλος, στις αρχές του 2019 το Πανεπιστήμιο του Exeter σε συνεργασία με το Woods Hole έθεσαν σε αποστολή το AUV REMUS SharkCam, όχημα εξοπλισμένο σε υψηλής ανάλυσης βιντεοκάμερες και όργανα πλοήγησης για την ανίχνευση, παρακολούθηση και χαρτογράφηση της πορείας και της συμπεριφοράς λευκών καρχαριών που έχουν σημανθεί με ένα είδος τσιπ, στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό.

Στην ίδια κατηγορία με τα REMUS AUVs, το Abyss (Εικόνα 1.5), τύπου REMUS 6000, κατασκευασμένο το 2008 από την αμερικανική εταιρία Hydroid για λογαριασμό της γερμανικής εταιρίας GEOMAR, χρησιμοποιείται κυρίως για την αποτύπωση του πυθμένα σε βάθη από τα 2.000 έως τα 6.000 m, καθώς και για δειγματοληψίες και μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων της υδάτινης στήλης. Το AUV Abyss ανήκει στα σχετικά μεγάλου όγκου αυτόνομα υποβρύχια οχήματα με μήκος 4 m και βάρος 900 kg, έχει επιχειρησιακό εύρος περί τα 100 km, μέγιστο βάθος τα 6.000 m, αυτονομία κατάδυσης 20 περίπου ωρών, κινείται με ταχύτητα που φτάνει περίπου τα 7.5 km/h και είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες μέτρησης αγωγιμότητας, θερμοκρασίας και βάθους, ηχοβολιστές πλευρικής και πολυδεσμικής σάρωσης, κάμερα υψηλής ανάλυσης, φωτισμό LED, τομογράφο υποδομής πυθμένα καθώς και ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα κατάδυσης και συλλογής του ρομπότ (Launch and Recovery System - LARS) πλευρικά ή από την πρύμνη του σκάφους υποστήριξης. Για την πλοήγησή του, το AUV αρχικοποιεί τη θέση του στην επιφάνεια με δορυφορικές παρατηρήσεις και μετά την κατάδυσή του λειτουργεί ως πομποδέκτης - στόχος ενός δικτύου LBL. Η ίδρυση και βαθμονόμηση του δικτύου σταθερών πομποδεκτών διαρκεί περίπου 2-3 ώρες και υλοποιείται σε βάθος 3.000 m. Για αύξηση της αξιοπιστίας στον προσδιορισμό της θέσης του οχήματος, το Abyss διαθέτει ενσωματωμένα αδρανειακό σύστημα INS και όργανο DVL (Linke, 2016).



Εικόνα 1.5: To AUV Abyss ([www.geomar.de](http://www.geomar.de))

Το 2015, το Abyss χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος “Ecological aspects of deep sea mining” για τη φωτογραμμετρική αποτύπωση μιας έκτασης 90 στρεμμάτων σε θαλάσσια περιοχή ανοιχτά του Περού, για τη μελέτη των πιθανών επιπτώσεων της εξόρυξης οζώδους μαγγανίου από τα βάθη των έως και 6.000 m, του Ειρηνικού Ωκεανού. Για την κάλυψη της περιοχής των 200x450 m<sup>2</sup>, στα 4.135 m βάθος, το Abyss συνέλεξε περί τις 13.000 εικόνες σε απόσταση 4.7 m από τον πυθμένα και μέγεθος εδαφοψηφίδας το 1 mm. Τα δεδομένα τέθηκαν υπό επεξεργασία ενώ η ομάδα βρισκόταν ακόμα στο πεδίο, για επιβεβαίωση κάλυψης της περιοχής και τη δημιουργία μωσαϊκού με απλή συνένωση (stitching) των εικόνων για γρήγορα αποτελέσματα. Σε επόμενο στάδιο, τα δεδομένα υπέστησαν φωτογραμμετρική επεξεργασία σε λογισμικό SfM, όπου συνεκτιμήθηκε η εσωτερική γεωμετρία της μηχανής (είχε προηγηθεί διαδικασία βαθμονόμησης στο πεδίο) και ως εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την πλοήγηση του AUV. Τα υψηλής ανάλυσης αποτελέσματα (γεωαναφερμένος ορθοφωτοχάρτης και τρισδιάστατο μοντέλο πυθμένα) έδωσαν πλήρη εικόνα της εξέλιξης της εξορυκτικής δραστηριότητας στην περιοχή (Kwasnitschka et al., 2016).

Το AUV Girona 500 αναπτύχθηκε το 2011 από τα Πανεπιστήμια της Χιρόνα και των Βαλεαρίδων Νήσων στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος RAUVI (Reconfigurable Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Missions) και υπάγεται στην κατηγορία των επεμβατικών I-AUVs (Intervention AUV). Χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων είναι η δυνατότητα εκτέλεσης παρεμβατικών εργασιών υποβρυχίως, συνήθως με τη βοήθεια βραχιόνων, κάτι που ως την εμφάνισή τους ήταν εφικτό μόνο από οχήματα ROV και από δύτες. Στο πλαίσιο του προγράμματος RAUVI μελετήθηκε η λειτουργία των I-AUVs σε δύο άξονες: αρχικά μελετήθηκαν οι δυνατότητες εντοπισμού, αποτύπωσης και συλλογής δειγματοληπτικών στοιχείων από έναν υποβρύχιο στόχο (τη λειτουργία που έχει δηλαδή ένα τυπικό AUV) και σε επόμενο στάδιο η δυνατότητα εκτέλεσης κάποιας εργασίας που απαιτεί μηχανική, παρεμβατική στο αντικείμενο, κίνηση, μέσω βραχιόνων πολλαπλών βαθμών ελευθερίας. Η δεύτερη λειτουργία των I-AUVs θεωρείται επαναστατική τεχνολογικά, αφού παρέχει τη δυνατότητα στα πολυδύναμα κατά τα άλλα AUV να προσεγγίσουν ρομποτικές λειτουργίες αντίστοιχες της ανθρώπινης κίνησης. Η συγκεκριμένη κατηγορία αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων θα μπορούσε επίσης να ανήκει και στα υβριδικά αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (HUV) δεδομένου ότι συνδυάζει χαρακτηριστικά των οχημάτων AUV και ROV. Το Girona

500, αρχικά έχει σχεδιαστεί για το επιχειρησιακό βάθος των 500 m και διαθέτει τυπικούς αισθητήρες πλοήγησης (USBL, DVL) και πλήρες σύστημα καταγραφής γεωμετρικής πληροφορίας και εικόνας (κάμερες υψηλής ανάλυσης, side scan sonar, profiler sonar). Το I-AUV Girona 500 έχει επιχειρήσει πληθώρα εφαρμογών τρισδιάστατης ανακατασκευής αντικειμένων και περιοχών ενδιαφέροντος υποβρυχίως, μεταξύ των οποίων η αποτύπωση του πυθμένα σε βάθος 380 m στην Καλντέρα στη Σαντορίνη, η επιθεώρηση και χαρτογράφηση πληθυσμών υποβρύχιων ενδιαιτημάτων στο Cap de Creus της Ισπανίας σε βάθος 85 m και η ψηφιακή ανακατασκευή του ιστορικού ναυαγίου La Lune στη Γαλλία σε βάθος 90 m, όπου στο Girona 500 προσαρμόστηκε ζεύγος καμερών DSLR για στερεοφωτογράφιση. Η επιστημονική ομάδα τεκμηρίωσης συνδύασε την τρισδιάστατη ανακατασκευή του ναυαγίου La Lune από τη φωτογραμμετρική επεξεργασία με τα ηχοβολιστικά δεδομένα, παράγοντας τρισδιάστατα φωτορεαλιστικά μοντέλα και χάρτες υψηλής ανάλυσης (Ridao et al., 2015). Τέλος, στο πλαίσιο του προγράμματος RAUVI αναπτύχθηκε το περιβάλλον τρισδιάστατης αναπαράστασης UWSim, σχεδιασμένο για δύο φάσεις, αρχικά για την προσομοίωση του αρχικού προγραμματισμού της αποστολής του ρομπότ και στη συνέχεια για προσομοίωση της τελικής αποστολής που εκτελέστηκε, όπως αυτή προέκυψε από τα ληφθέντα δεδομένα των αισθητήρων. Το UWSim χρησιμοποιεί τις βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα Open SceneGraph και osgOcean, σχεδιασμένες για οπτικοποίηση υποβρύχιων φαινομένων όπως η εξασθένιση των χρωμάτων με αύξηση του βάθους, οι παραμορφώσεις λόγω ρευμάτων, τα νέφη ιλυώδους υφής ή τα μικροσωματίδια του νερού (Prats et al., 2012).

Το 2005 το Ινστιτούτο Woods Hole συνεργάστηκε με την Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων και το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών στην αρχαιολογική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο διάυλο Χίου – Οινουσσών, διαθέτοντας το AUV SeaBED με σκοπό τη λεπτομερή τεκμηρίωση αρχαίου ναυαγίου. Το AUV διέθετε τρία είδη αισθητήρων: αισθητήρες για πλοήγηση και προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο, κάμερες και ηχοβολιστικά όργανα για τη χαρτογράφηση του πυθμένα και αισθητήρες μέτρησης φυσικοχημικών παραμέτρων (αλατότητα, θερμοκρασία, χλωροφύλλη κ.ά.). Μία κάμερα υψηλής ανάλυσης με συγχρονισμένο φωτιστικό μέσο τοποθετήθηκαν στο πρόσθιο τμήμα του AUV καταγράφοντας περί τις 3.500 εικόνες για φωτογραμμετρική επεξεργασία. Παράλληλα με ένα σαρωτή πολλαπλής δέσμης (multibeam sonar) σε συνδυασμό με καταγραφή της ταχύτητας Doppler με DVL όργανο, συλλέχθηκε λεπτομερώς η τρισδιάστατη πληροφορία του πυθμένα και όλα τα δεδομένα, γεωμετρικά και εικονιστικά, τέθηκαν υπό κοινή επεξεργασία (Foley et al., 2009). Η συνεργασία του Woods Hole με ελληνικούς φορείς και η χρήση του SeaBED συνεχίστηκαν πέραν των αρχαιολογικών, σε υδροθερμικές και ηφαιστειολογικές μελέτες, όπως η έρευνα του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. στη Μήλο και τη Σαντορίνη, όπου το SeaBED χρησιμοποιήθηκε υποστηρικτικά του βαθυσκάφους ΘΕΤΙΣ.

#### **1.4 Τηλεκατευθυνόμενα οχήματα - ROV (Remote Operated Vehicles)**

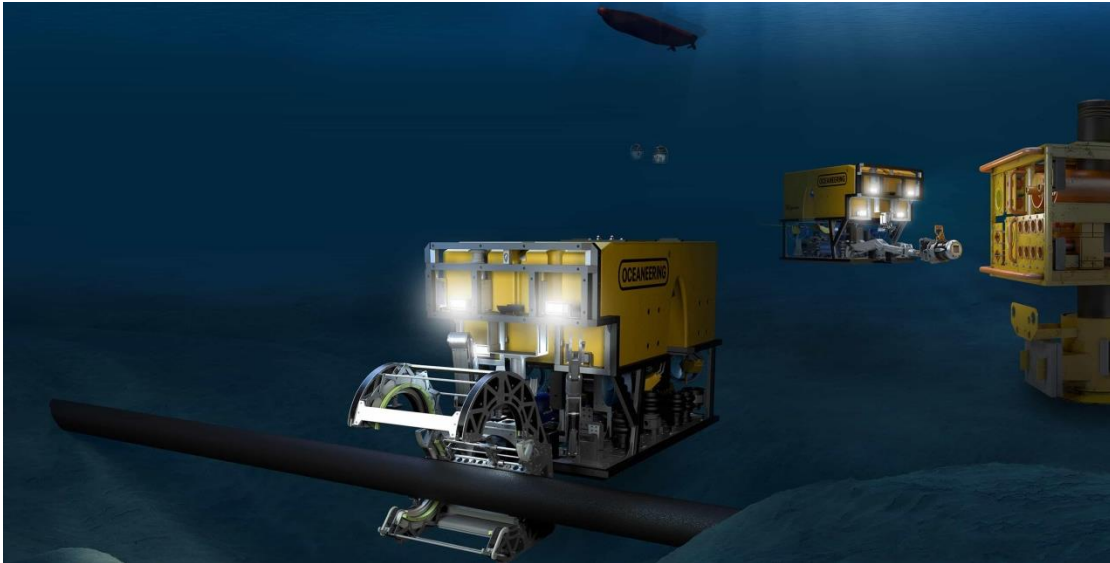
Τα ROV είναι μη επανδρωμένα τηλεκατευθυνόμενα οχήματα, που καθοδηγούνται από έναν χειριστή και ένα κέντρο ελέγχου που βρίσκονται σε κάποιο σκάφος υποστήριξης, σε μια πλατφόρμα ή σε κάποια λιμενική υποδομή στην περιοχή εργασιών. Η επικοινωνία του οχήματος με την επιφάνεια επιτυγχάνεται μέσω ενός καλωδίου (tether), το οποίο μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο όχημα, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων από τους αισθητήρες (εικόνα, ήχος, δεδομένα πλοήγησης, θερμοκρασία κ.ά.) και τη λήψη εντολών από το μητρικό σκάφος. Το πρώτο ROV, το “Poodle”, προέκυψε ως η αναβαθμισμένη έκδοση του πρώτου υποβρύχιου scooter “Torpille”, από τον πρωτοπόρο στην υποβρύχια φωτογραφία, Dimitri



Rebikoff, το 1953 και χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε ενάλιες αρχαιολογικές έρευνες. Το μεγάλο βήμα ωστόσο προς την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου τηλεκατευθυνόμενου υποβρύχιου οχήματος πραγματοποιήθηκε από το Πολεμικό Ναυτικό των Η.Π.Α., το 1961. Το CURV (Cable-Controlled Underwater Research Vehicle), όπως ονομάστηκε το πρώτο ROV του αμερικάνικου Ναυτικού, κατασκευάστηκε αρχικά για τον εντοπισμό απολεσθεισών τορπιλών και ναυαγίων. Αργότερα, τη δεκαετία του '70, οι τεχνολογικές εξελίξεις στα ηλεκτρονικά και τη μηχανολογία συνέβαλαν σε σημαντικές αναβαθμίσεις των ROV ως προς τα επιχειρησιακά βάθη και τις ρομποτικές τους ιδιότητες, όπως το να μετακινούν ή να ανελκύουν αντικείμενα από το βυθό. Ενώ αρχικά το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής οχημάτων ROV χρηματοδοτούταν από κυβερνητικούς φορείς, από τη δεκαετία του '80 κι έπειτα, το ποσοστό αυτό ανήκει κατά βάση σε ιδιωτικές εταιρίες και δη σε εταιρίες της υπεράκτιας βιομηχανίας. Στα τέλη της δεκαετίας του '90, καταγραφόταν ένας αριθμός 100 περίπου κατασκευαστών και 3.000 ROV οχημάτων παγκοσμίως, ενώ σήμερα εκτιμάται ότι οι κατασκευαστές ROV οχημάτων ξεπερνούν τους 450 και τα οχήματα ROV είναι πια αδύνατο να αριθμηθούν σε παγκόσμιο επίπεδο (Christ & Wernli, 2013). Οι χρήστες τηλεκατευθυνόμενων υποβρύχιων οχημάτων προέρχονται από πολλούς τομείς της έρευνας, της παράκτιας και υπεράκτιας βιομηχανίας, του στρατού ή ακόμα και των ερασιτεχνικών εφαρμογών, ενώ οι ανάγκες των διαφορετικών αυτών περιπτώσεων συντέλεσαν στην παραγωγή ROV πολλαπλών τύπων και δυνατοτήτων ανά πεδίο εφαρμογής.

Τα ROVs αποτελούνται από τρεις βασικές κατηγορίες: τα *ROV Εργασίας (Working Class)*, τα *ROV Παρατήρησης (Observation Class)* και τα *ROV Μικρού Μεγέθους (Micro - Mini)*. Η πρώτη κατηγορία, των ROV Εργασίας (Εικόνα 1.6), προέκυψε αρχικά από τις ανάγκες της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου για δημιουργία ενός πολυδύναμου τηλεκατευθυνόμενου υποβρύχιου οχήματος που θα ήταν ικανό να εκτελέσει εργασίες που ήταν αδύνατο να περαιωθούν πια από δύτες λόγω του απαγορευτικού περιβάλλοντος (μεγάλα βάθη, μηδενική ορατότητα). Τα περισσότερα ROV Εργασίας αποτελούνται από ένα (ανοικτό ή κλειστό) πλαίσιο αλουμινίου, μέσα στο οποίο περικλείονται οι αισθητήρες, οι προπέλες και όλα τα μηχανολογικά μέρη του ρομπότ, ενώ για την εκτέλεση παρεμβατικών, σε κάποιο αντικείμενο, εργασιών, διαθέτουν δύο ή τρεις βραχίονες επτά λειτουργιών (6 βαθμοί ελευθερίας για κάθε βραχίονα συν τη λαβή τους) (Sivčev, 2018). Τα ROV Εργασίας ταξινομούνται στις υποκατηγορίες *Light Work-class*, *Heavy Work-class* και *Trenching and Burial*. Τα *Light Work-class* αφορούν ROV πρόωσης περίπου 50 ίππων και επιχειρησιακού βάθους 2000 m, ενώ τα *Heavy Work-class* σε ROV πρόωσης 220 ίππων, επιχειρησιακού βάθους 3500 m και δυνατότητας λειτουργίας περισσότερων ή ισχυρότερων ρομποτικών βραχιόνων. Τα *Trenching and Burial ROVs*, με εύρος πρόωσης από 200 έως 500 ίππους, χρησιμοποιούνται για εργασίες σε βάθη έως τα 8000 m. Τα ROV Παρατήρησης, μικρότερα συνήθως σε μέγεθος από τα Εργασίας, έχουν δημιουργηθεί για εργασίες επιθεώρησης, εντοπισμού αντικειμένων, χαρτογραφήσεις και για έργα στα οποία τα ROV Εργασίας θεωρούνται υπερμεγέθη και ακριβά. Τέλος, τα ROV Μικρού Μεγέθους, είναι τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα πολύ μικρότερου όγκου, κόστους αλλά και δυνατοτήτων (μικρότερα επιχειρησιακά βάθη, λιγότεροι ή απλουστευμένοι αισθητήρες) σε σχέση με τις δύο άλλες κατηγορίες. Διακρίνονται σε *micro* και *mini ROVs*, με τα πρώτα να ζυγίζουν έως 3 kg ενώ τα δεύτερα, που χαρακτηρίζονται και ως “eyeballs”, να ζυγίζουν έως 15 kg. Τα *micro ROVs* εξυπηρετούν στην αντικατάσταση των δυτών σε περιβάλλοντα όπως οι αγωγοί, οι αποχετεύσεις ή οι μικρές σπηλαιώσεις, ενώ κάποια *mini ROVs* μπορεί να φτάσουν σε δυνατότητες τα ROV Παρατήρησης (Christ & Wernli, 2013). Τέλος, μία ακόμα κατηγοριοποίηση των οχημάτων ROV είναι εκείνη των *ROV Ειδικών Χρήσεων*, που διακρίνεται στις υποκατηγορίες των *Rail Cameras* (ROV επιθεώρησης που κινείται σε γραμμική τροχιά σε κάποια πλατφόρμα

πετρελαίου, αερίου ή γεώτρησης), των *bottom crawlers* (ROV που χρησιμοποιούν ερπύστριες, πόδια ή βεντούζες, ενώ κινούνται επί του πυθμένα και με χρήση οπτικών μέσων και άλλων αισθητήρων ανιχνεύουν παθογένειες, όπως ζημιές και διαβρώσεις στο εσωτερικό αγωγών, ή χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και τοποθέτηση ογκωδών καλωδίων), των *towed cameras* (ρυμουλκούμενα από κάποιο σκάφος ή κάποιο άλλο ROV, όμοια της κατηγορίας των Towed Vehicles) και των *Swim-out ROVs* (μικρότερα ROVs που λειτουργούν ως συμπληρωματικά ή συνδυαστικά μεγαλύτερων ROVs) (Christ & Wernli, 2013; Ντόλιας, 2019).



Εικόνα 1.6: Work-class ROV ([www.oceaneering.com](http://www.oceaneering.com))

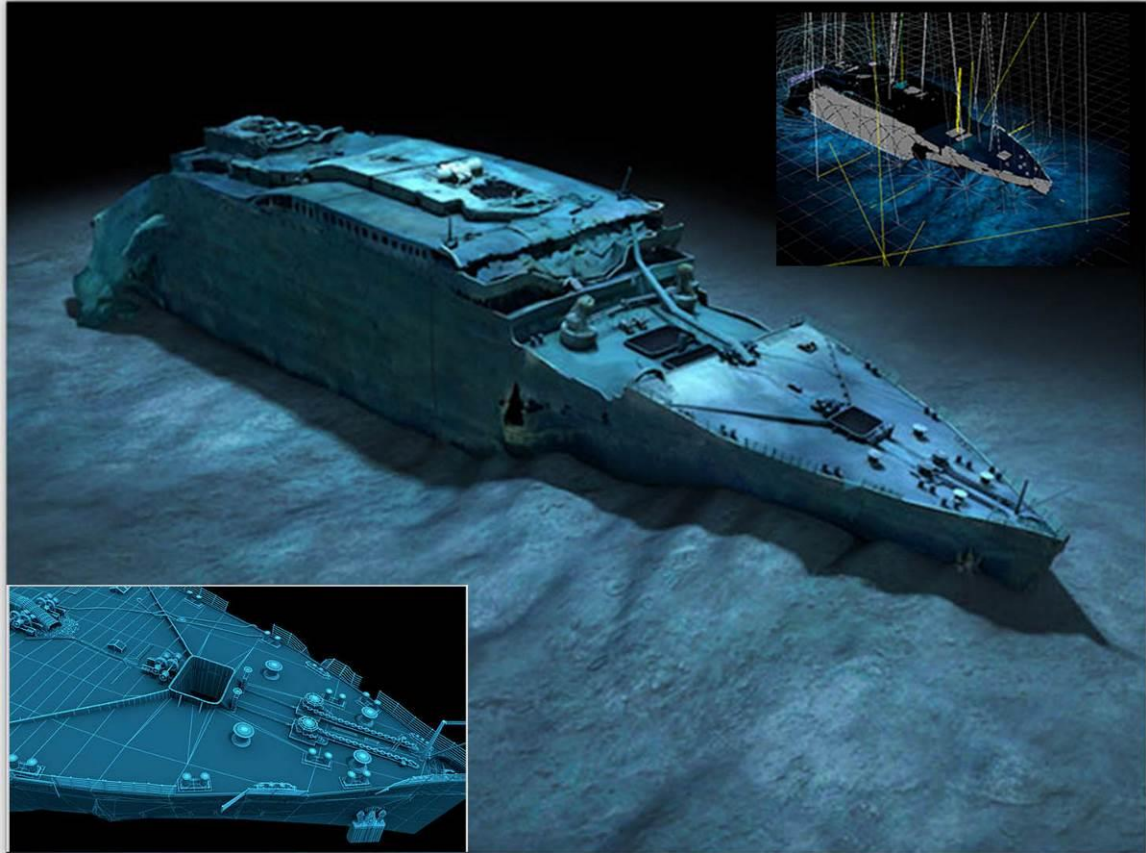
Αν και η κατηγοριοποίηση των τηλεκατευθυνόμενων υποβρύχιων οχημάτων είναι διακριτή ως προς τα κατασκευαστικά τους μέρη και τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες, η διάκριση ανά πεδίο εφαρμογής είναι πιο ασαφής, αφού περισσότερες από μία κατηγορίες ROV οχημάτων εξυπηρετούν περισσότερες από μία κατηγορίες εφαρμογών. Μεταξύ των κυριότερων περιπτώσεων όπου χρησιμοποιούνται οχήματα ROV είναι οι εργασίες επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευών στη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι επιθεωρήσεις και αποτυπώσεις υποθαλάσσιων κατασκευών (αγωγοί, καλώδια, λιμενικά έργα), οι εκσκαφές του πυθμένα, οι ποντίσεις αντικειμένων, ο εντοπισμός και οι ανελκύσεις ναυαγίων, οι ενάλιες αρχαιολογικές έρευνες, οι ωκεανογραφικές μελέτες, οι δειγματοληψίες, οι μελέτες θαλάσσιας βιολογίας, η χαρτογράφηση και η τρισδιάστατη ανακατασκευή και αναπαράσταση αντικειμένων, φαινομένων και περιοχών ενδιαφέροντος, οι επιχειρήσεις διάσωσης, οι κινηματογραφικές παραγωγές (ταινίες, ντοκιμαντέρ) και η υποστήριξη καταδυτικών επιχειρήσεων.

Για εργασίες χαρτογράφησης, τρισδιάστατης ανακατασκευής και παρακολούθησης πυθμένα και αντικειμένων ενδιαφέροντος, το Τμήμα Θαλάσσιας Τεχνολογίας του Νορβηγικού Πανεπιστημίου Έρευνας και Τεχνολογίας χρησιμοποιεί, για παράδειγμα, ROVs κατηγορίας Workclass, μεταξύ των οποίων τα Light Workclass ROVs, Minerva και 30K, κατασκευής της νορβηγικής εταιρίας Sperre, με επιχειρησιακά βάθη 600 και 1.000 m αντίστοιχα και του Heavy Workclass ROV Kiel 6000, της γερμανικής GEOMAR, με μέγιστο επιχειρησιακό βάθος τα 6000 m. Τα συγκεκριμένα ROVs διαθέτουν συστήματα καταγραφής εικόνας (δύο ή περισσότερες κάμερες για καταγραφή εικόνας και βίντεο), αισθητήρες sonar και DVL για σάρωση του πυθμένα και καταγραφή γεωμετρικής πληροφορίας, ενώ το ROV Kiel 6000, διαθέτει επιπλέον και υπερφασματικό αισθητήρα (Underwater Hyperspectral Imager) για καταγραφή υπερφασματικών εικόνων σε

περιβάλλοντα μειωμένου έως μηδενικού φωτισμού, όπως τα 6.000 m βάθος. Το ROV Minerva χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του ναυαγίου M/S Herkules στη Νορβηγία (2014) για βάθη από 0 έως 60 m, το ROV 30K για την αποτύπωση και τη μελέτη από θαλάσσιους βιολόγους, ενός απότομου, σχεδόν κατακόρυφου τοίχου με έντονη παρουσία θαλάσσιων ενδιαιτημάτων (κοράλλια, μικροοργανισμοί μεγέθους 3 mm, κ.ά.), σε βάθος από 100 έως 530 m και εμβαδού περίπου 800 m<sup>2</sup>, στο Trondheim της Νορβηγίας (2016), ενώ το ROV Kiel 6000, τέλος, χρησιμοποιήθηκε το 2015, στο Περού, κατά την πρώτη καταγραφή υπερφασματικών εικόνων σε μεγάλα βάθη (4.200 m) και την επεξεργασία και αξιοποίησή τους για την ανίχνευση, χαρτογράφηση και μελέτη ορυκτών κοιτασμάτων σε περιοχές εν δυνάμει αξιοποιήσιμες για εξορυκτική δραστηριότητα (Nornes, 2018).

Το γαλλικό ερευνητικό ινστιτούτο CNRS, σε συνεργασία με τη γαλλική εταιρία COMEX, στο πλαίσιο των ερευνητικών προγραμμάτων VENUS (Virtual Exploration of Underwater Sites, 2006), GROPLAN (Généralisation du Relevé, avec Ontologies et Photogrammétrie, pour l'Archéologie Navale et Sous-marine, 2014 - 2018) και ROV3D (2011), χρησιμοποίησαν τα ROVs Super Achilles και Apache, κατασκευής COMEX, με μέγιστα επιχειρησιακά βάθη τα 1.000 και 2.500 m αντίστοιχα, για τις ανάγκες της ανάπτυξης αυτοματοποιημένων διαδικασιών για την τρισδιάστατη απεικόνιση και γεωαναφορά ενάλιων αρχαιοτήτων σε βάθη μη προσεγγίσιμα από δύτες (ναυάγια Cap Bénat 4 στα - 328 m, Sud-Caveaux 1 στα - 64 m, Grand Ribaud F στα - 61 μέτρα, Port-Miou C στα - 105 m, Xlendi στα - 110 m, κ.ά.). Τα ROV Apache και Super Achilles είναι εξοπλισμένα με σύστημα καμερών υψηλής ανάλυσης, υδραυλικούς βραχίονες, αισθητήρα sonar, πομποδέκτη ακουστικών σημάτων και άλλους αισθητήρες για την καταγραφή εικονιστικής και γεωμετρικής πληροφορίας καθώς και για την πλοήγηση και τον εντοπισμό της θέσης των οχημάτων (Drap et al., 2015; Drap et al., 2015).

Το ωκεανογραφικό ινστιτούτο Woods Hole κατασκεύασε και έθεσε σε λειτουργία το ROV Jason πρώτη φορά το 1988, ενώ σήμερα εκσυγχρονισμένο και εξοπλισμένο με αισθητήρες πλοήγησης και εντοπισμού θέσης που υποστηρίζουν τεχνικές Long Baseline, κάμερες υψηλής ανάλυσης, γυροσκόπιο οπτικής ίνας, αισθητήρα μέτρησης γωνίας (pitch, roll), πιεζομετρικό αισθητήρα μέτρησης βάθους, Doppler Velocity Logger (DVL) και multibeam sonar, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων πυθμένα και βυθομετρικών χαρτών για μεγάλα βάθη, όπως οι περιοχές υδροθερμικών κοιτασμάτων στα 3.000 m βάθος, ενώ με συνδυασμό των παρατηρήσεων sonar, DVL και LBL και παράλληλη εφαρμογή αλγορίθμων SLAM, μελετώνται τα επίπεδα βελτιστοποίησης στον προσδιορισμό της θέσης και της διαγραφόμενης τροχιάς του ROV και στην ακριβέστερη τρισδιάστατη ανακατασκευή του πυθμένα (Roman & Singh, 2005). Μια από τις επιχειρήσεις του ROV Jason, με παράλληλη αποστολή δύο οχημάτων REMUS AUV του Woods Hole, για τη συλλογή δεδομένων εικόνας και σόναρ, πραγματοποιήθηκε το 2010 στο ναυάγιο του Τιτανικού σε βάθος 3.700 m, με τελικό στόχο την τρισδιάστατη ανακατασκευή του ναυαγίου σε υψηλά επίπεδα ανάλυσης και ακρίβειας καθώς και την εξαγωγή μετρητικών παραγώγων όπως γραμμικά στοιχεία τομών, ορθοφωτομωσαϊκά και τρισδιάστατα φωτορεαλιστικά μοντέλα (Εικόνα 1.7) από το εργαστήριο AIVL (Advanced Imaging and Visualization Laboratory) του Woods Hole (Behance, 2014).



Εικόνα 1.7: Η τρισδιάστατη ανακατασκευή του ναυαγίου του Τιτανικού όπως προέκυψε από δεδομένα εικόνας και σόναρ (Behance, 2014)

Μικρότερα εμπορικά οχήματα ROV, όπως τα BlueRov2, OpenROV, Sibiu Nano, Seabotix κ.ά., κατηγορίας low-cost, χρησιμοποιούνται, επίσης μαζικά, σε εργασίες χαρτογράφησης και φωτογραμμετρικής τεκμηρίωσης του βυθού με δυνατότητες αναπροσαρμογής των συστημάτων αισθητήρων που φέρουν, ακριβέστερης πλοήγησης και αύξησης του μέγιστου επιχειρησιακού βάθους τους (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Τα mini commercial ROVs BlueRov2 (αριστερά, [www.bluerobotics.com](http://www.bluerobotics.com)) και Seabotix (δεξιά, [www.teledynemarine.com/](http://www.teledynemarine.com/))

## 1.5 Αισθητήρες καταγραφής και πλοήγησης (Mapping Sensors)

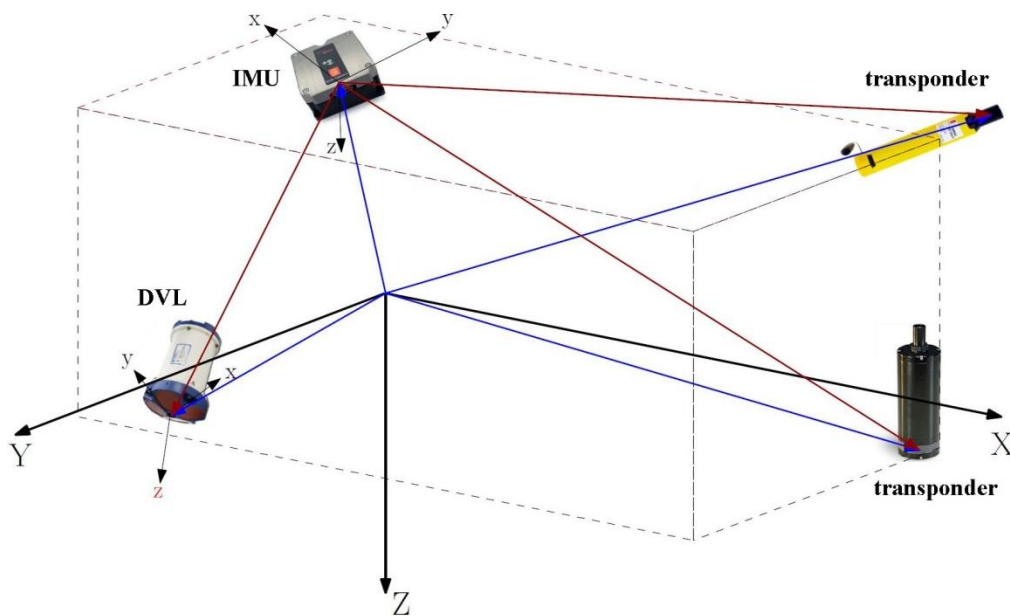
Τα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα, επανδρωμένα ή μη, αυτόνομα ή τηλεκατευθυνόμενα, διαθέτουν από έναν έως αρκετούς αισθητήρες για τις πολλαπλές λειτουργίες που εξυπηρετούν. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στους αισθητήρες που προσαρμόζονται στα υποβρύχια ρομπότ, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, για τη χαρτογράφηση αντικειμένων, περιοχών ενδιαφέροντος ή φαινομένων και για την τρισδιάστατη αναπαράσταση του υποβρύχιου χώρου. Στη συνέχεια, καταγράφονται τα είδη και οι αρχές λειτουργίας κάποιων από τους βασικότερους αισθητήρες, που επανέρχονται επανειλημμένα και στα υπόλοιπα κεφάλαια της εργασίας και αφορούν τόσο την καταγραφή εικονιστικής και γεωμετρικής πληροφορίας όσο την πλοήγηση και τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης θέσης ενός υποβρύχιου στόχου.

Αρχικά, η πλειοψηφία των αισθητήρων πλοήγησης που προσαρμόζονται στα υποβρύχια οχήματα εξυπηρετεί τη λήψη και μετάδοση ακουστικών σημάτων. Οι συνηθέστεροι αισθητήρες που λειτουργούν ως *αναμεταδότες* ηχητικών σημάτων είναι τα *υδρόφωνα*. Οι αναμεταδότες αυτοί, οι οποίοι στη διεθνή ορολογία απαντώνται ως *transponders*, *transducers* ή και *ringers*, τοποθετούνται πάνω στο υποβρύχιο όχημα είτε μεμονωμένοι είτε σε συστοιχίες και λειτουργούν συνδυαστικά με ένα δίκτυο τουλάχιστον τριών άλλων αναμεταδοτών, γνωστών συντεταγμένων και τοποθετημένων στον πυθμένα ή σε σκάφος υποστήριξης, ανάλογα με το σύστημα πλοήγησης (Long Baseline, Ultra Short Baseline κ.ά.). Με μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό και του χρόνου μετάδοσης ενός κύματος μεταξύ των αναμεταδοτών προκύπτουν οι αποστάσεις μεταξύ πομπών και δεκτών και με επίλυση τριπλευρισμών προκύπτει η θέση του υποβρύχιου οχήματος. Η συχνότητα δειγματοληψίας των ηχητικών σημάτων είναι ο βασικός παράγοντας που καθορίζει την τελική ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης. Σε υψηλότερες συχνότητες, ήτοι περισσότερες παρατηρήσεις, ενώ αυξάνεται η αξιοπιστία του αποτελέσματος, αναπόφευκτα μειώνεται η εμβέλεια του συστήματος, λόγω της γρηγορότερης εξασθένησης των ηχητικών κυμάτων μικρότερου μήκους στο νερό. Αντίθετα, οι χαμηλότερες συχνότητες επιλέγονται σε εφαρμογές μεγαλύτερου εύρους και μικρότερων απαιτήσεων σε ακρίβεια. Σε μία τυπική αποστολή ενός υποβρύχιου οχήματος, το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 0.3 έως 1.0 Hz (Agdestein, 2018). Για τη μέτρηση του βάθους ενός υποβρύχιου οχήματος προσαρμόζονται *μανόμετρα*, που μετρούν την πίεση στην υδάτινη στήλη. Η ακρίβεια ενός αξιόπιστου μανομέτρου αντιστοιχεί στο 0.01% της κλίμακας του και αντίστοιχα η ακρίβεια στον προσδιορισμό του βάθους είναι ανάλογη του βάθους, σε μια συχνότητα περίπου 8 Hz. Αυτό σημαίνει ότι τα επίπεδα ακρίβειας στον προσδιορισμό του βάθους μανομετρικά είναι υψηλότερα από ότι στον προσδιορισμό της απόστασης με ηχοβολιστικές μεθόδους.

Οι μεταβολές στη συχνότητα των ηχητικών κυμάτων λόγω της κίνησης του πομπού σε σχέση με τον δέκτη (φαινόμενο Doppler) αποτελούν βοηθητικό, κατά κάποιο τρόπο, παράγοντα για την προσθήκη επιπλέον παρατηρήσεων στον προσδιορισμό της θέσης ενός οχήματος υποβρυχίως. Αν ως πομπός θεωρείται το υποβρύχιο όχημα και ως δέκτης ο πυθμένας που ανακλά το ηχητικό σήμα, ο προσδιορισμός της τιμής της σχετικής ταχύτητας του οχήματος προς τον πυθμένα, επιτυγχάνεται μέσω του εντοπισμού της πιο ισχυρής ανάκλασης που λαμβάνει το όχημα, αυτής δηλαδή του πυθμένα, μέσω του *αισθητήρα DVL (Doppler Velocity Log)*. Κάθε αισθητήρας DVL φέρει τουλάχιστον τρεις (οι περισσότεροι στο εμπόριο φέρουν τέσσερις) πομποδέκτες στη διάταξή του που στέλνουν και λαμβάνουν ηχητικά κύματα. Με ταυτόχρονη χρήση πυξίδας είναι

δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης του υποβρύχιου οχήματος σε σχέση με τον πυθμένα, ενώ με αφετηρία το σύστημα αναφοράς του οχήματος (LBL, USBK, κ.ό.κ.), με συνδυασμό δηλαδή των παρατηρήσεων DVL και LBL ή USBL, γίνεται δυνατή η ακριβέστερη εκτίμηση της γεωγραφικής θέσης του οχήματος, αγγίζοντας ακρίβειες της τάξης των μερικών εκατοστών. Οι αισθητήρες DVL είναι bottom tracking, αλληλεπιδρούν δηλαδή με τον πυθμένα όταν βρίσκονται σε λειτουργική απόσταση από αυτόν και water tracking όταν αλληλεπιδρούν με τα ρεύματα ή τα μικροσωματίδια της υδάτινης στήλης (Christ & Wernli, 2013). Οι Doppler Velocity Loggers χρησιμοποιούνται τόσο για ακριβέστερη πλοήγηση και προσδιορισμό θέσης του οχήματος υποβρυχίως, όσο και για το σχεδόν αντίστροφο πρόβλημα, της χαρτογράφησης του πυθμένα· οι παρατηρήσεις DVL χρησιμοποιούνται δηλαδή ταυτόχρονα και για τη θέση του οχήματος ως προς τον πυθμένα αλλά και για την αποτύπωση του πυθμένα σε σχέση με το όχημα. Οι αισθητήρες DVL εκπέμπουν από 300 έως 1200 KHz, με εμβέλεια από 0.5 έως 200 m, ανάλογα της συχνότητας εκπομπής, ακρίβεια  $\pm 0.1$  cm/s, ρυθμό ενημέρωσης από 1 έως 5 Hz και επιχειρησιακά βάθη έως και 6.000 m (Μάλλιος, 2016).

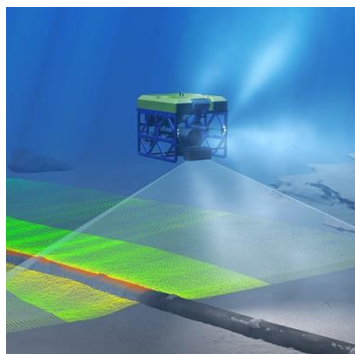
Από τα πιο διαδεδομένα συστήματα σχετικού εντοπισμού θέσης είναι τα αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (Inertial Navigation Systems - INS) και συγκεκριμένα η μέθοδος εντοπισμού dead reckoning. Το σύνολο της διάταξης των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό ονομάζεται *Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης (Inertial Measurement Unit - IMU)* και αποτελείται από ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων για τη μέτρηση της ταχύτητας του κινούμενου αντικειμένου, ένα γυροσκόπιο τριών αξόνων για τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας και τον προσδιορισμό της γωνίας διεύθυνσης της κίνησης, ένα μαγνητόμετρο τριών αξόνων για τη διόρθωση της μετατόπισης του γυροσκοπίου καθώς και ένα βαρόμετρο για την αναγωγή της αλλαγής της ατμοσφαιρικής πίεσης σε υψομετρική πληροφορία (Σκούρας, 2018). Η απόσταση προκύπτει από διπλή ολοκλήρωση της επιτάχυνσης στο χρόνο. Μία τυπική διάταξη IMU αισθητήρων έχει ρυθμό ανανέωσης από 100 έως 1.000 Hz, πολύ ταχύτερο δηλαδή των LBL, USBL, DVL. Η ανά διαστήματα βαθμονόμηση του συστήματος IMU θεωρείται απαραίτητη για την αξιοπιστία της τροχιάς του οχήματος και το μηδενισμό των σωρευτικών σφαλμάτων, όπως της ολίσθησης ή του θορύβου (Agdestein, 2018).



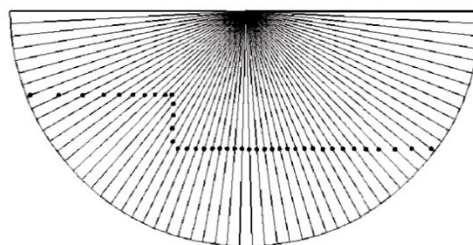
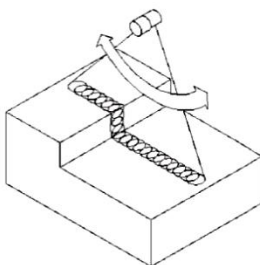
Εικόνα 1.9: Σύστημα διάταξης αισθητήρων (αναμεταδότες, IMU, DVL) σε UUV (Agdestein, 2018)

Οι αισθητήρες καταγραφής γεωμετρικής πληροφορίας που συνήθως φέρει ένα μη επανδρωμένο υποβρύχιο όχημα υποστηρίζουν ηχοβολιστικές τεχνικές, εκπέμποντας ηχητικά κύματα σε πολλαπλές διευθύνσεις (είτε κατακόρυφα είτε πλευρικά). Συνηθέστεροι τύποι ηχοβολιστικών συσκευών είναι τα ηχοβολιστικά απλής δέσμης (*single beam sonar*), τα ηχοβολιστικά πολλαπλής δέσμης (*multibeam echosounder*), τα ηχοβολιστικά πλευρικής σάρωσης (*side scan sonar*) και οι ακουστικοί τομογράφοι υποδομής πυθμένα (*sub-bottom profilers*). Τα *single beam sonars*, η πιο παραδοσιακή μορφή των *sonar*, εκπέμπουν μία κατακόρυφη δέσμη ηχητικών κυμάτων, σε συχνότητες που κυμαίνονται από 50 έως 500 KHz περίπου, με τις υψηλές συχνότητες να αποδίδουν μεγάλη ακρίβεια σε μικρότερη όμως απόσταση από το αντικείμενο και τις χαμηλότερες συχνότητες να χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερα βάθη, με μειωμένη ακρίβεια. Για την εξασφάλιση της κατακορυφότητας της δέσμης, στους αισθητήρες απλής δέσμης που προσαρμόζονται στα υποβρύχια οχήματα, τοποθετούνται παράλληλα γυροσκοπικοί μηχανισμοί, σε περιπτώσεις ρευμάτων, απώλειας προσανατολισμού ή στροφών των οχημάτων. Τα *multibeam sonars* εκπέμπουν επίσης ηχητικά σήματα μετρώντας τους χρόνους επιστροφής τους, όμοια με τα *single beam*, αλλά σε πολλαπλές δέσμες με ευρεία γωνία πρόσπτωσης, από 90° έως και 180°, σε κωνικό σχήμα (Εικόνα 1.10), διαγράφοντας διατομές εγκάρσιες στην πορεία του οχήματος σε ζώνες σάρωσης. Η εκπομπή των ηχητικών σημάτων επαναλαμβάνεται πολλές φορές το δευτερόλεπτο και η συχνότητα εκπομπής εξαρτάται από την απόσταση αντικειμένου – αισθητήρα καθώς και από τα επιθυμητά επίπεδα ανάλυσης. Η μεγάλη πυκνότητα των ηχοβολιστικών δεσμών των *multibeam sonars*, η δυνατότητα εκπομπής υψηλών συχνοτήτων, η υψηλή ταχύτητα κάλυψης μεγάλων περιοχών, η ικανότητα καταγραφής σύνθετων δομών πέραν του πυθμένα, καθιστούν τα πολυδεσμικά *sonars* κορυφαίο όργανο συλλογής γεωμετρικής πληροφορίας ακριβούς και υψηλής ανάλυσης. Ωστόσο, το κόστος τους παραμένει υψηλό και άρα μη ανταγωνιστικό των οπτικών (*vision-based*) προσεγγίσεων, με εφαρμογή των οποίων επιτυγχάνονται όμοια και ανώτερα αποτελέσματα ανάλυσης και ακρίβειας.

Οι ηχοβολιστές πλευρικής σάρωσης (*side scan sonars*) εκπέμπουν ηχητικά κύματα εκατέρωθεν και κάθετα του επιμήκους άξονα της πορείας του υποβρυχίου οχήματος, σχηματίζοντας μία αρκετά αμβλεία κωνική δέσμη ήχου (Εικόνα 1.11) η οποία επιστρέφει στον πομποδέκτη του αισθητήρα ως η ανάκλαση της μορφολογίας του πυθμένα. Κατά τη σάρωση, οι λωρίδες αυτές συνθέτουν ψευδοτριδιάστατες εικόνες (ηχογραφίες) της μορφολογίας του πυθμένα, που αποτυπώνονται στο ανάπτυσμα του κώνου. Σε αντίθεση με τα *single beam* και *multibeam sonars* που μετρούν τους χρόνους άφιξης των επιστρεφόμενων σημάτων, τα *side scan sonars* μετρούν την ισχύ τους, μεταφράζοντάς τη σε ανακλαστικότητα πυθμένα. Η πλάγια πρόσπτωση της ηχητικής δέσμης προσομοιάζει την πλάγια πρόσπτωση του φωτός ενός προβολέα σε μια επιφάνεια. Τα αντικείμενα-ανωμαλίες του πυθμένα φωτίζονται περισσότερο με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πιο φωτεινά κατά την καταγραφή τους. Οι συχνότητες που εκπέμπουν τα *side scan sonars* κυμαίνονται από 100 έως 500 KHz και ομοίως, οι υψηλότερες συχνότητες αποδίδουν μεγαλύτερη ανάλυση αλλά σε μικρότερη εμβέλεια (Christ & Wernli, 2013).

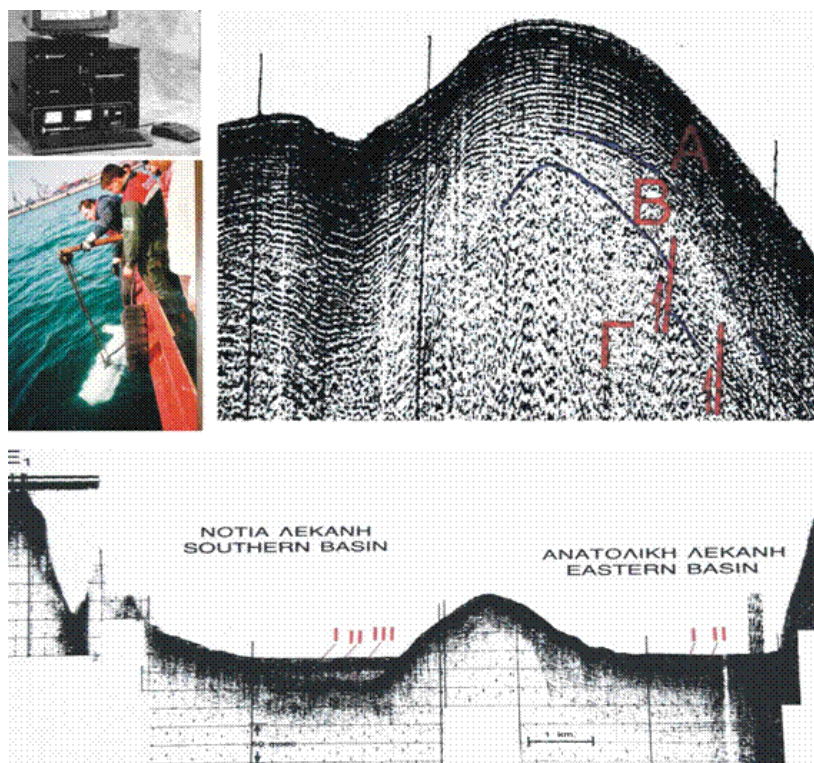


Εικόνα 1.10: Multibeam Sonar (teledynemarine.com)



Εικόνα 1.11: Side Scan Sonar (Christ et al., 2013)

Τέλος, μια κατηγορία ηχοβολιστικών οργάνων που χρησιμοποιούνται κυρίως για την απόδοση της στρωματογραφίας του πυθμένα είναι οι ακουστικοί τομογράφοι υποδομής πυθμένα. Τα ηχητικά κύματα που εκπέμπει ένας τέτοιος τομογράφος διεισδύουν στα ιζήματα του πυθμένα, ανιχνεύοντας από τα υδρόφωνα του και ανακλώντας ασυνέχειες στο εσωτερικό των ιζημάτων (διαφορές στο υλικό των ιζημάτων, στην κοκκομετρία ή στην περιεκτικότητα σε νερό, ρήγματα, διάβρωση, πηγές υδρογονανθράκων κ.ά.). Τα αποτελέσματα αυτών των sub-bottom profilers είναι συνήθως τομές του πυθμένα όπου εντοπίζονται σχετικά ευρήματα και αναπαριστούν την ένταση κάθε ανάκλασης (Εικόνα 1.12).

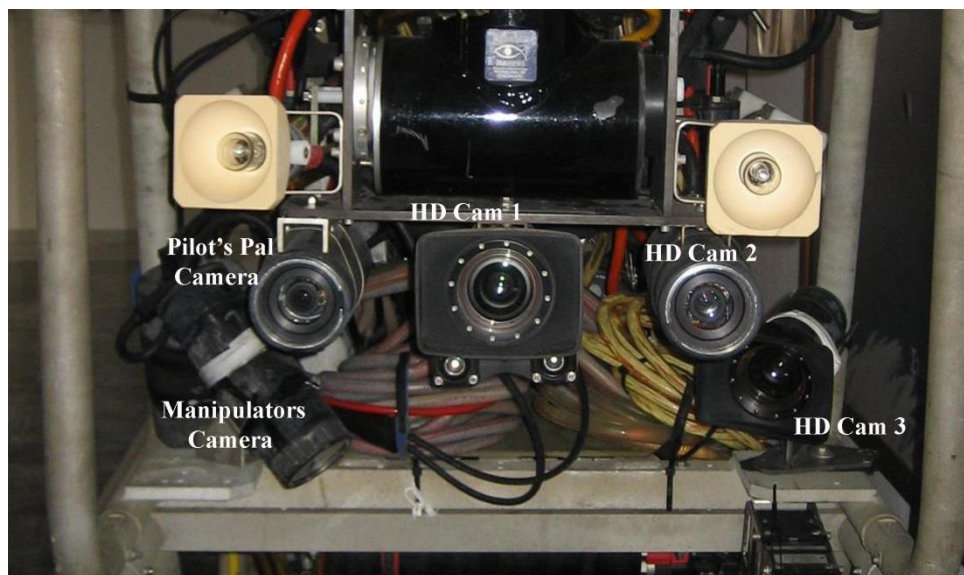


Εικόνα 1.12: Τομές στρωματογραφίας πυθμένα από δεδομένα σάρωσης Sub-bottom Profiler (geo.auth.gr)

Ως προς τους αισθητήρες καταγραφής εικόνας, οι κάμερες αποτελούσαν εξ αρχής βασικό μέλος των μερών ενός μη επανδρωμένου υποβρύχιου οχήματος, αφού για ένα ROV είναι τα “μάτια” του χειριστή. Ο συνδυασμός της αλματώδους ανάπτυξης της υποβρύχιας φωτογραφίας με το πεδίο της Όρασης Υπολογιστών αποτελεί τις τελευταίες δεκαετίες μεγάλη πρόκληση για την



υποβρύχια ρομποτική, κερδίζοντας συνεχώς έδαφος στην πλοήγηση και την λεπτομερή και ακριβή γεωμετρική τεκμηρίωση του υποβρύχιου χώρου. Για τις περιπτώσεις απομακρυσμένης τεκμηρίωσης, σημαντικής δηλαδή απόστασης αισθητήρα-αντικειμένου, ως λύση παραμένει ο ηχοβολισμός. Για τις περιπτώσεις αποστάσεων κατάλληλων για την καταγραφή οπτικής πληροφορίας, ακόμα και σε περιβάλλοντα μειωμένου έως μηδενικού φωτισμού, η τρισδιάστατη αποτύπωση επιτυγχάνεται με υψηλά επίπεδα ανάλυσης και ακρίβειας, με τεχνικές επεξεργασίας εικόνας. Για τη λήψη εικόνων υποβρυχίως χρησιμοποιούνται μηχανές RGB υψηλής ανάλυσης (HD, UHD), κυρίως CCD αισθητήρων λόγω του χαμηλού κόστους τους, με φακούς πολλαπλών μεγεθών, κυρίως ευρυγώνιους λόγω περιορισμών στην απόσταση μεταξύ φακού και αντικειμένου. Κατασκευαστικά, οι μηχανές που προσαρμόζονται σε υποβρύχια οχήματα έχουν περιορισμένο όγκο και το περίβλημά τους, είτε πρόκειται για υδατοστεγή θήκη (housing) είτε για τον ίδιο τον κλωβό της μηχανής (για τις επονομαζόμενες αμφίβιες μηχανές), είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να αντέχει τις πιέσεις του επιχειρησιακού βάθους του υποβρύχιου ρομπότ στο οποίο προσαρμόζεται (Christ & Wernli, 2013). Τα υποβρύχια οχήματα συνήθως φέρουν περισσότερες από μία κάμερες (Εικόνα 1.13) τα ROV οχήματα, ειδικότερα, φέρουν μία ή περισσότερες κάμερες, συνήθως χαμηλότερης ανάλυσης για τη μετάδοση εικόνας στην επιφάνεια σε πραγματικό χρόνο κατά την πλοήγηση, και επιπλέον συστήματα καμερών υψηλής ανάλυσης για τις ανάγκες της χαρτογράφησης και της τρισδιάστατης ανακατασκευής του χώρου, που μπορεί να είναι συστήματα μονής κάμερας (monocular), συστοιχίες στερεοζευγών (stereo) ή και συστήματα περισσότερων από δύο κάμερες. Η κάθε κάμερα μεμονωμένα, οι στέρεο κάμερες και τα άνω των 2 καμερών συστήματα βαθμονομούνται, αφενός για την αποκατάσταση των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας των μηχανών και αφετέρου για την απόδοση κλίμακας στο αντικείμενο κατά την επεξεργασία των εικόνων (Drap et al., 2015; Christ & Wernli, 2013). Οι φυσικές ιδιότητες του υγρού στοιχείου από την άλλη μεριά, όπως η απορρόφηση, η διάθλαση και η σκέδαση του φωτός αποτελούν συνυπολογίσιμους παράγοντες στην επεξεργασία της υποβρύχιας εικόνας και ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών όπως και η διόρθωσή τους συνιστούν αντικείμενο έρευνας. Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύονται τα χαρακτηριστικά της υποβρύχιας φωτογραφίας και πώς αυτή με την κατάλληλη επεξεργασία, αλλά και βαθμονόμηση των οπτικών αισθητήρων του υποβρύχιου οχήματος, αποτελεί εργαλείο για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του πυθμένα.



Εικόνα 1.13: Διάταξη καμερών στο ROV Max του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. ([www.hcmr.gr](http://www.hcmr.gr))

Το φυσικό φως της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι τα 200 m βάθος περίπου, ενώ από τα 3 m μέχρι τα 200 υφίσταται μία σταδιακή απορρόφηση των χρωμάτων, με πρώτο να εξασθενεί το κόκκινο χρώμα. Για το λόγο αυτό η πλειοψηφία των υποβρύχιων ρομποτικών οχημάτων φέρει *επιπλέον πηγές φωτισμού*, βασικότεροι τύποι των οποίων είναι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, οι φθορισμού, οι HID (High Intensity Discharge) καθώς και οι λαμπτήρες LED (Light Emitting Diode) (Christ & Wernli, 2013).

Έρευνες (Jagalingam et al., 2015) σχετικά με χρήση δορυφορικών και πολυφασματικών εικόνων έχουν δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα βαθυμετρικής αποτύπωσης και στρωματογραφίας του πυθμένα καθώς και υλικό για επιτυχημένες ταξινομήσεις εικόνων, για βάθη έως τα 25 περίπου m. Πέραν των καμερών RGB, οι *υπερφασματικές κάμερες (hyperspectral cameras)* κερδίζουν συνεχώς έδαφος στην χαρτογράφηση του πυθμένα και των αντικειμένων ή μικροοργανισμών που απαντώνται σε αυτόν (ιλύς, χονδρόκοκκη άμμος, βράχος, ποσειδωνία, μέταλλο, κοράλλια, πηλός κ.ά.), μέσα από την ταξινόμηση εικόνων που προκύπτουν από ακουστικές παρατηρήσεις. Μία υπερφασματική κάμερα (Underwater Hyperspectral Imager - UHI) ή ακριβέστερα ένας υπερφασματικός αισθητήρας, μιας και πρόκειται για ηχοβολιστικό σαρωτή, που προσαρμόζεται πάνω σε ένα ROV ή AUV, σαρώνει τον πυθμένα καταγράφοντας σε λωρίδες κάθετες στην πορεία του οχήματος, την ανακλαστικότητα των εκπεμπόμενων σημάτων του. Οι υπερφασματικές εικόνες που προκύπτουν συνδυάζονται με τα στοιχεία εντοπισμού θέσης του οχήματος για την παραγωγή γεωαναφερόμενων υπερφασματικών χαρτών. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα καταγραφής πληροφορίας πέραν του ορατού φάσματος ακτινοβολίας, σε εύρος από 350 έως και 900 nm, και για την αποτελεσματική λειτουργία τους απαιτείται η τήρηση μικρών σχετικά αποστάσεων από τον πυθμένα, η εκπομπή υψηλών συχνοτήτων και η ομοιογένεια στις φωτιστικές συνθήκες της υπό σάρωση περιοχής (Nornes, 2018). Τα δεδομένα εικόνας ή βίντεο μεταδίδονται μέσω καλωδίου ή οπτικής ίνας στην επιφάνεια, στο κέντρο ελέγχου του υποβρύχιου οχήματος (για τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα), ενώ ταυτόχρονα αποθηκεύονται στη μνήμη της μηχανής.

## 2 | Underwater Acoustic Positioning Systems

Για τις ανάγκες της πλοήγησης και του προσδιορισμού της θέσης υποβρύχιων οχημάτων, αντικειμένων ή δυτών αναπτύχθηκαν ήδη από τις αρχές του 1960 συστήματα υποβρύχιας ακουστικής, αρχικά κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς, μέσω λήψεων ακουστικών συχνοτήτων για τη μέτρηση μετρήσεων αποστάσεων και διευθύνσεων. Η χρήση υποβρύχιων μεθόδων προσδιορισμού θέσης επεκτάθηκε πέραν των στρατιωτικών εφαρμογών σε ωκεανογραφικές έρευνες, εξορύξεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, την ενάλια αρχαιολογία, εργασίες διάσωσης, λιμενικά έργα, τη βιομηχανία υποβρύχιων καλωδίων και αγωγών όπως και σε πληθώρα άλλων υποθαλάσσιων εργασιών. Το υποβρύχιο περιβάλλον, ωστόσο, παρουσιάζει συχνά ιδιαιτερότητες ως προς τον προσδιορισμό θέσης μέσω ακουστικών συστημάτων πλοήγησης που υποστηρίζονται από δορυφορικές παρατηρήσεις. Για την εκτίμηση της οριζοντιογραφικής θέσης, ειδικοί πομποδέκτες, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στις φυσικές παραμέτρους διάδοσης του ήχου στο νερό, προσαρμόζονται στο πλοίο ή όχημα επιφανεάς, όπου λαμβάνονται παράλληλα παρατηρήσεις με GPS, ή ακόμη ποντίζονται στη γύρω περιοχή, ενώ παράλληλα αισθητήρες (βάθους, πορείας, περιστροφής) ενσωματωμένοι στο υποβρύχιο όχημα (ή/και δύτη) χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή υψομετρικής (ή βαθυμετρικής εν προκειμένω) πληροφορίας (Μάλλιος, 2006). Η τελική γεωγραφική θέση ενός υποβρύχιου οχήματος προκύπτει από τον διανυσματικό συσχετισμό των δύο παραπάνω θέσεων της γεωγραφικής θέσης του οχήματος επιφανεάς και της σχετικής θέσης στο υποβρύχιο περιβάλλον, όπως αυτή προκύπτει από την πληροφορία των αναμεταδοτών. Από τις συνηθέστερες τεχνικές εντοπισμού υποβρύχιων οχημάτων είναι η Long-baseline (LBL), η Short-baseline (SBL), η Ultra-short-baseline (USBL) και η GPS Intelligent Buoys (GIB), κατά τις οποίες ένα σύνολο ακουστικών αναμεταδοτών τοποθετούνται, αναλόγως της αρχής λειτουργίας τους, στα σκάφη υποστήριξης και στην ευρύτερη περιοχή της πλοήγησης και παρακολουθούν το υποβρύχιο όχημα ή αντικείμενο, εντοπίζοντας τη θέση του σε σχέση με τους πομποδέκτες. Οι διαφοροποιήσεις αυτών των τεχνικών πλοήγησης βρίσκονται κυρίως στη γεωμετρία της διασποράς των αναμεταδοτών, όπως μαρτυρά και το όνομα κάθε μεθόδου (μεγάλη, μικρή ή πολύ μικρή βάση), στον αριθμό των αναμεταδοτών και στα ανάλογα επίπεδα ακρίβειας προσδιορισμού θέσης.

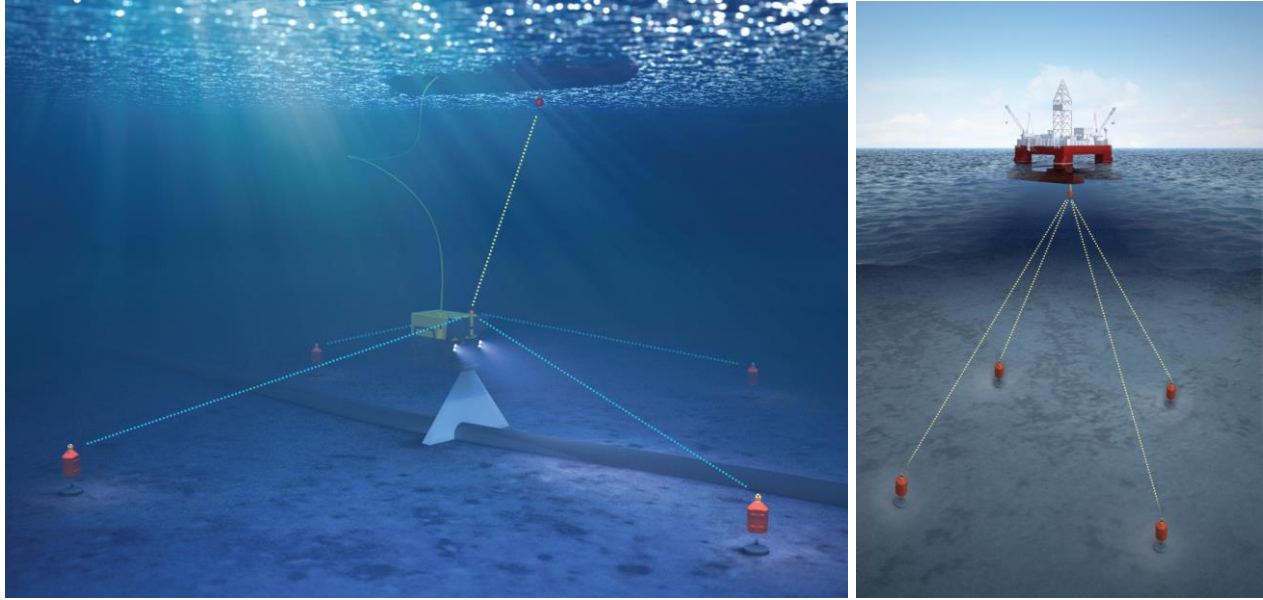
Ο προσδιορισμός της θέσης υποβρύχιων οχημάτων, αυτόνομων ή μη, σε περιπτώσεις μεγάλων βαθών ή αποστάσεων από τους αναμεταδότες, έντονου αναγλύφου, ύπαρξης εμποδίων ή απότομων διαφοροποιήσεων και ανομοιογενειών των συνθηκών του νερού (ταχύτητα ήχου, ανακλάσεις και διαθλάσεις σημάτων, χρόνος μετάδοσης και χρόνος επεξεργασίας σημάτων, χρονικό κενό μεταξύ των χρόνων απόκρισης, συνηθέστερα αναφερόμενων ως rings κ.ά.), συχνά μπορεί να καταστεί από ανακριβής έως και αδύνατος.

Για τους λόγους αυτούς, οι τεχνικές υποβρύχιας ακουστικής πλοήγησης με ταυτόχρονες δορυφορικές παρατηρήσεις, ενισχύονται από αδρανειακά συστήματα πλοήγησης (και συγκεκριμένα τεχνικές dead reckoning, με τον ελληνικό όρο στη ναυτιλία να αναφέρεται ως “στίγμα εξ αναμετρήσεως”) προσαρμοσμένα πάνω στα κινούμενα υποβρυχίως αντικείμενα. Για

την εφαρμογή τεχνικών dead reckoning (DR) χρησιμοποιούνται αισθητήρες καταγραφής της ταχύτητας του ήχου (γνωστή και ως ταχύτητα Doppler), οι οποίοι σε συνδυασμό με μαγνητόμετρα και γυροσκόπια, παρέχουν επιπλέον διορθώσεις στον υπολογισμό της απόστασης υποβρυχίως (Snyder, 2010). Ακολουθώντας, παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικότερες κατηγορίες ακουστικών συστημάτων εντοπισμού θέσης (Long-baseline systems - LBL, Short-baseline systems - SBL, Ultra-short-baseline systems – USBL και GPS Intelligent Buoys systems - GIB) ως προς την αρχή λειτουργίας τους, τα επίπεδα ακριβειών τους και, τελικά, τις εφαρμογές τεχνικών χαρτογράφησης και τρισδιάστατης ανακατασκευής με τις οποίες συνδέονται τα τελευταία χρόνια. Εκτενέστερη περιγραφή γίνεται στην ενότητα περί USBL (Ultra-short-baseline systems), η οποία είναι εμφανίζεται τελικά ως η πιο διαδεδομένη μέθοδος εντοπισμού θέσης κατά την εφαρμογή τεχνικών SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον.

## 2.1 Τεχνικές Long Baseline (LBL)

Η κατηγορία Long Baseline αναφέρεται σε τεχνικές κατά τις οποίες υλοποιείται στην περιοχή ενδιαφέροντος και εργασιών ένα δίκτυο υποβρυχίων αναμεταδοτών σε γνωστές σταθερές θέσεις και λαμβάνει σύντομα ακουστικά σήματα από έναν πομπό-στόχο εγκατεστημένο είτε σε κάποιο υποβρύχιο τηλεκατευθυνόμενο όχημα είτε σε αυτοδύτη είτε σε οποιοδήποτε άλλο υποβρύχιο αντικείμενο του οποίου ζητείται να προσδιοριστεί η θέση. Ο πομποδέκτης-στόχος συνδέεται (συνήθως ενσύρματα) με ένα σκάφος υποστήριξης (Εικόνα 2.1), όπου συγκεντρώνονται και τίθενται υπό επεξεργασία όλες οι ληφθείσες πληροφορίες των σημάτων που εκπέμπονται. Το ακουστικό σήμα που στέλνει ο στόχος λαμβάνεται από τους δέκτες-αναμεταδότες, οι οποίοι επιστρέφουν το σήμα αυτό πίσω στον στόχο. Με γνωστή την ταχύτητα του ήχου στο νερό για την συγκεκριμένη περιοχή και το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπολογίζονται έτσι οι αποστάσεις που διανύουν τα ακουστικά σήματα, δηλαδή οι αποστάσεις από τον στόχο προς κάθε αναμεταδότη. Αυτή η διαδικασία μετάδοσης σημάτων και υπολογισμού αποστάσεων πραγματοποιείται για όλους τους εγκατεστημένους στο βυθό αναμεταδότες και, με γνωστές τις θέσεις τους στο χώρο, επιλύονται εξισώσεις τριπλευρισμού για τον τελικό προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του αντικειμένου-στόχου. Για την επίλυση του τριπλευρισμού (η ζητούμενη θέση μεταφράζεται ως η τομή τριών σφαιρών στο χώρο) απαιτούνται τουλάχιστον τρεις αναμεταδότες, με γνωστές συντεταγμένες  $(x_i, y_i, z_i)$ . Βάσει αυτών επιλύεται μονοσήμαντα ένα σύστημα τριών εξισώσεων της μορφής  $d_i = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2$  (εξίσωση απόστασης) και προκύπτει τελικά η θέση του σημείου στο χώρο. Για την επίτευξη ελαχιστοτετραγωνικής επίλυσης και τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας μετρήσεων και αποτελεσμάτων, αυξάνεται ο αριθμός των αναμεταδοτών σε σταθερές θέσεις (Α.ΡΟ.ΜΑ.Β.,2012).



Εικόνα 2.1: Διάταξη συστήματος Long BaseLine (LBL) ([www.kongsberg.com](http://www.kongsberg.com))

Ο όρος Long Baseline αναφέρεται στις αποστάσεις μεταξύ των εγκατεστημένων στον πυθμένα αναμεταδοτών, που συγκριτικά με τις τεχνικές Short Baseline (SBL) και Ultra-Short Baseline (USBL), όπου οι πομποδέκτες βρίσκονται πάνω σε κάποιο πλωτό υποστήριξης σε μικρές μεταξύ τους αποστάσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες καλύπτοντας συνήθως σε εύρος την περιοχή ενδιαφέροντος, κάνοντας έτσι τη γεωμετρία του δικτύου των σταθερών σημείων σημαντικά ισχυρότερη και τις ακρίβειες προσδιορισμού υποβρύχιας θέσης αισθητά μεγαλύτερες. Επίσης, κάτι που καθιστά αρκετά αξιόπιστη την LBL ως μέθοδο είναι η σταθερότητα των αναμεταδοτών του πυθμένα, σε σύγκριση με τις μεθόδους SBL και USBL, όπου προστίθεται και το σφάλμα της κίνησης των πλωτών μέσων στα οποία εγκαθίστανται οι αναμεταδότες (Christ, 2013).

Η μέθοδος Long Baseline για πλοήγηση και υποβρύχιο προσδιορισμό θέσης εφαρμόστηκε από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 για στρατιωτικούς σκοπούς και συγκεκριμένα από την ωκεανογραφική υπηρεσία του αμερικανικού ναυτικού για την έρευνα και τον εντοπισμό του πυρηνικού υποβρυχίου USS Thresher, κάτι που θεωρείται και ως η απαρχή των σύγχρονων εφαρμοσμένων τεχνικών υποβρύχιας πλοήγησης, με εντυπωσιακές για την εποχή ακρίβειες προσδιορισμού θέσης της τάξης των 90 περίπου m. Αργότερα, με τις δυνατότητες πύκνωσης του δικτύου των σταθερών υποβρύχιων αναμεταδοτών καθώς και με την εισαγωγή αδρανειακών αισθητήρων για μείωση κυρίως των σφαλμάτων ολίσθησης τα επίπεδα ακρίβειας αυξάνονταν εκθετικά ως αναμενόμενα (A.PO.MA.B.,2012).

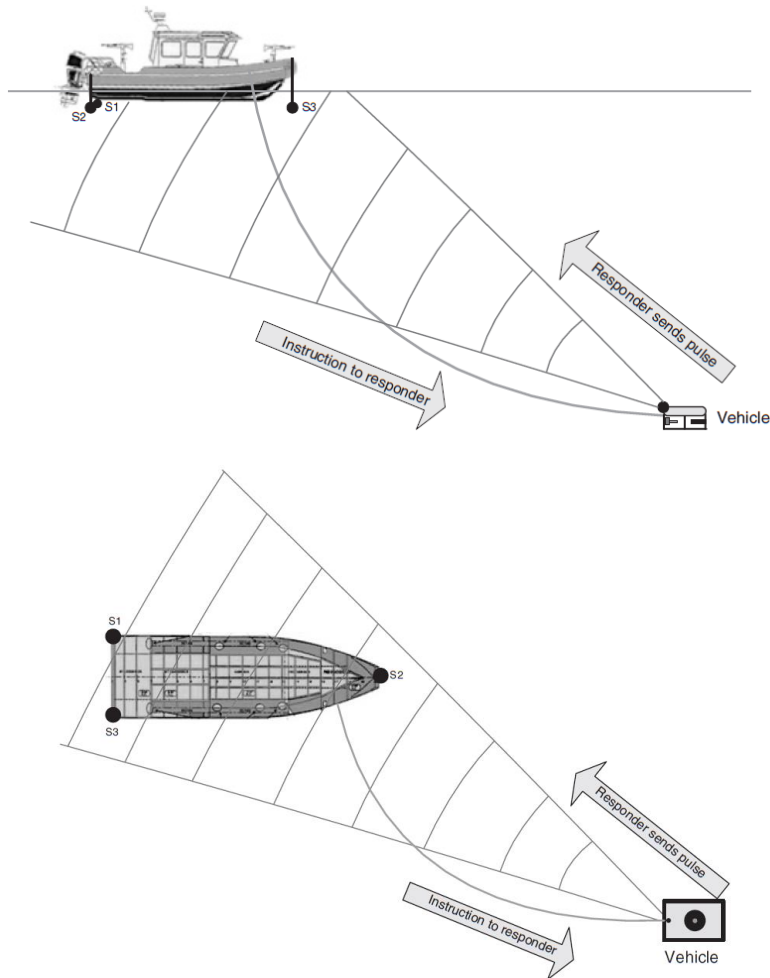
Σε αριθμούς, η συχνότητα εκπομπής ηχητικών σημάτων σε μία μέθοδο Long Baseline, κυμαίνεται από 7 έως 45 KHz, με ακτίνα εμβέλειας από 50 έως 10.000 m αναλόγως της συχνότητας, με ρυθμούς ανανέωσης από 2.5 έως 20'' (0.4 – 0.05 Hz) και με ακρίβεια ανάλογη της απόστασης (από  $\pm 0.1$  έως 10 m). Στο εμπόριο υπάρχουν συσκευές πομποδεκτών με δυνατότητες εκπομπών έως και 200 KHz, που αντιστοιχούν αναλογικά σε σαφώς μικρότερες εμβέλειες της τάξης των 300 m, λόγω της ταχείας απορρόφησης των υψηλών συχνοτήτων στο νερό.

## 2.2 Τεχνικές Short Baseline (SBL)

Στην ίδια φιλοσοφία με τις τεχνικές Long Baseline ως προς τη διάδοση ακουστικών σημάτων για τον προσδιορισμό υποβρύχιων θέσεων είναι και οι τεχνικές Short Baseline (SBL), με τη διαφορά

ότι στις δεύτερες, τρία και πλέον υδρόφωνα-αναμεταδότες (S1, S2, S3, Εικόνα 2.2) είναι βυθισμένα σε τρίγωνο ή περιμετρικά του επιχειρησιακού σκάφους. Οι αποστάσεις (baselines) μεταξύ των αναμεταδοτών εξαρτώνται από τις διαστάσεις του πλωτού και η θέση τους προσδιορίζεται με ακρίβεια λίγων cm, είτε από τις πληροφορίες του κατασκευαστή για το πλωτό, είτε από μετρήσεις GPS με χρήση δεκτών που προσαρμόζονται πάνω στους αναμεταδότες. Η τελευταία τεχνική (GPS Intelligent Buoys systems - GIB) ανήκει στην πιο εξελιγμένη μεθοδολογία τεχνικών LBL και SBL, όπου η γεωαναφορά του συστήματος γίνεται με δέκτες GPS, προσαρμοσμένους πάνω στα υδρόφωνα και αναλύεται περισσότερο σε επόμενη ενότητα.

Όμοια με τις τεχνικές LBL, τουλάχιστον τρεις αναμεταδότες σε σταθερές μεταξύ τους αποστάσεις εκπέμπουν ένα ακουστικό ερέθισμα που λαμβάνει και επιστρέφει το αντικείμενο-στόχος του οποίου η θέση ζητείται να εκτιμηθεί. Οι χρόνοι μετάδοσης των σημάτων προς κάθε αναμεταδότη καταγράφονται και με γνωστή την ταχύτητα του ήχου στο νερό, υπολογίζονται οι αποστάσεις από τον στόχο προς κάθε αναμεταδότη που βρίσκεται στο πλωτό. Τέλος, με επίλυση εξισώσεων τριπλευρισμού υπολογίζεται η ζητούμενη υποβρύχια θέση.

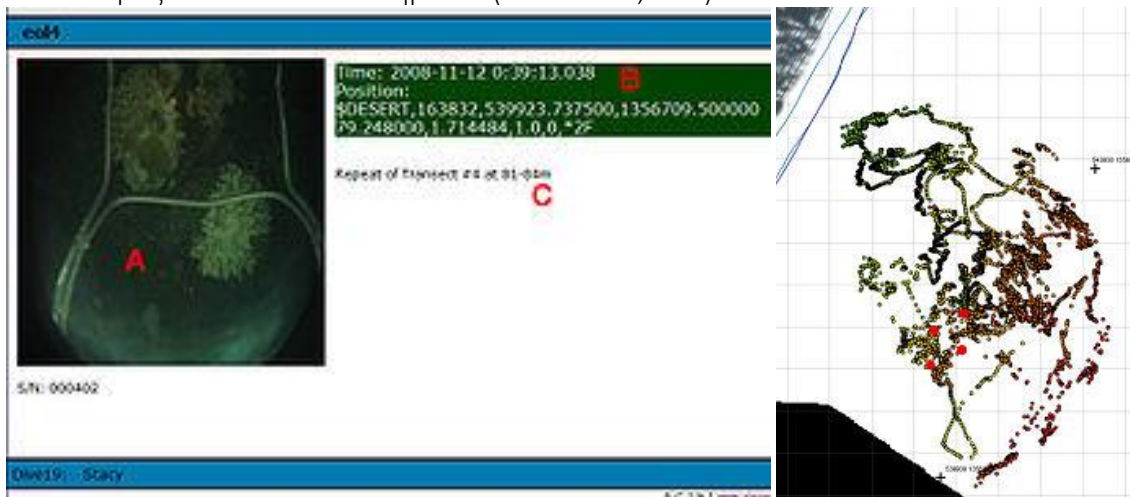


Εικόνα 2.2: Διάταξη συστήματος Short Baseline (SBL) (Christ et al., 2013)

Αν και η αρχή λειτουργίας των μεθόδων SBL ομοιάζει αρκετά με εκείνα των LBL, τα επίπεδα ακρίβειας των πρώτων είναι χαμηλότερα. Ένας βασικός λόγος είναι ότι το δίκτυο των αναμεταδοτών είναι προσαρμοσμένο σε κάποιο σκάφος, το οποίο εισάγει σφάλματα

μετατοπίσεων και στροφών ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) στο σύστημα, ακόμα κι αν διαθέτει τεχνολογίες DP (Dynamic Positioning) που το ακινητοποιούν σε οποιοσδήποτε συνθήκες. Για τη διόρθωση τέτοιων σφαλμάτων λόγω κίνησης, συχνά χρησιμοποιούνται επιπλέον ηλεκτρονικά γυροσκόπια και στάθμες κατακορύφωσης των στύλων όπου τοποθετούνται τα υδρόφωνα. Με αυτές τις διορθώσεις τα επίπεδα ακρίβειας μιας μεθόδου Short Baseline είναι δυνατό να προσεγγίσουν εκείνα μιας Long Baseline.

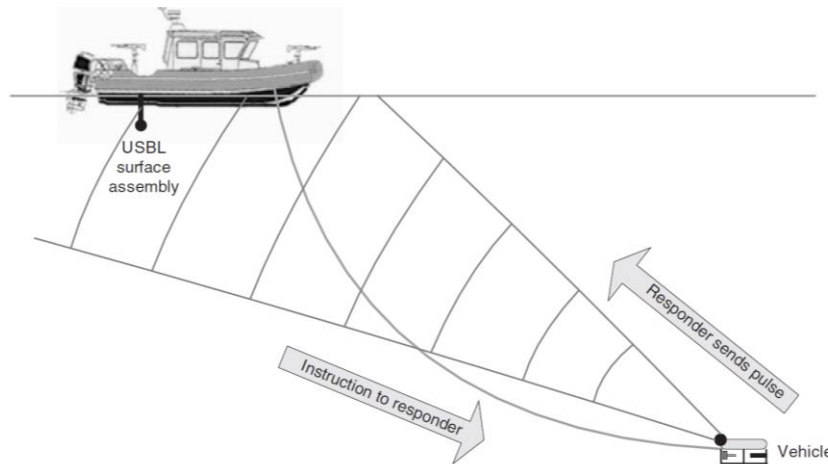
Πρώτη εμφάνιση μεθόδων πλοήγησης και εντοπισμού υποβρύχιας θέσης Short Baseline αναφέρεται το 1963 για τις ανάγκες του εντοπισμού του αμερικάνικου υποβρυχίου USS Thresher, το οποίο χάθηκε σε βάθος 2560 m. Ένα σύστημα εντοπισμού SBL εγκαταστάθηκε πάνω στο ωκεανογραφικό σκάφος USNS Mizar, το οποίο είχε την αποστολή να καθοδηγήσει το βαθυσκάφος Trieste 1 πάνω από το ναυάγιο του Thresher. Λόγω των χαμηλών ακριβειών της μεθόδου, το ναυάγιο κατάφερε να εντοπιστεί μόνο μία από τις δέκα απόπειρες που επιχειρήθηκαν. Από τη δεκαετία του 70 και έπειτα, η εφαρμογή τεχνικών υποβρύχιας πλοήγησης, και ιδιαίτερα Short Baseline, επεκτάθηκε πολύ πέραν των στρατιωτικών εφαρμογών, εξυπηρετώντας πληθώρα έργων στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, λιμενικά έργα, ωκεανογραφικές έρευνες, τη θαλάσσια βιολογία και την ενάλια αρχαιολογία. Το ωκεανογραφικό ινστιτούτο Woods Hole για παράδειγμα, χρησιμοποιεί τεχνικές Short Baseline για την παρακολούθηση και τον προσδιορισμό ακριβούς θέσης του τηλεκατευθυνόμενου ρομπότ βαθιών επιχειρήσεων Jason, με σταθμό αφετηρίας το σκάφος Medea, επιτυγχάνοντας αποκλίσεις της τάξης των 9 cm. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα εφαρμογή SBL καταγράφεται τα τελευταία χρόνια (από το 2007) στην Ανταρκτική, όπου το τμήμα ωκεανογραφικών ερευνών Moss Landing Marine Laboratory προσαρμόζει τεχνολογία SBL στο σύστημα πλοίο-υποβρύχιο τηλεκατευθυνόμενο όχημα, για την χαρτογράφηση πληθυσμών βενθικών οργανισμών κάτω από τους πάγους, μία εφαρμογή που απαιτεί υψηλές ακρίβειες πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης. Το ROV, διαπερνώντας τρύπες στον πάγο διαμέτρου μόλις 20 cm καταγράφει με ακολουθίες βίντεο πορείες ενδιαφέροντος στον πυθμένα, των οποίων η θέση προσδιορίζεται μέσω της τεχνολογίας SBL με ακρίβεια μικρότερη των 50 cm. Συγκεκριμένα, η επιστημονική ομάδα λαμβάνει σε πραγματικό χρόνο, για κάθε εικόνα που εξάγει από το βίντεο, την ακριβή οριζοντιογραφική θέση του ROV, το βάθος του και τη χρονική στιγμή λήψης της εικόνας (Εικόνα 2.3), και αξιοποιώντας τις πληροφορίες αυτές δημιουργεί ακριβείς χάρτες διασποράς και πυκνότητας θαλάσσιων ενδιαιτημάτων (A.PO.MA.B., 2012).



Εικόνα 2.3: Χαρτογράφηση πληθυσμών βενθικών οργανισμών στην Ανταρκτική με χρήση SBL τεχνολογίας (A.PO.MA.B., 2012)

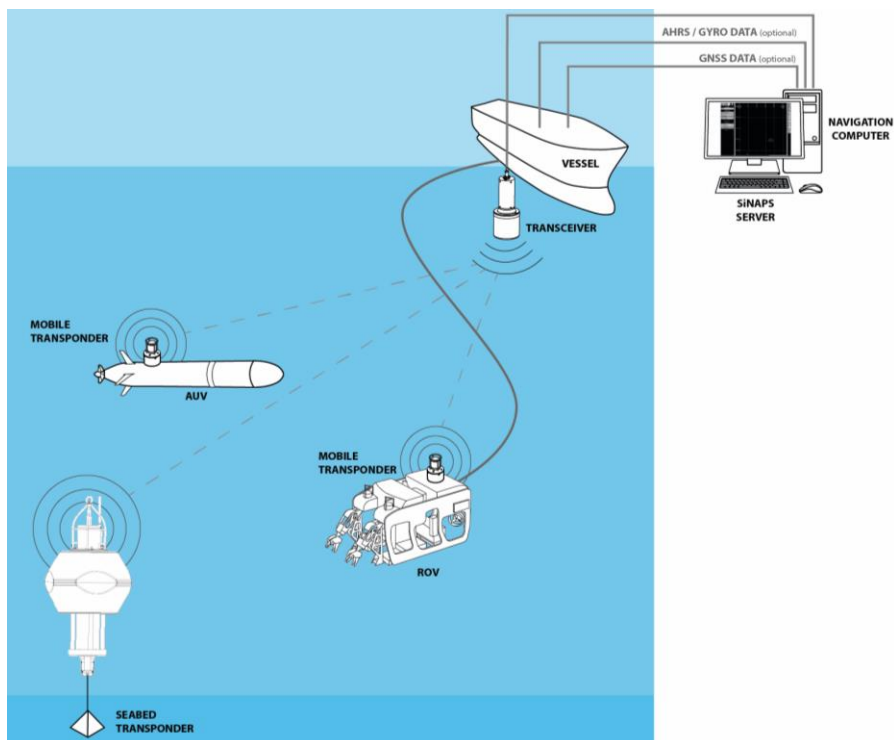
### 2.3 Τεχνικές Ultra-Short Baseline (USBL)

Η κατηγορία Ultra-Short Baseline (USBL), ή και Super Short Baseline (SSBL) όπως επίσης απαντάται, αφορά, όμοια με τις Short Baseline τεχνικές, διάταξη αναμεταδοτών προσαρμοσμένων σε σκάφος υποστήριξης που εκπέμπουν ακουστικά σήματα τα οποία λαμβάνει ένα υποβρύχιο αντικείμενο-στόχος και τελικά επιστρέφει στους αναμεταδότες, καταγράφοντας έτσι μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών, σε αντίθεση με τις τεχνικές Long Baseline όπου οι αναμεταδότες είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα σε γνωστές θέσεις και μεγάλες μεταξύ τους αποστάσεις (βάσεις). Ως προς την κατηγορία των “μικρών βάσεων”, η πρώτη βασική διαφορά μεταξύ USBL και SBL μεθόδων είναι ότι στην πρώτη κατηγορία οι αναμεταδότες που βρίσκονται στο σκάφος δεν είναι αυτόνομοι και τοποθετημένοι με κάποια διασπορά, αλλά αποτελούν μέλη μιας ενιαίας συνδεσμολογίας, που συνήθως είναι ένας στύλος σχετικά μικρής διατομής στον οποίο βρίσκονται οι αναμεταδότες (Εικόνες 2.4, 2.5). Σε έναν τέτοιο στύλο είναι δυνατό να υπάρχουν 3 ή περισσότεροι αναμεταδότες που σχηματίζουν τουλάχιστον ένα επίπεδο (ή δύο διανύσματα με σημείο τομής έναν κοινό αναμεταδότη να σχηματίζουν ένα επίπεδο). Τα διανύσματα αυτά των αναμεταδοτών μπορεί να είναι μεγέθους 10-15 cm, ενώ σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να είναι έως και λίγα mm (Szlachetko et al., 2016).



Εικόνα 2.4: Γενική διάταξη συστήματος Ultra Short Base Line (Christ et al., 2013)

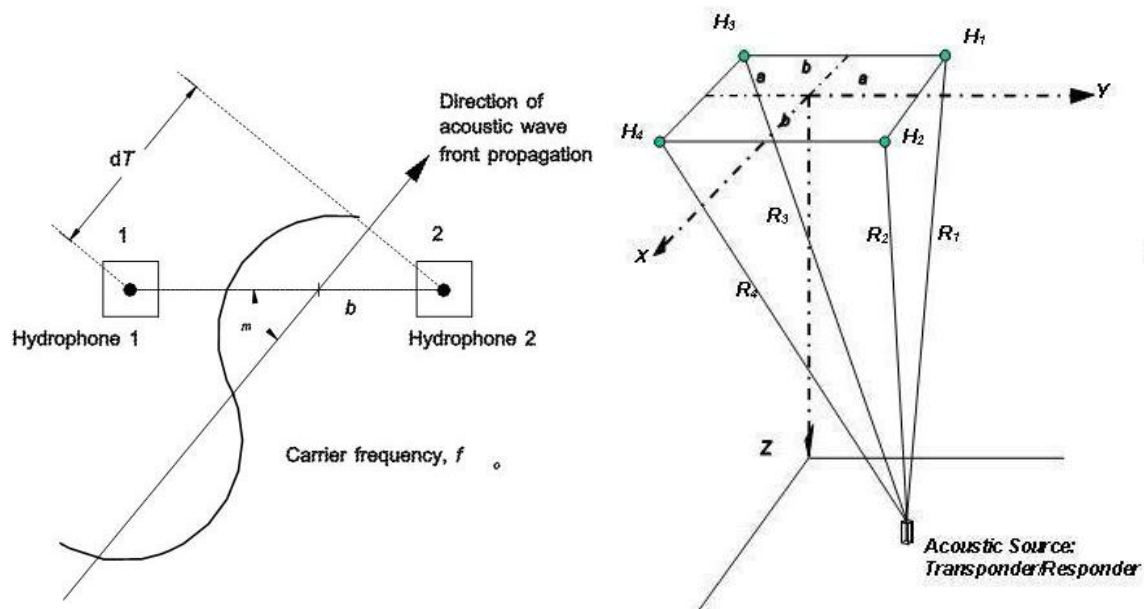




Εικόνα 2.5: Ολοκληρωμένο σύστημα Ultra Short Base Line ([www.evologics.de](http://www.evologics.de))

Η δεύτερη βασική διαφορά, ίσως και η βασικότερη, όχι μόνο σε σχέση με τις τεχνικές SBL αλλά γενικότερα με όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες, είναι ότι σε μία εφαρμογή Ultra Short Baseline, η θέση ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο δεν προσδιορίζεται από επιλύσεις τριπλευρισμών με γνωστές μόνο τις αποστάσεις μεταξύ των πομποδεκτών, αλλά με μετρήσεις τόσο αποστάσεων όσο και γωνιών με τη μέθοδο της διαφοράς φάσης των ημιτονοειδών σημάτων που επιστρέφουν στους αναμεταδότες του σκάφους υποστήριξης.

Οι μετρήσεις των αποστάσεων από το αντικείμενο-στόχο προς τους αναμεταδότες του σκάφους προκύπτουν ομοίως με καταγραφή των χρόνων μετάδοσης και λήψης των σημάτων μεταξύ των πομποδεκτών και με γνωστή την ταχύτητα του ήχου στη συγκεκριμένη περιοχή τη χρονική στιγμή των μετρήσεων. Από την άλλη μεριά, οι γωνίες υπολογίζονται από τη διαφορά στο χρόνο λήψης ενός ακουστικού σήματος από τους δέκτες που σχηματίζουν ένα ή περισσότερα επίπεδα στη συνδεσμολογία USBL που βρίσκεται στο σκάφος. Οι διαφορές στο χρόνο λήψης μεταφράζονται σε γωνίες πρόσπτωσης του ακουστικού σήματος προς το επίπεδο (ή τα επίπεδα) που σχηματίζουν οι δέκτες (Εικόνα 2.6).

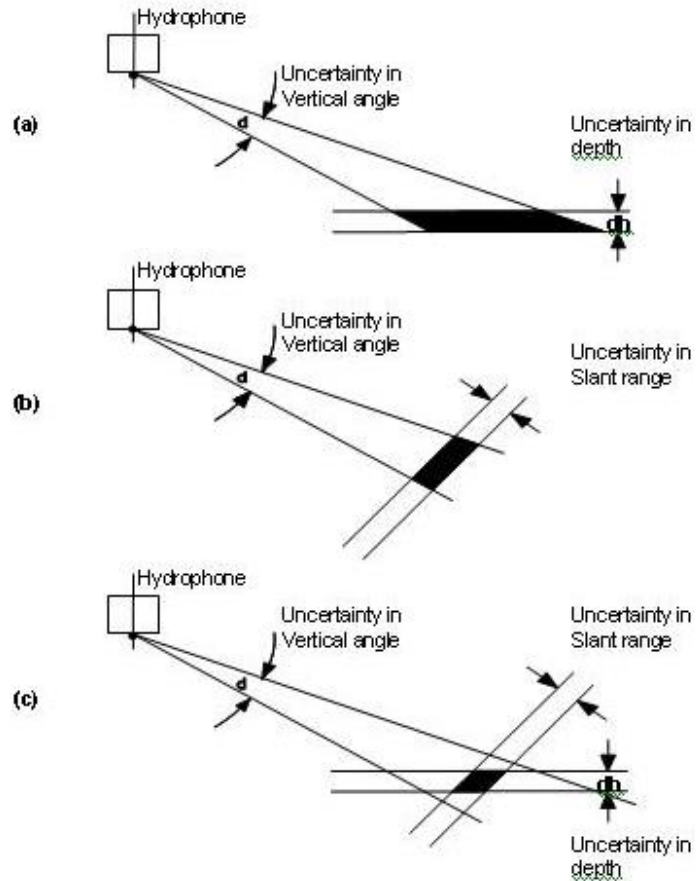


Εικόνα 2.6: Υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης του εκπεμπόμενου σήματος στο διάνυσμα ή στα επίπεδα των αναμεταδοτών της USBL συνδεσμολογίας του σκάφους ([www.qps.nl/qinsy](http://www.qps.nl/qinsy))

Κατά τη μεθοδολογία USBL, ο προσδιορισμός της υποβρύχιας θέσης ενός αντικειμένου είναι δυνατό να υπολογιστεί γεωμετρικά με τρεις τρόπους:

1. Με γνωστό το βάθος του στόχου (μέσω κάποιου αισθητήρα βάθους που είναι προσαρμοσμένος πάνω στον στόχο) και τη γωνία πρόσπτωσης του εκπεμπόμενου από τον στόχο σήματος στο επίπεδο των αναμεταδοτών του σκάφους
2. Με μέτρηση της απόστασης μεταξύ των πομποδεκτών (υποβρύχιου στόχου και σκάφους) με γνωστή την ταχύτητα μετάδοσης του ήχου στο νερό για τη συγκεκριμένη περιοχή το χρονικό διάστημα των μετρήσεων καθώς και της γωνίας πρόσπτωσης του εκπεμπόμενου από τον στόχο σήματος στο επίπεδο των αναμεταδοτών του σκάφους
3. Με συνδυασμό όλων των παραπάνω (μετρήσεις αποστάσεων, γωνιών πρόσπτωσης και βάθους στόχου) που δίνει και την μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορισμού θέσης (Szlachetko et al., 2016).

Στην Εικόνα 2.7 οπτικοποιούνται τα εύρη αξιοπιστίας κατά τους παραπάνω τρόπους προσδιορισμού της υποβρύχιας θέσης ενός αντικειμένου όταν είναι γνωστά: (α) η γωνία πρόσπτωσης και το βάθος του αντικειμένου, (β) η γωνία πρόσπτωσης και η απόσταση από τον αναμεταδότη προς το αντικείμενο-στόχο και (γ) όλα τα παραπάνω. Αναμενόμενα, στην τρίτη κατηγορία είδους και συνδυασμού μετρήσεων, όπου οι παρατηρήσεις είναι οι περισσότερες, το εύρος της αβεβαιότητας μειώνεται σημαντικά.



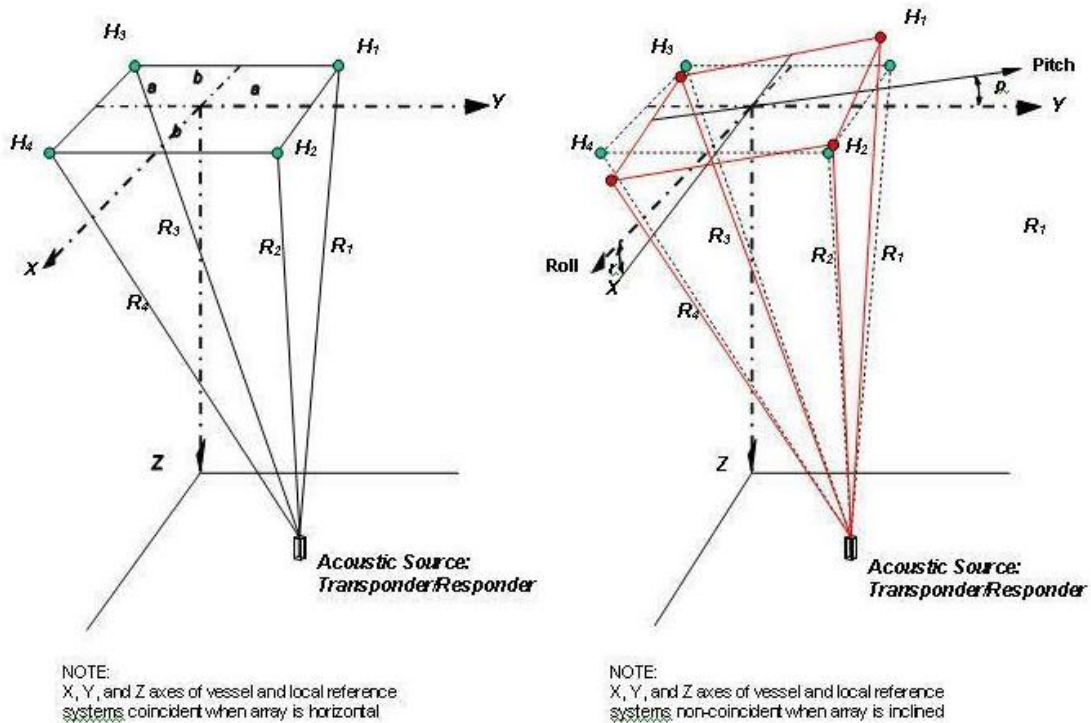
Εικόνα 2.7: Επίπεδα ακρίβειας στον προσδιορισμό θέσης ανά είδος και συνδυασμό μετρήσεων([www.qps.nl/qinsy](http://www.qps.nl/qinsy))

Αν και οι τεχνικές Ultra Short Baseline δεν προσφέρουν τα ίδια επίπεδα ακρίβειας με τις Long Baseline, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες λόγω της ευελιξίας της μεθοδολογίας τους και των μειωμένων λειτουργικών απαιτήσεων. Τα επίπεδα ακρίβειας μιας εφαρμογής USBL εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις αποστάσεων και γωνιών. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι το επιχειρησιακό εύρος ή αλλιώς η οριζόντια απόσταση κατά την οποία κινείται το σκάφος που φέρει το USBL σύστημα των αναμεταδοτών. Όσο περισσότερο απομακρύνεται (σε οριζόντια απόσταση) το σκάφος από τη ζητούμενη θέση του υποβρύχιου αντικειμένου, τόσο αυξάνεται το σφάλμα προσδιορισμού θέσης.

Ένας άλλος παράγοντας είναι η πιθανή ανομοιομορφία της ταχύτητας μετάδοσης του ήχου στην υδάτινη στήλη τόσο οριζοντιογραφικά όσο και βαθυμετρικά. Η διάδοση των σημάτων σε ένα μέσο (εν προκειμένω το νερό) με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης του ήχου προκαλεί διαθλάσεις της πορείας των σημάτων και επομένως σφάλματα στον υπολογισμό της απόστασης και της γωνίας πρόσπτωσης. Με γνώση των ορίων των διαφορετικών προφίλ ταχύτητας του ήχου στην υδάτινη στήλη, είναι δυνατό οι διαθλάσεις των σημάτων να συνεκτιμηθούν γεωμετρικά ώστε να μειωθούν τελικά τα σφάλματα των μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αποστάσεων και γωνιών πρόσπτωσης αφορούν, από την άλλη, ένα σύστημα ακίνητου σκάφους και ένα διάνυσμα αναμεταδοτών που ορίζουν ένα οριζόντιο επίπεδο, κάτι που στην πράξη δεν συμβαίνει ακόμα και όταν ένα σκάφος διαθέτει τεχνολογίες ακινητοποίησής του (Dynamic Positioning - DP). Για τη διόρθωση των σφαλμάτων στροφών

(pitch περί τον X άξονα για το επίπεδο YZ και roll περί τον Y άξονα για το επίπεδο XZ, Εικόνα 2.8) λόγω κίνησης του σκάφους χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά γυροσκόπια ή ηλεκτρονικές στάθμες κατακορύφωσης.



Εικόνα 2.8: Διορθώσεις στροφών λόγω κίνησης του σκάφους ([www.qps.nl/qinsy](http://www.qps.nl/qinsy))

Ένα σύστημα USBL εκπέμπει σε συχνότητες που κυμαίνονται από 5 έως 80 KHz, με ακρίβεια από 3% έως 0.5% της απόστασης του υποβρύχιου στόχου από το σκάφος υποστήριξης και με ρυθμό ενημέρωσης από 1 έως 15'' (0.1 έως 0.067 Hz). Η ονομαστική εμβέλεια που δίνουν οι κατασκευαστές φτάνει έως και τα 10.000 m, με τα περισσότερα αξιόπιστα συστήματα USBL να δουλεύουν ικανοποιητικά έως τα 3.500 m.

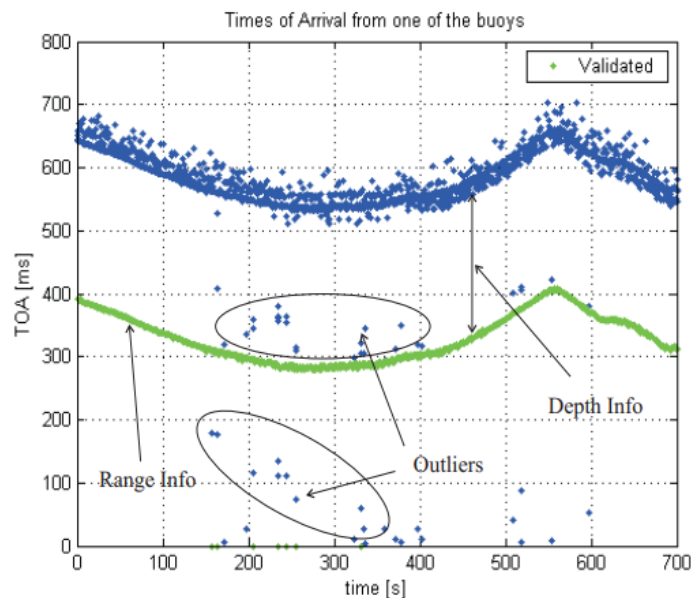
## 2.4 Τεχνικές GPS Intelligent Buoys (GIB)

Η μέθοδος GPS Intelligent Buoys κατατάσσεται στις τεχνικές πλοήγησης και εντοπισμού LBL, με την ιδιαιτερότητα ότι τα βυθισμένα υδρόφωνα είναι προσαρμοσμένα σε πλωτήρες με ενσωματωμένους δέκτες DGPS (Εικόνα 2.9). Μία διάταξη GIB αποτελείται από τουλάχιστον 4 πλωτήρες (σύστημα δέκτη επιφανείας DGPS και βυθισμένου υδροφώνου). Η θέση των πλωτών δεκτών, που λειτουργούν ως rovers, προσδιορίζεται και διορθώνεται από έναν δέκτη GPS, που λειτουργεί ως base και βρίσκεται πάνω σε σκάφος υποστήριξης στην περιοχή.



Εικόνα 2.9: Σύστημα GPS Intelligent Buoys (GIB), (Alcocer et al., 2006)

Κάθε υδρόφωνο λαμβάνει τα ακουστικά σήματα που εκπέμπονται περιοδικά από το υποβρύχιο αντικείμενο-στόχο, του οποίου η θέση είναι η ζητούμενη, και καταγράφει τους χρόνους άφιξης (αναφέρονται ως TOA – Times of Arrival). Ο στόχος μπορεί να είναι δύτης, τηλεκατευθυνόμενο όχημα (ROV), αυτόνομο υποβρύχιο όχημα (AUV) ή οποιαδήποτε άλλη υποβρύχια συσκευή στην οποία έχει εγκατασταθεί συγχρονισμένο σύστημα περιοδικής εκπομπής ακουστικών σημάτων (ringer). Σε κάθε περίοδο εκπέμπονται δύο σήματα, των οποίων η διαφορά χρόνου μετάδοσης είναι ανάλογη του βάθους του στόχου-αντικειμένου (Εικόνα 2.10). Οι χρόνοι άφιξης μεταφράζονται ως αποστάσεις μεταξύ των πλωτών δεκτών-υδροφώνων και του στόχου, με γνωστή την ταχύτητα του ήχου στο νερό (velocity of sound - VOS) τη δεδομένη στιγμή στην περιοχή των μετρήσεων (Alcocer et al., 2006).



Εικόνα 2.10: Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο παλμών ως αναλογία βάθους του αντικειμένου-στόχου (ringer) (Alcocer et al., 2006)

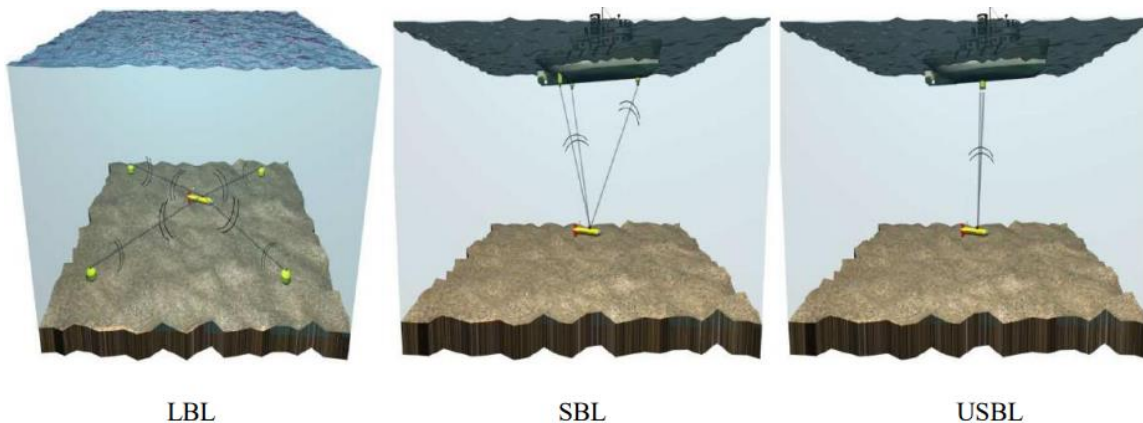
Για την αύξηση της ακρίβειας της μεθόδου GIB προτείνεται ο συγχρονισμός περισσότερων των τεσσάρων δεκτών με ικανοποιητική γεωμετρία και διασπορά στο χώρο εργασιών, για τη λήψη περισσότερων παρατηρήσεων, καθώς και η ακριβέστερη προσέγγιση της τιμής της ταχύτητας του ήχου στο νερό που απλοποιεί σημαντικά την επεξεργασία των εκπεμπόμενων σημάτων.

Η μέθοδος πλοήγησης και υποβρύχιου προσδιορισμού θέσης GIB χρησιμοποιήθηκε ήδη από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα για στρατιωτικούς σκοπούς και συγκεκριμένα για τον ακριβή εντοπισμό της θέσης υποβρύχιων και οπλικών συστημάτων, με υλοποίηση δικτύων αποτελούμενων από έως και λίγες δεκάδες (10-15) “έξυπνων πλωτών αναμεταδοτών” σε μεταξύ τους αποστάσεις έως λίγα km (2-4). Οι χρόνοι άφιξης (TOA) από τον υποβρύχιο στόχο προς κάθε αναμεταδότη, χρησιμοποιούνται κατά την ελαχιστοτετραγωνική επίλυση για τον προσδιορισμό θέσης, δίνοντας ακρίβειες της τάξης λίγων cm.

## 2.5 Σύγκριση μεθόδων

Εξετάζοντας κανείς τις παραπάνω μεθόδους πλοήγησης και προσδιορισμού θέσης ενός αντικειμένου (ROV, AUV, δύτη κ.ά.) κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, μπορεί να θέσει τη μεταξύ τους σύγκριση κυρίως στα επίπεδα της ακρίβειάς τους, της ευελιξίας εφαρμογής τους στο πεδίο, του κόστους τους και του εύρους/έκτασης εφαρμογής τους.

Ως προς τα τελικά επίπεδα ακρίβειας προσδιορισμού θέσης που είναι δυνατό να επιτευχθούν, τα καλύτερα αποτελέσματα δίνει μία μεθοδολογία Long Baseline που είναι ανεξάρτητη του επιχειρησιακού βάθους και αρκετά εύρωστη ως προς τη σταθερότητα του δικτύου αναφοράς και υλοποίησης εμπροσθοτομιών, αγγίζοντας ακρίβειες της τάξης λίγων cm (αναφέρονται και ακρίβειες της τάξης του 0.01 m για πολύ εύρωστα γεωμετρικά δίκτυα). Επόμενη σε επίπεδα ακρίβειας κατατάσσεται η μέθοδος Short Baseline με τις τελικές ακρίβειες της μεθόδου να εξαρτώνται από την υλοποίηση του δικτύου των αναμεταδοτών σε περιπτώσεις που οι αναμεταδότες τοποθετούνται σε σταθερά σημεία κάποιας εγκατάστασης (λιμάνι, πλατφόρμα κ.ά.) ή σε μεγάλα πλωτά μέσα, όπου μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική διασπορά και γεωμετρία των αναμεταδοτών, οι ακρίβειες μπορεί να φτάσουν και λίγα cm, συναγωνίσιμες αυτών μίας μεθόδου Long Baseline. Για περιπτώσεις εφαρμογής τεχνικών SBL σε μικρότερα σκάφη, τα εύρη αβεβαιότητας είναι αναμενόμενο να ανοίγουν. Τέλος, για τις εφαρμογές Ultra Short Baseline τα επίπεδα ακρίβειας εξαρτώνται, λόγω της πολύ μικρής απόστασης μεταξύ των πομποδεκτών που βρίσκονται σε ένα ενιαίο σύστημα πάνω στο σκάφος, από την κίνηση του σκάφους και συγκεκριμένα των στροφών περί τους άξονες X και Y (αν ο Z θεωρείται ο άξονας της βαθυμετρίας), από την ύπαρξη εμποδίων μεταξύ πομπού-δέκτη, το επιχειρησιακό βάθος, τις ανομοιομορφίες της διάδοσης της ταχύτητας του ήχου στην υδάτινη στήλη και την απόσταση στόχου και αναμεταδοτών στο οριζόντιο επίπεδο. Με βαθμονόμηση του συστήματος USBL στην περιοχή εργασιών του καθώς και προσδιορισμό και συνεκτίμηση των παραπάνω παραγόντων επίδρασης, οι ακρίβειες μιας εφαρμογής USBL στον προσδιορισμό θέσης μπορεί να φτάσουν τα 15-20 cm.



Εικόνα 2.11: Γεωμετρία διατάξεων αναμεταδοτών ακουστικών σημάτων στις κατηγορίες Long Baseline, Short Baseline & Ultra Short Baseline (Alcocer et al., 2006)

Ως προς την ευελιξία των μεθόδων, οι SBL και USBL θεωρείται ότι πλεονεκτούν χάρη στο ότι το σύστημα των αναμεταδοτών είναι αρκετά γρήγορο στην εγκατάστασή του, λόγω του ότι υλοποιείται συνήθως πάνω σε κάποιο πλωτό και όχι στον πυθμένα όπως στις τεχνικές Long Baseline. Στις τελευταίες δε, απαιτείται η ίδρυση δικτύου σταθερών σημείων με αρκετά αποστάσεις μεταξύ τους, συνήθως περιμετρικά της περιοχής εργασιών, καθώς και η μέτρηση με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια των σταθερών σημείων όπου τοποθετούνται οι αναμεταδότες, κάτι που επαναλαμβάνεται σε περιπτώσεις απαιτήσεων αλλαγής θέσεων του συστήματος.

Ως προς το εύρος των περιοχών όπου εφαρμόζονται οι μέθοδοι, και οι τρεις είναι δυνατό να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις. Συνδυαστικά όμως με τους παράγοντες της ακρίβειας και της ευελιξίας, οι τεχνικές LBL καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις με πολύ ικανοποιητικές ακρίβειες σε αρκετό χρόνο λόγω της πολυπλοκότητας της μεθόδου, ενώ οι SBL και USBL καλύπτουν εξίσου μεγάλες εκτάσεις, σε πολύ μικρότερο χρόνο, αλλά με μειωμένα επίπεδα ακρίβειας (Christ, 2013).

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Long Baseline</b>	Υψηλή ακρίβεια προσδιορισμού θέσης ανεξάρτητη του βάθους Πλεονάζουσες παρατηρήσεις Μεγάλο εύρος εφαρμογής Μονοί, απλοί στην κατασκευή, αναμεταδότες	Σύνθετα συστήματα που απαιτούν έμπειρους χειριστές Μεγάλες αποστάσεις – βάσεις Χρονοβόρα εγκατάσταση – μετακίνηση συστήματος
<b>Short Baseline</b>	Υψηλή ακρίβεια για σταθερό δίκτυο αναμεταδοτών (λιμάνια, πλατφόρμες ή μεγάλα πλωτά μέσα) Πλεονάζουσες παρατηρήσεις Μικροί, εύχρηστοι αναμεταδότες Μεγάλο εύρος εφαρμογής	Χαμηλή ακρίβεια για σταθερό δίκτυο αναμεταδοτών σε μικρά πλωτά μέσα Σύνθετη εγκατάσταση μεμονωμένων αναμεταδοτών Δυσκολία ικανοποιητικής γεωμετρίας – διασποράς
<b>Ultra Short Baseline</b>	Ευκολία στη χρήση Ταχύτητα Μεγάλο εύρος εφαρμογής Οικονομικότερη μέθοδος	Ασθενής γεωμετρία δικτύου αναμεταδοτών Χαμηλότερη ακρίβεια Σύνθετη συνδεσμολογία αναμεταδοτών Ανάγκη διαρκούς βαθμονόμησης συστήματος για σφάλματα στροφών, ταχύτητας ήχου κ.λπ.

Συγκριτικός πίνακας μεθόδων εντοπισμού & πλοήγησης (Christ et al., 2013)

## 3 | Βαθμονόμηση υποβρύχιων οπτικών συστημάτων

Τα επόμενα κεφάλαια εστιάζουν στη χρήση των οπτικών αισθητήρων που φέρονται από μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα, για τη χαρτογράφηση και τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου. Βασικός αισθητήρας μιας εφαρμογής SfM ή μιας εφαρμογής Visual SLAM είναι η κάμερα: ένα υποβρύχιο όχημα, τηλεκατευθυνόμενο ή αυτόνομο, είναι δυνατό να φέρει μία ή περισσότερες κάμερες για το σκοπό αυτό. Για την επιτυχή εφαρμογή σχετικών αλγορίθμων είναι σημαντικός ο προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου της κάμερας ή του συστήματος καμερών. Στο υποβρύχιο περιβάλλον όπου οι κάμερες περικλείονται σε ειδικές υδατοστεγείς θήκες, με αντοχή σε πίεση βάθους χιλιάδων μέτρων, η εσωτερική γεωμετρία της κάμερας διαφοροποιείται σημαντικά. Επιπτώσεις τόσο στη γεωμετρία της κάμερας όσο και στην ποιότητα της τελικής καταγεγραμμένης εικόνας προκαλούνται υποβρυχίως από πολλές αιτίες, μεταξύ των οποίων η ανάκλαση, η διάθλαση και η ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης, η διάχυση, η απορρόφηση και η σκέδαση του φωτός, η απώλεια των χρωμάτων, οι παραμορφώσεις από τη μη επιπεδότητα της επιφάνειας της θήκης της κάμερας ή ακόμα και η ύπαρξη θερμοκλινών στρωμάτων στην υδάτινη στήλη. Ακολούθως, τα φαινόμενα αυτά αναλύονται υπό το πρίσμα της επίδρασής τους στο σύστημα της κάμερας και της τελικής εικόνας, με έμφαση στο ισχυρότερο, αυτό της διάθλασης και στο πώς αυτό μπορεί να συνεκτιμηθεί, με εφαρμογή αλγορίθμων και μεθοδολογίες βαθμονομήσεων κατά την αποκατάσταση των συμβάσεων του εσωτερικού προσανατολισμού, όπως είναι η συνθήκη συγγραμμικότητας.

### 3.1 Οπτική στο υποβρύχιο περιβάλλον

Όταν η ανακλώμενη ακτίνα διαπερνά τη θήκη της κάμερας για να φτάσει στον αισθητήρα CCD, διαθλάται ήδη δύο φορές: αρχικά κατά τη διάδοση από το νερό στο υλικό της θήκης και έπειτα από τη θήκη στον αέρα μέχρι να φτάσει στον CCD. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι ακτίνες που φτάνουν στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια δεν έχουν κοινή γεωμετρία, αφού αλλάζουν δύο φορές διευθύνσεις. Ωστόσο, ακόμα και πριν από την είσοδό τους στη θήκη της κάμερας, οι ανακλώμενες ακτίνες επηρεάζονται σημαντικά από τις ιδιότητες της διάδοσης του φωτός στο νερό. Το θαλασσινό νερό αποτελείται από καθαρό νερό, αλάτι, οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Μία φωτεινή δέσμη αποτελείται από φωτόνια εντός μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, που όταν αλληλεπιδρούν με τα μόρια και τα σωματίδια του νερού, είτε απορροφώνται από τα δεύτερα (απορρόφηση φωτονίων) είτε αλλάζουν διεύθυνση (σκέδαση και εξασθένηση φωτός). Τέτοιες ιδιότητες της οπτικής μετάδοσης στο υποβρύχιο περιβάλλον, που επιδρούν στην ποιότητα της τελικής εικόνας πέραν της σκέδασης και της απορρόφησης του φωτός, είναι η απώλεια των χρωμάτων ή η μείωση της ευκρίνειας και των λεπτομερειών. Αν και οι ιδιότητες αυτές δεν προκαλούν άμεσα γεωμετρικά προβλήματα στο σύστημα της εικόνας, η ανάλυσή τους είναι κρίσιμη στο στάδιο της επεξεργασίας εικόνας για τη βελτιστοποίηση της ποιότητάς της.

#### Απορρόφηση του φωτός

Με τον όρο απορρόφηση ορίζεται η απώλεια των φωτονίων μιας φωτεινής δέσμης όταν αυτή αλληλεπιδρά με τα μόρια του νερού ή με άλλα σωματίδια: κάποια φωτόνια είναι πιθανό να απορροφώνται από τα μόρια του νερού αυξάνοντας την τοπική θερμοκρασία και κάποια άλλα να απορροφώνται, για παράδειγμα από φυτοπλαγκτόν για φωτοσύνθεση. Εκτός από τον τύπο των



σωματιδίων, η απορρόφηση του φωτός εξαρτάται επίσης από το μήκος κύματος της φωτεινής δέσμης καθώς και από την συγκέντρωση (πυκνότητα) των σωματιδίων στην υδάτινη στήλη. Τα φωτόνια που απορροφώνται μετασχηματίζονται σε θερμική και κινητική ενέργεια. Το ορατό αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η προοδευτική μείωση του φωτός με ταυτόχρονη αύξηση του βάθους, σε σημείο που να διατηρείται μόνο το 20% της αρχικής του ενέργειας όταν φτάσει τα 150 - 200 m βάθος. Οι αριθμοί και τα ποσοστά αυτά αφορούν κυρίως στο ορατό φάσμα, αφού η υπέρυθη ακτινοβολία εξασθενεί ήδη μόλις κάποια cm κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Jordt, 2013). Οι διαφορετικοί παράγοντες που συμβάλλουν στο φαινόμενο της απορρόφησης συνοψίζονται σε μία μεταβλητή, το συντελεστή απορρόφησης  $\alpha(\lambda)$ , ως συνάρτηση του μήκους κύματος  $\lambda$ , που προσδιορίζεται από εξειδικευμένα μετρητικά όργανα και αναλύεται ως εξής:

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_y + \alpha_p + \alpha_s + \alpha_d$$

όπου:

$\alpha_w$  ο συντελεστής απορρόφησης των μορίων του νερού

$\alpha_y$  ο συντελεστής απορρόφησης των διαλυμένων κίτρινων ουσιών (ως yellow substances θεωρούνται οι ουσίες οργανικής προέλευσης, που συνήθως προέρχονται από την αποσύνθεση του φυτοπλαγκτού)

$\alpha_p$  ο συντελεστής απορρόφησης των αιωρούμενων ιζημάτων - σωματιδίων

$\alpha_s$  ο συντελεστής απορρόφησης του θαλασσινού άλατος

$\alpha_d$  ο συντελεστής απορρόφησης λοιπών τεχνητών ουσιών.

### Σκέδαση του φωτός

Η αλληλεπίδραση μιας φωτεινής δέσμης με τα σωματίδια του νερού, πέραν του φαινομένου της απορρόφησης, έχει ως αποτέλεσμα και τη σκέδαση φωτονίων. Κάποια από τα φωτόνια της δέσμης αλλάζουν τη διεύθυνσή τους ως αποτέλεσμα της παρεμβολής των μορίων του νερού και των αιωρούμενων σωματιδίων (άμμος, σκόνη, φυτοπλαγκτόν κ.ά.). Αντίστοιχα με τον συντελεστή απορρόφησης, ο συντελεστής σκέδασης  $\beta$  ορίζεται ως το άθροισμα δύο επιμέρους συντελεστών:

$$\beta = \beta_w + \beta_p + \beta_s + \beta_d$$

όπου:

$\beta_w$  ο συντελεστής σκέδασης των μορίων του νερού

$\beta_p$  ο συντελεστής σκέδασης των αιωρούμενων ιζημάτων - σωματιδίων,

$\beta_s$  ο συντελεστής σκέδασης του θαλασσινού άλατος

$\beta_d$  ο συντελεστής σκέδασης λοιπών τεχνητών ουσιών.

Η τιμή του συντελεστή σκέδασης των μορίων του νερού είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του συντελεστή των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ οι διαλυμένες κίτρινες οργανικές ενώσεις δε συμβάλλουν στη σκέδαση παρά μόνο στην απορρόφηση του φωτός. Τόσο η απορρόφηση όσο και η σκέδαση προκαλούν τη γενικότερη εξασθένηση της φωτεινής δέσμης, με το συντελεστή εξασθένησης  $c$  να αποτελείται από το άθροισμα των συντελεστών απορρόφησης και σκέδασης:

$$c = \alpha + \beta$$

Ο συντελεστής εξασθένησης παρουσιάζει διαφορετικές τιμές σε διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός και μετρείται με οπτικές συσκευές που δημιουργούν μία δέσμη φωτός, μετρώντας την έντασή της μετά από μια διαδρομή μερικών cm μέσα στο νερό. Η φασματική κατανομή του συντελεστή  $c$  στο ορατό φάσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των νερών (καθαρά ωκεάνια, κόλποι, εκβολές ποταμών, παράκτια). Για μια φωτεινή δέσμη, τέλος, που διαδίδεται στο νερό με αρχική ένταση  $I_0$ , η έντασή της  $I$  ελαττώνεται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης  $x$ , σύμφωνα με τον τύπο:

$$I = I_0 e^{-c \cdot x}$$

Πρακτικά, η εξασθένηση της φωτεινής δέσμης προκαλεί στην ποιότητα της υποβρύχιας εικόνας αισθητή μείωση των λεπτομερειών και της αντίθεσης, όσο μεγαλώνει η απόσταση κάμερας - αντικειμένου.

### **Σταδιακή απώλεια των χρωμάτων**

Η ηλιακή ακτινοβολία που διεισδύει κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας υπόκειται σε επιλεκτική απορρόφηση από τα μόρια του νερού σε ορισμένα μήκη κύματος σύμφωνα με τη φασματική κατανομή του συντελεστή εξασθένησης  $c$ . Ορατό φως μεγάλου μήκους κύματος (μπλε, πράσινο) παρουσιάζει μεγαλύτερη διεισδυτικότητα και δεν απορροφάται τόσο γρήγορα όσο το ιώδες και το υπεριώδες που έχουν τα μικρότερα μήκη κύματος. Το κόκκινο απορροφάται στα πρώτα 10 m, το κίτρινο στα 30 - 50 m, το πράσινο στα 100 m ενώ το μπλε φτάνει ως και τα 150 m βάθος περίπου. Από τα 150 m και βαθύτερα που το φως εξασθενεί πλήρως, επικρατεί μαύρο χρώμα, με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η χρήση επιπλέον τεχνητού φωτισμού.

### **Άλλοι παράγοντες επίδρασης στην ποιότητα της υποβρύχιας λήψης**

Πέραν της εξασθένησης της ακτινοβολίας λόγω απορρόφησης, σκέδασης ή βάθους, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα μιας υποβρύχιας λήψης είναι η ύπαρξη θερμοκλινών στρωμάτων, δηλαδή στρωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας ορατής ως στρώμα θολερότητας στο οριζόντιο επίπεδο, χωρίς σταθερές διαστάσεις και σταθερό βάθος, όμοια με τα στρώματα όγκων νερού διαφορετικής πυκνότητας, η ύπαρξη ορατών μικροσωματιδίων που δυσχεραίνουν την εστίαση του φακού, η αντανάκλαση του κυματισμού της επιφάνειας στον πυθμένα ή τα βυθισμένα αντικείμενα, κυρίως για βάθη έως 10 m και για διεύθυνση ηλιακής ακτινοβολίας κάθετη προς τον πυθμένα, καθώς και η ύπαρξη χρωματικής διασποράς στο νερό. Η διακύμανση του δείκτη διάθλασης στο νερό πάνω στο ορατό φάσμα είναι της τάξης του 1.4 % σε αντίθεση με 0.008% που είναι στον αέρα, κάτι που οδηγεί σε χρωματικά αλλοιωμένες ή θολές εικόνες.

## **3.2 Αλγόριθμοι επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας**

Οι ιδιαιτερότητες της οπτικής στο υποβρύχιο περιβάλλον αντικατοπτρίζονται στο τελικό προϊόν μιας υποβρύχιας λήψης, διαμορφώνοντάς την αναλόγως τόσο γεωμετρικά (σε συνδυασμό με τις παραμορφώσεις των φακών) όσο και ραδιομετρικά. Θολές εικόνες, απώλεια χρωμάτων, ορατές αλλαγές ύδατος στην υδάτινη στήλη (ύπαρξη θερμοκλινών στρωμάτων, αναβλυζουσών πηγών ή νερών διαφορετικής πυκνότητας), αντανάκλαση φωτιστικών μέσων στα αιωρούμενα σωματίδια (backscattering), αιωρούμενα σωματίδια υπό μορφή θορύβου στην εικόνα, μη ενιαία ραδιομετρία λόγω αλλαγών στη σύσταση ή το είδος του πυθμένα, μειωμένη αντίθεση ή αντανάκλασεις του κυματισμού της επιφάνειας και σκιές λόγω ηλιακής ακτινοβολίας κυρίως σε μικρότερα βάθη είναι κάποια από τα συχνότερα φαινόμενα αλλοίωσης της ποιότητας της υποβρύχιας εικόνας. Για την επιτυχή εφαρμογή αλγορίθμων τρισδιάστατης ανακατασκευής (SfM, mosaicing, SLAM) είναι συχνά απαραίτητη η προεπεξεργασία των υποβρύχιας λήψεων. Για το σκοπό αυτό και ανεξαρτήτως μέσου (νερού ή αέρα), χρησιμοποιούνται δύο ειδών αλγόριθμοι επεξεργασίας εικόνας: οι αλγόριθμοι αποκατάστασης εικόνας (image restoration) και οι αλγόριθμοι ενίσχυσης ή βελτίωσης εικόνας (image enhancement). Κατά την αποκατάσταση της εικόνας επιχειρείται κυρίως η ανάκτηση της εικόνας όπως αυτή θα λαμβανόταν χωρίς παραμορφώσεις, λόγω αιτιών όπως η ανεπαρκής εστίαση, η κίνηση κατά τη λήψη ή οι συνθήκες του υποβρύχιου περιβάλλοντος που προαναφέρθηκαν. Οι αλγόριθμοι αποκατάστασης εικόνας χρησιμοποιούν κάποιο μοντέλο παραμόρφωσης της αρχικής ιδανικής εικόνας, στο οποίο εισάγονται παράμετροι όπως οι συντελεστές διάθλασης, διάχυσης, απορρόφησης και σκέδασης, το βάθος του αντικειμένου που φωτογραφίζεται, ο θόρυβος των αιωρούμενων σωματιδίων. Από την άλλη μεριά, η έννοια της βελτίωσης ή ενίσχυσης εικόνας σχετίζεται με την οπτικά

προσφορότερη εκδοχή της εικόνας, χωρίς τη μοντελοποίηση παραμέτρων για το σκοπό αυτό, αλλά με ενίσχυση ή διόρθωση χαρακτηριστικών της (όπως η φωτεινότητα, η αντίθεση, ο περιορισμός του θορύβου, ο τονισμός των ακμών κ.ά.), που επηρεάζουν την εμφάνιση της εικόνας ή εμποδίζουν την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας από αυτήν. Οι αλγόριθμοι ενίσχυσης εικόνας είναι γενικά απλούστεροι και ταχύτεροι σε σχέση με τους αλγόριθμους αποκατάστασης. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μία διερεύνηση αλγορίθμων για τη διόρθωση υποβρύχιων εικόνων, βασισμένων τόσο σε βασικές αρχές της οπτικής στο υποβρύχιο περιβάλλον (αλγόριθμοι αποκατάστασης), όσο και σε ευρύτερης χρήσης φίλτρα υποκειμενικών κριτηρίων εμφάνισης της τελικής εικόνας (αλγόριθμοι ενίσχυσης).

### 3.2.1 Αλγόριθμοι αποκατάστασης υποβρύχιας εικόνας

Η γνώση των βασικών αρχών της διάδοσης του φωτός στο νερό, όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω, είναι απαραίτητη για την παραμετροποίηση της διαδικασίας δημιουργίας μιας υποβρύχιας εικόνας. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η γνώση της απόστασης που μπορεί να διανύσει κάθε κανάλι χρώματος, του αντίστοιχου μήκους κύματος, κατά τη διάδοση της φωτεινής δέσμης στο νερό όταν το κόκκινο τμήμα του ορατού φάσματος, για παράδειγμα, απορροφηθεί πλήρως στα πρώτα τρία σχεδόν μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, η ανακατασκευή του κόκκινου χρώματος στην εικόνα δεν είναι πια δυνατή. Στη βιβλιογραφία της Όρασης Υπολογιστών, οι περισσότερες προσεγγίσεις αποκατάστασης της υποβρύχιας εικόνας που βασίζονται σε φυσικά μοντέλα της διάδοσης του φωτός στο νερό, έχουν ως αφετηρία το μοντέλο των Jaffe [Jaffe, 1990] και McGlamery [McGlamery, 1975], το οποίο περιγράφει τη συνολική ακτινοβολία για μια συγκεκριμένη περιοχή που φτάνει στον αισθητήρα της κάμερας ως το άθροισμα τριών γραμμικών συνιστωσών:

$$E_t = E_d + E_f + E_b$$

όπου  $E_t$  η συνολική τελική ακτινοβολία,  $E_d$  η ακτινοβολία όλων των πηγών φωτός όπως αυτή φεύγει από το αντικείμενο και φτάνει στον αισθητήρα της κάμερας (direct component),  $E_f$  η ακτινοβολία που συνεχίζει την πορεία της μετά από την σκέδαση (forwardscatter) και  $E_b$  η ακτινοβολία που σκεδάζεται πλήρως (backscatter). Για αντικείμενα ομοιόμορφων επιφανειών που βρίσκονται σε σχετικά σταθερή απόσταση από την κάμερα, η ακτινοβολία που φτάνει στον αισθητήρα (direct component) εξαρτάται από την κατανομή της φασματικής ισχύος της φωτεινής πηγής  $i(\lambda)$ , από τη φασματική ανακλαστικότητα της επιφάνειας του στόχου  $r(\lambda)$  καθώς και από την απορρόφηση του φωτός που προκαλεί το μέσο διάδοσης  $c(\lambda)$ . Η σχέση έντασης της ακτινοβολίας και απορρόφησης του φωτός περιγράφεται από τον νόμο απορρόφησης των Beer-Lambert (Blasinski, 2016):

$$p_d(\lambda) = r(\lambda) i(\lambda) e^{-d c(\lambda)}$$

όπου  $d$  η απόσταση που διανύει η φωτεινή δέσμη στο μέσο διάδοσης. Ο συντελεστής απορρόφησης  $c$  περιγράφει τη συνολική μείωση της ποσότητας του φωτός που προκαλείται από την απορρόφηση και τη σκέδαση συνδυαστικά, για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$ . Ο νόμος των Beer-Lambert εκφράζεται συνηθέστερα ως

$$E(r) = E(0) e^{-c r}$$

για την περιγραφή της ακτινοβολίας  $E$  στη θέση  $r$ , και μπορεί να αναλυθεί για τους συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης  $a$  και  $b$  ως

$$E(r) = E(0) e^{-a r} e^{-b r}$$

Η συνολική μείωση του φωτός εξαρτάται από δύο παράγοντες, τον συντελεστή απορρόφησης  $a$  και τον συντελεστή σκέδασης  $b$ :

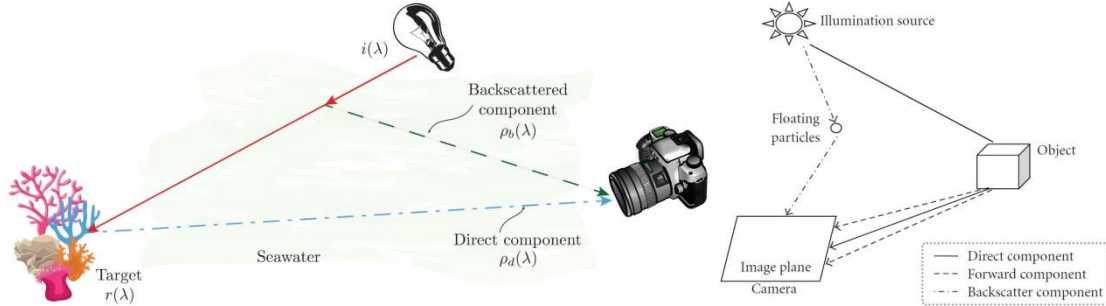
$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$$

Ο συντελεστής σκέδασης  $b$ , που ορίζεται ως η υπέρθεση όλων των μορφών σκέδασης προς όλες τις δυνατές διευθύνσεις ως προς μια συνάρτηση σκέδασης  $\beta$  (αφορά το σύνολο όλων των

ακτίνων φωτός που αποκλίνουν κατά γωνία  $\theta$  από την αρχική διεύθυνση διάδοσης) περιγράφεται ως

$$b = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin\theta d\theta$$

Τυπικοί συντελεστές απορρόφησης  $c$  έχουν προσδιοριστεί ως της τάξης του  $0.05 \text{ m}^{-1}$  για τον ωκεανό,  $0.2 \text{ m}^{-1}$  παράκτια και  $0.33 \text{ m}^{-1}$  για τους κόλπους.



Εικόνα 3.1: Μοντέλο των Jaffe-McGlammery για την μείωση του φωτός υποβρυχίως ως αποτέλεσμα της απορρόφησης και της σκέδασης (Blasinski et al., 2016)

Η δημιουργία του μοντέλου Jaffe - McGlammery προέκυψε ως ανάγκη παραμετροποίησης των βασικών αρχών της Φυσικής που περιγράφουν τη διάδοση του φωτός στο νερό. Οι αλγόριθμοι αποκατάστασης εικόνας που έχουν αναπτυχθεί έχουν ως αφετηρία το μοντέλο Jaffe - McGlammery και λόγω της μαθηματικής μοντελοποίησης του προβλήματος της διάδοσης του φωτός στο νερό, θεωρούνται αρκετά ακριβείς ως προς τα αποτελέσματά τους. Ωστόσο, όση ακρίβεια μπορεί να προσφέρει μια μαθηματική προσέγγιση, άλλο τόσο δύσκολος είναι ο προσδιορισμός ή η βαθμονόμηση των επιμέρους συντελεστών λόγω της ιδιαίτερης φύσης του υποβρυχίου περιβάλλοντος. Από την άλλη μεριά, οι αλγόριθμοι βελτίωσης και ενίσχυσης εικόνας, δεν στηρίζονται σε μετρήσιμες παραμέτρους αλλά σε ποιοτικά οπτικά χαρακτηριστικά, των οποίων η επιλογή πραγματοποιείται με τεχνικές "trial & error". Οι Jordt (Jordt, 2013) και Schettini - Cochs (Schettini, 2010) επιχειρούν την καταγραφή αλγορίθμων επεξεργασίας της υποβρυχίας εικόνας, ταξινομώντας τους στις κατηγορίες της ενίσχυσης και αποκατάστασης.

Η πλειοψηφία των αλγορίθμων αποκατάστασης υποβρυχίας εικόνας θεωρεί τη διάδοση της φωτεινής δέσμης στο νερό ως ένα γραμμικό πρόβλημα. Στόχος είναι ο προσδιορισμός μιας εκτιμώμενης εικόνας  $\hat{f}(x, y)$ , μέσω της ανάκτησης της αρχικής εικόνας  $f(x, y)$  από την δεδομένη υποβαθμισμένη εικόνα  $g(x, y)$  μέσω της χρήσης μιας γραμμικής, χωρικά αναλλοίωτης, συνάρτησης  $h(x, y)$ , που συχνά αναφέρεται και ως συνάρτηση διασποράς σημείου (PSF - Point Spread Function), όπως και της γνώσης στατιστικών χαρακτηριστικών θορύβου  $n(x, y)$ , όπως η μέση τιμή ή η διασπορά:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y)$$

όπου με  $*$  δηλώνεται η συνέλιξη. Η συνέλιξη των συναρτήσεων  $f(x, y)$  και  $h(x, y)$  δηλώνει τη θολότητα της εικόνας. Στο χώρο των συχνότητων η σχέση αυτή παίρνει τη μορφή

$$G(u, v) = F(u, v) H(u, v) + N(u, v)$$

όπου  $(u, v)$  οι χωρικές συχνότητες και  $G, F, H, N$  οι μεταβλητές  $g, f, h$  και  $n$ , αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από τους Μετασχηματισμούς Fourier. Ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης  $H(u, v)$  συχνά αναφέρεται ως συνάρτηση οπτικής μεταφοράς (Optical Transfer Function). Όσο ακριβέστερα εκτιμηθεί η συνάρτηση αλλοίωσης της εικόνας  $H(u, v)$  τόσο καλύτερα αποτελέσματα θα έχει η τελική αποκατάσταση της εικόνας. Στην επεξεργασία εικόνας, λόγω του ότι η διαδικασία υποβάθμισης περιγράφεται μέσω μιας συνελκτικής διαδικασίας, η αποκατάσταση εικόνας συχνά ονομάζεται και αποσυνέλιξη. Πρακτικά, ο ακριβής προσδιορισμός

της συνάρτησης υποβάθμισης (PSF) δεν είναι εύκολη υπόθεση για τις συνθήκες του υποβρύχιου περιβάλλοντος· η θολερότητα, τα αιωρούμενα σωματίδια και οι οπτικές ιδιότητες της διάδοσης του φωτός στο νερό αποτελούν τις βασικές παραμέτρους που ενσωματώνονται στη συνάρτηση, ενώ η παρουσία θορύβου, δεδομένου ότι τις περισσότερες φορές προέρχεται από πολλαπλές πηγές, περιπλέκει την εφαρμογή των αλγορίθμων αποκατάστασης. Για την εκτίμηση του θορύβου κατά την αποκατάσταση, διερευνώνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του θορύβου, μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF – Probability Density Function), ενώ μεταξύ των επικρατέστερων μοντελοποιήσεων θορύβου είναι οι θόρυβοι Gauss, Salt & Pepper, Rayleigh, gamma και ο ομοιόμορφος.

Οι Liu et al. (2001), υπολόγισαν τη συνάρτηση PSF  $H(u, v)$ , με χρήση παραμετρικών φίλτρων ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος Wiener, σε θολές υποβρύχιες λήψεις, που πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά, σε δεξαμενή. Η πειραματική διάταξη των λήψεων, αφορούσε σε εικόνες μιας σχισμής πλάτους ενός mm, φωτισμένης από μία πρόσθετη πηγή φωτός σε δεξαμενή. Οι εικόνες της σχισμής λήφθηκαν αρχικά σε κατάσταση εκτός νερού (αέρα) ως καταγραφή της πραγματικότητας και έπειτα στο νερό, αποτυπώνοντας τη σχισμή σε τρία διαφορετικά μήκη (ενός, δύο και τριών mm). Μέσω μίας διαδικασίας αποσυνέλιξης, με χρήση φίλτρων Wiener, υπολόγισαν τη συνάρτηση υποβάθμισης  $h(u, v)$ , με ελαχιστοποίηση του στατιστικού σφάλματος μεταξύ πραγματικής εικόνας της σχισμής και των ληφθεισών θολών υποβρύχιων εικόνων.

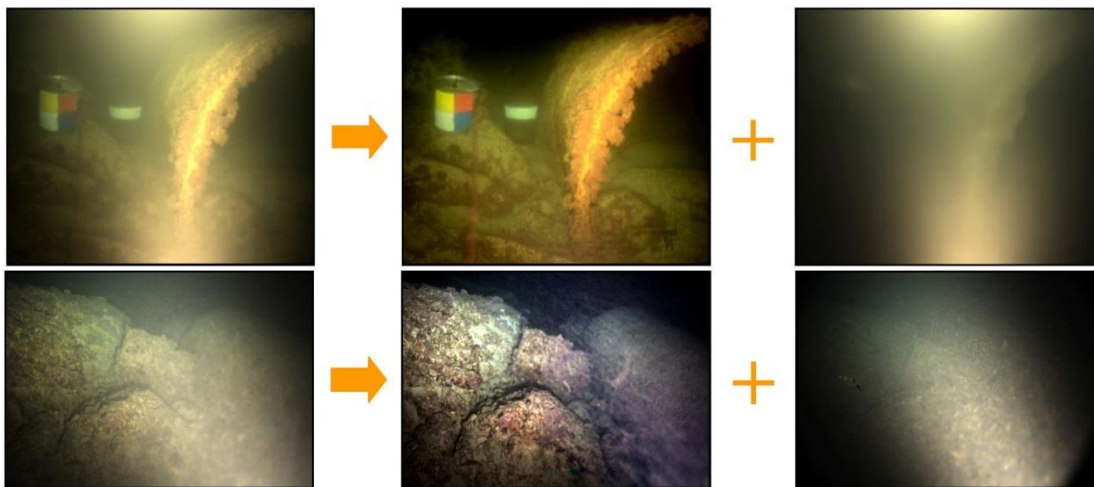
Οι Schechner & Karpel (2005) με αφετηρία το μοντέλο Jaffe – McGlammery και σε συνθήκες φυσικού υποβρύχιου φωτισμού, ανέπτυξαν μία μέθοδο για την αντιμετώπιση της αλλοίωσης της εικόνας και της ενίσχυσης της αντίθεσής της με χρήση ενός πολωτικού φίλτρου σε υποβρύχιες εικόνες. Η μέθοδός τους εκμεταλλεύεται τον φυσικό φωτισμό και τους νόμους της σκέδασης του φωτός υποβρυχίως, με την υπόθεση ότι η ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει αρχικά κάθετα στην επιφάνεια της θάλασσας, κατά τη βύθισή της, πολώνεται μερικώς οριζοντίως. Ισχυρίζονται ότι η βασική αιτία αλλοίωσης της αντίθεσης της ληφθείσας υποβρύχιας εικόνας δεν είναι η θολερότητα του νερού, αλλά το φυσικό φως όπως αυτό σκεδάζεται και πολώνεται (αναφέρεται συχνά ως veiling light). Ο αλγόριθμος αποκατάστασης που προτείνουν, εφαρμόζεται σε ζεύγη υποβρύχιων εικόνων που λαμβάνονται, με ταυτόχρονη χρήση ενός πολωτικού φίλτρου (ιδιοκατασκευή της ερευνητικής ομάδας με το όνομα Aqua-Polaricam), υπό διαφορετικές γωνίες και αποστάσεις, υπολογίζοντας τους χάρτες βάθους κάθε εικόνας. Από τους χάρτες βάθους στη συνέχεια, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων τόσο για τον συντελεστή εξασθένησης του φωτός  $c$ , όσο και για το εύρος βελτίωσης της αντίθεσης και ορατότητας σε μία υποβρύχια εικόνα, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου. Επίσης, παράλληλα ανέπτυξαν αλγόριθμο για την αντιστάθμιση της έντονης μπλε απόχρωσης. Οι πειραματικές δοκιμές που



Εικόνα 3.2: Αποκατάσταση εικόνας μετά από εφαρμογή του αλγορίθμου των Schechner & Karpel. Ερυθρά Θάλασσα, βάθος 26 m (Schechner et al.,

πραγματοποιήθηκαν σε υποθαλάσσιο περιβάλλον, σε βάθος 26 μέτρων, απέδωσαν αποτελέσματα διόρθωσης της χρωματικής παλέτας και αποκατάστασης της αντίθεσης της εικόνας σε διπλάσια σχεδόν κλίμακα της ορατότητας υποβρυχίως (Εικόνα 3.2).

Ομοίως, οι Treibitz & Schechner (2009), στηριζόμενοι στο φαινόμενο της σκέδασης και της οριζόντιας πόλωσης του φωτός υποβρυχίως, μελέτησαν τη δημιουργία της υποβρύχιας εικόνας με χρήση τεχνητού, αυτή τη φορά, φωτισμού, παράγοντας μία νέα εικόνα από την οποία αφαίρεσαν επιτυχώς το φαινόμενο του backscattering (Εικόνα 3.3). Εκτός από τα αποτελέσματα της αποκατάστασης της εικόνας, προέκυψε τρισδιάστατη χωρική πληροφορία για την απεικονιζόμενη περιοχή, με τη δημιουργία χαρτών βάθους για κάθε εικόνα. Όμοια με τα πειράματα της προηγούμενης εφαρμογής αποκατάστασης εικόνας, χρησιμοποιήθηκε ζεύγος εικόνων, ληφθεισών από διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες πολωτικού φωτισμού, με χρήση ενός συστήματος κάμερας - πολωτή - πηγής τεχνητού φωτός. Ο αλγόριθμος που προτείνουν επιτρέπει τη μερική πόλωση τόσο της πραγματικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του αντικειμένου όσο και του αποτελέσματος της σκέδασης (backscattering), αποδεικνύοντας ότι το backscattering και η εξασθένηση του τεχνητού φωτισμού μπορούν να εκφραστούν μέσω απλουστευμένων παραμέτρων. Για την ενσωμάτωση της πόλωσης και του backscatter στον αλγόριθμο, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες σε υποβρύχια περιβάλλοντα διαφορετικών συνθηκών (από τροπικά νερά έως λίμνες μηδενικής ορατότητας). Η μέθοδος έχει περιορισμένο εύρος εξαιτίας του θορύβου της εικόνας και της ταχείας εξασθένησης του τεχνητού φωτός.

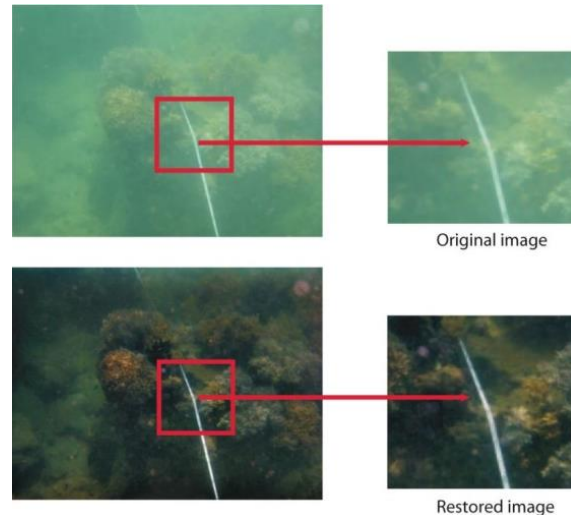


Εικόνα 3.3: Αποτελέσματα δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον. Αριστερά η αρχική εικόνα, στο κέντρο η εικόνα μετά από την αφαίρεση του backscatter, δεξιά το εκτιμώμενο backscatter (Treibitz & Schechner, 2009)

Οι Trucco & Olmos (2006), απλοποιώντας το μοντέλο Jaffe - McGlammery, σχεδίασαν ένα φίλτρο αποκατάστασης υποβρύχιας εικόνας που χαρακτηρίζονται από έντονη παρουσία διάχυτου φωτός και όχι τόσο έντονο (ή εμφανές) φαινόμενο backscattering. Αφαιρώντας τον συντελεστή  $E_b$  (backscatter) από το μοντέλο Jaffe - McGlammery, θεωρώντας τον ελάχιστο σημασίας στις περισσότερες περιπτώσεις και κρατώντας μόνο τον συντελεστή σκέδασης  $E_f$  (forwardscatter, ήτοι την ακτινοβολία που συνεχίζει την πορεία της και μετά από τη σκέδαση), εισάγουν στο απλοποιημένο μοντέλο μία σταθερά βάρους  $K$  (με εύρος τιμών από 0.9 έως 0.2), για το forward scattering, ώστε να καθιστά το φίλτρο προσαρμόσιμο για κάθε εικόνα και υπό διαφορετικές συνθήκες:

$$K \approx [e^{-GR_c} - e^{-cR_c}] \quad \text{και} \quad G(f, R_c, c, K) \approx K \exp(-cR_c w)$$

όπου  $R_c$  το βάθος της λήψης,  $c$  η σταθερά εξασθένησης (attenuation coefficient) και  $w$  η ακτινική συχνότητα (radial frequency). Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε υποβρύχιες εικόνες (κυρίως από βίντεο) έως 20 m βάθος (Εικόνα 3.4), ενώ η αξιολόγησή του πραγματοποιήθηκε ποιοτικά με οπτικό έλεγχο και ποσοτικά με χρήση του κατά την προεπεξεργασία εικόνων, πριν αυτές περάσουν από φίλτρα ταξινόμησης και ανίχνευσης ακμών ή και εξωγενών (κυρίως ανθρωπογενών) αντικειμένων στο υποβρύχιο περιβάλλον. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αλγόριθμοι ταξινόμησης και ανίχνευσης ακμών και αντικειμένων ήταν σημαντικά πιο επιτυχημένοι μετά από την προεπεξεργασία των εικόνων με χρήση του φίλτρου των Trucco & Olmos (2006).

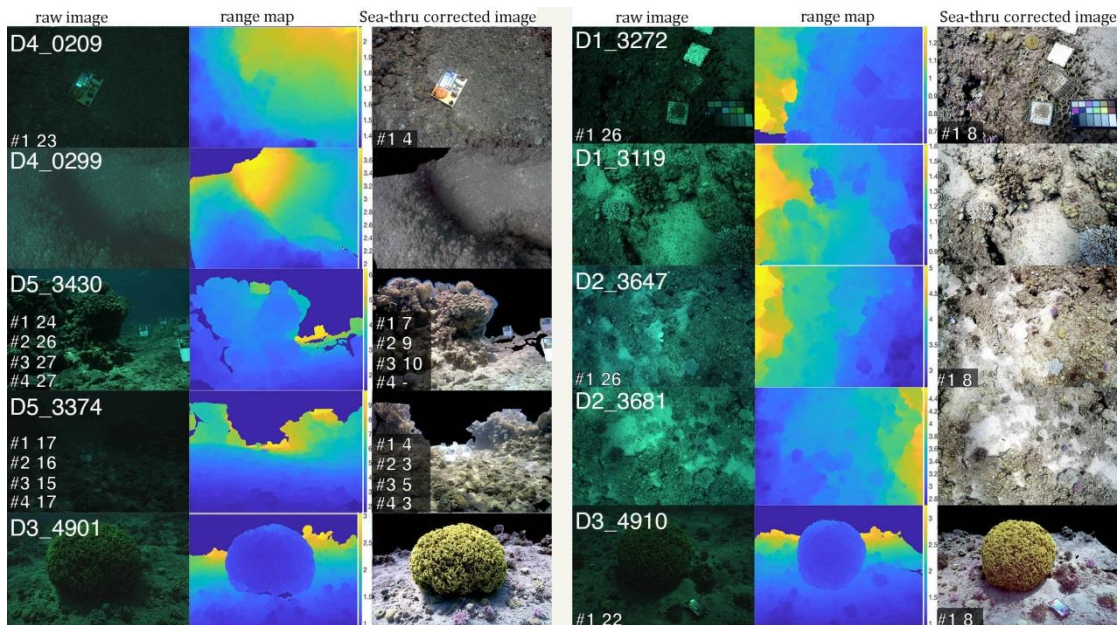


Εικόνα 3.4: Αποτελέσματα αλγορίθμου των Trucco & Olmos (Trucco & Olmos, 2006)

Οι Hou et al. (2008) υπέθεσαν ότι για την θολότητα στις υποβρύχιες εικόνες ευθύνεται η έντονη σκέδαση του φωτός που προκαλείται από το ίδιο το νερό και τα συστατικά που αυτό περιέχει, όπως τα κάθε είδους αιωρούμενα σωματίδια. Με αφετηρία τη γνωστή γραμμική, χωρικά αναλλοίωτη, συνάρτηση PSF, ενσωμάτωσαν στη μεθοδολογία τους χαρακτηριστικές μετρήσεις των οπτικών ιδιοτήτων του νερού, όπως είναι οι συντελεστές απορρόφησης και εξασθένησης και η κατ' όγκον χωρική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων. Η συνάρτηση PSF μοντελοποιήθηκε συγκεκριμένα για το νερό ( $H_{\text{medium}}$ ) και στο σχεδιασμό της περιελήφθη η συνάρτηση που περιγράφει την ποσότητα φωτός που σκεδάζεται υπό γωνία  $\theta$  (Wells, 1973). Η απαλοιφή θορύβου και αποκατάσταση τελικά της αρχικής εικόνας ήταν δυνατή μέσω του προσδιορισμού της συνάρτησης PSF, ενώ τα επίπεδα αξιοπιστίας της μεθόδου ήταν άμεσα συνδεδεμένα με την ακρίβεια προσδιορισμού των μετρημένων οπτικών ιδιοτήτων του νερού.

Οι Akkaynak & Treibitz (2019), από τη μεριά τους, θεωρούν πως το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο σχηματισμού υποβρύχιας εικόνας δεν είναι επαρκές για να θεωρηθεί αξιόπιστο για τη διαδικασία αποκατάστασης εικόνας, για το λόγο ότι ο συντελεστής εξασθένησης, αφενός, δεν μπορεί να είναι ομοιόμορφος σε ολόκληρη την περιοχή που καλύπτει η εικόνα και, αφετέρου, δεν σχετίζεται πρακτικά με τη σχέση απόστασης-συντελεστή σκέδασης (αφορά κυρίως στο φαινόμενο backscatter). Το νέο μοντέλο που προτείνουν διατηρεί τη βασική δομή του αρχικού, ότι δηλαδή η συνολική ακτινοβολία του αντικειμένου που καταγράφεται στην εικόνα ισούται με το άθροισμα της ακτινοβολίας που συνεχίζει ως τον αισθητήρα, μετά από την απορρόφηση και τη σκέδαση, και της συνολικής ακτινοβολίας που σκεδάζεται, αλλά οι επιμέρους συνιστώσες του μοντέλου μελετώνται με κριτήριο την ανομοιομορφία των οπτικών ιδιοτήτων του νερού βάσει πολλών παραγόντων, κυριότερος των οποίων είναι η απόσταση του αντικειμένου από τον

αισθητήρα της κάμερας. Απορρίπτουν προηγούμενες μεθοδολογίες υπολογισμού του συντελεστή εξασθένησης του φωτός μέσω μετρήσεων από όργανα όπως φασματόμετρα ή τρανσμισιόμετρα (όργανα μέτρησης του συντελεστή εξασθένησης ενός σήματος ενώ αυτό μεταδίδεται σε κάποιο μέσο) και προτείνουν τον υπολογισμό των συντελεστών εξασθένησης, απορρόφησης και σκέδασης, απευθείας από τις υποβρύχιες λήψεις. Η μέθοδος των Akkaynak & Treibitz (2019), με την ονομασία Sea-thru, χρησιμοποιεί εικόνες RGBD, με κατάλληλη διαδικασία λήψεων υποβρυχίως και αντίστοιχη δημιουργία χαρτών βάθους για κάθε εικόνα (συνήθως μέσω μεθόδων SfM), απ' όπου αντλεί την πληροφορία της απόστασης για την εκτίμηση του backscatter. Η φιλοσοφία είναι όμοια με εκείνη της μεθόδου DCP (Dark Channel Prior) για την εκτίμηση των "dark pixels", των περιοχών δηλαδή όπου η ακτινοβολία  $E_d$  (direct signal) ελαχιστοποιείται, για την αποκατάσταση θολών εικόνων (He et al., 2010), με τη διαφορά ότι στη νέα μέθοδο απαιτείται παράλληλη γνώση της απόστασης κάθε τέτοιας ομάδας pixel, όπως αυτή προκύπτει από τον χάρτη βάθους. Με το πέρας της εκτίμησης του backscatter δημιουργείται ένας χάρτης φωτεινότητας για κάθε εικόνα, με βάση έναν αλγόριθμο LSAC (Local Space Average Color), ώστε μετά από συσχέτιση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και απόστασης του αντικειμένου από την κάμερα να υπολογιστεί ο συντελεστής εξασθένησης για κάθε περιοχή της εικόνας. Με εφαρμογή της μεθόδου σε datasets άνω των 1.000 εικόνων σε διαφορετικές συνθήκες υποθαλάσσιου περιβάλλοντος (Εικόνα 3.5), οι συγγραφείς επιχειρούν μία τεκμηριωμένη προσέγγιση αποκατάστασης υποβρυχίας εικόνας, αποδεικνύοντας την ανάγκη για μη ομοιόμορφη παραμετροποίηση της εικόνας και του περιβάλλοντος λήψης της, καθώς και την εξάρτηση των συντελεστών εξασθένησης, απορρόφησης και σκέδασης από παράγοντες όπως η χωρική ανάλυση της ακτινοβολίας του αντικειμένου και η απόσταση του τελευταίου από το σημείο λήψης.



Εικόνα 3.5: Αποτελέσματα μεθόδου των Akkaynak & Treibitz (2019). Αριστερά η αρχική εικόνα, στο κέντρο ο χάρτης βάθους και δεξιά η αποκατεστημένη εικόνα.

Οι Yang et al. (2019) συγκεντρώνουν αλγορίθμους και μεθόδους αποκατάστασης υποβρυχίων εικόνων κατατάσσοντάς τους σε τέσσερις βασικές κατηγορίες με βάση το μοντέλο υποβάθμισης εικόνας που υιοθετούν: (1) με βάση τη συνάρτηση PSF, (2) με βάση το μοντέλο Jaffe - McGlammery, (3) με προσομοίωση της ατμοσφαιρικής τύρβης (atmospheric turbulence



degradation) για την περιγραφή του φαινομένου της διάθλασης της φωτεινής δέσμης στο νερό και (4) με βάση τις μεθόδους DCP (Dark Channel Prior).

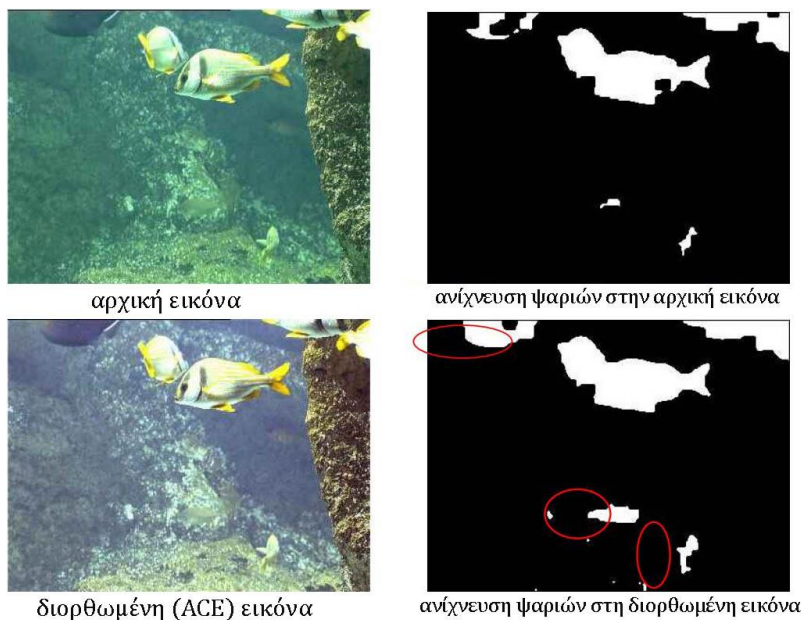
Οι Carlevaris-Bianco et al. (2010) εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της εξασθένησης του φωτός ως ανάλογης της απόστασης, για να υπολογίσουν τις μέγιστες διαφορές απορρόφησης μεταξύ των καναλιών RGB και από αυτές τον χάρτη βάθους της εικόνας. Τα κόκκινα χρώματα της εικόνας αντιστοιχούν στα κοντινότερα στην κάμερα σημεία, ενώ τα πράσινα - μπλε στα πιο απομακρυσμένα. Στη συνέχεια, η πληροφορία του βάθους χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση της θολότητας της εικόνας, με εκτίμηση της πραγματικής ακτινοβολίας του αντικειμένου μέσω ενός μοντέλου MRF (Markov Random Field) που υπολογίζεται από έναν εκτιμητή Maximum A Posteriori (MAP). Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ελέγχθηκε μέσω εφαρμογών τόσο σε τυχαίες υποβρύχιες εικόνες όσο και σε δεδομένα με γνωστά τα αληθή χρώματα και τον χάρτη βάθους.

Οι Galdran et al. (2015), τέλος, εισήγαγαν τη μέθοδο Red Channel Prior, ως παραλλαγή της μεθόδου DCP, κατά την οποία χρώματα που αντιστοιχούν σε μικρότερα μήκη κύματος, όπως το μπλε και το πράσινο, ενώ αντιστοιχούν και στα πιο απομακρυσμένα αντικείμενα με εξασθενημένη εκπεμπόμενη ακτινοβολία, είναι δυνατό να ανακτώνται στη νέα εικόνα, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της αντίθεσης θολών υποβρύχιων εικόνων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε υποβρύχιες εικόνες με φυσικό αλλά και με τεχνητό φωτισμό, με τη δεύτερη κατηγορία να δίνει παραπλανητικά αποτελέσματα λόγω της ανομοιομορφίας της ακτινοβολίας του αντικειμένου.

### 3.2.2 Αλγόριθμοι ενίσχυσης υποβρύχιας εικόνας

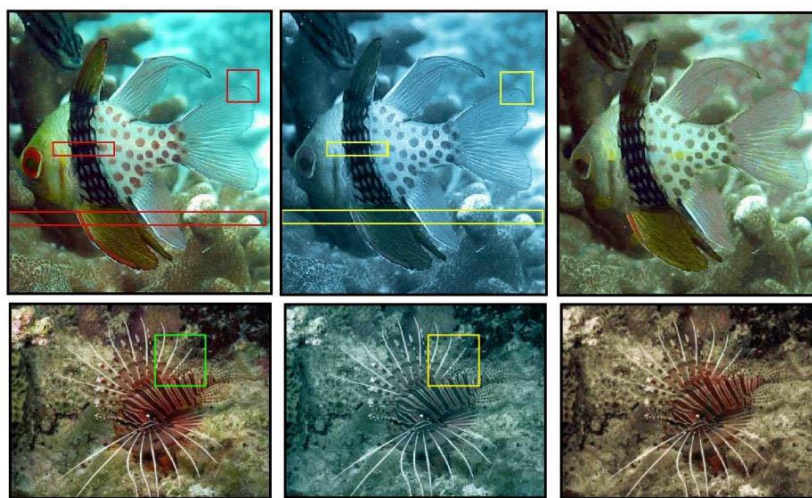
Σε αντίθεση με τις μεθόδους αποκατάστασης εικόνας, οι αλγόριθμοι ενίσχυσης δεν προϋποθέτουν την ανάλυση της διαδικασίας σχηματισμού μιας υποβρύχιας εικόνας ή τη γνώση των συνθηκών μετάδοσης του φωτός υποβρυχίως, όπως για παράδειγμα τους συντελεστές απορρόφησης, εξασθένησης και σκέδασης. Με περισσότερο ποιοτικά υποκειμενικά κριτήρια ως προς το εμφανές αποτέλεσμα μιας υποβρύχιας εικόνας, οι μέθοδοι ενίσχυσης (ή βελτίωσης) επικεντρώνονται σε τεχνικές επεξεργασίας, όπως η απαλοιφή του θορύβου, η ενίσχυση της αντίθεσης, η ενίσχυση ακμών και ο ψευδοχρωματισμός. Οι αλγόριθμοι ενίσχυσης είναι συνήθως απλούστεροι και ταχύτεροι σε σχέση με τους αλγορίθμους αποκατάστασης εικόνας.

Οι Chambah et al. (2003), στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος *Aqu@thèque*, χρησιμοποίησαν το μοντέλο αυτόματης ισοστάθμισης χρωμάτων ACE (Automatic Color Equalization), έναν αλγόριθμο μη επιβλεπόμενης ενίσχυσης, που αναπτύχθηκε από τους Rizzi et al. (2003) και προσομοιάζει ορισμένους μηχανισμούς της ανθρώπινης όρασης, όπως η σταθερότητα του ανθρώπινου ματιού στην αντίληψη της εικόνας, ανεξαρτήτως μεταβολών στην ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ή των χρωμάτων. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε ξεχωριστά σε κάθε χρωματικό κανάλι RGB, των οποίων τα τελικά ιστογράμματα διαμορφώθηκαν έτσι ώστε η τελική βελτιωμένη εικόνα να αυξάνει την ακρίβεια των διαδικασιών κατάτμησης εικόνας και αναγνώρισης προτύπων στο υποβρύχιο περιβάλλον. Εν προκειμένω, η μέθοδος εφαρμόστηκε σε δεδομένα βίντεο από κάμερα ενυδρείου για την αναγνώριση και ταξινόμηση ειδών ψαριών (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου ACE κατά την ενίσχυση εικόνας και την αναγνώριση-ταξινόμηση προτύπων (ψαριών) στο υποβρύχιο περιβάλλον (Chambah et al., 2003)

Οι Torres-Méndez & Dudek (2005) αντιμετωπίζουν τη χρωματική διόρθωση μιας υποβρύχιας λήψης με χρήση περιορισμών, στατιστικών τελεστών και μοντελοποίηση μιας εικόνας ως δειγματοληπτικής συνάρτησης μιας στοχαστικής διαδικασίας MRF (Markov Random Field). Η διόρθωση του χρώματος επιτυγχάνεται διά της απόδοσης χρώματος σε κάθε pixel της εικόνας που περιγράφει πιστότερα τον περιβάλλοντα χώρο με παράλληλη χρήση εικόνων εκπαίδευσης. Το μοντέλο MRF αντλεί τμήματα πολλαπλών κλιμάκων που αντιπροσωπεύουν όλο το εύρος της χρωματικής παλέτας της κάθε εικόνας, από τις υποβαθμισμένες (αρχικές) αλλά και τις διορθωμένες χρωματικά εικόνες, για να εκπαιδεύσει έναν πιθανολογικό αλγόριθμο, ο οποίος βελτιώνει το χρώμα της εικόνας ώστε να είναι το “αληθέστερο” δυνατό. Η μέθοδος παρουσιάστηκε με εφαρμογή σε υποβρύχιας εικόνες από το Διαδίκτυο (Εικόνα 3.7) και σε δεδομένα βίντεο από το τηλεκατευθυνόμενο υποβρύχιο όχημα της ερευνητικής ομάδας.



Εικόνα 3.7: Αποτελέσματα μεθόδου Torres-Méndez & Dudek. Αριστερά η αληθής εικόνα (εικόνα εκπαίδευσης), στο κέντρο η αρχική εικόνα και δεξιά η διορθωμένη εικόνα. Τα τετράγωνα απεικονίζουν τις περιοχές εκπαίδευσης του αλγορίθμου (Torres-Méndez & Dudek, 2005).

Οι Iqbal et al. (2012) προσέγγισαν την ενίσχυση υποβρύχιων εικόνων βάσει τεχνικών μεταφοράς (ή ολίσθησης) και επέκτασης ιστογραμμάτων (slide stretching) με σκοπό την βελτίωση της φωτεινότητας και την αύξηση της αντίθεσης της εικόνας, αντίστοιχα. Η μέθοδος αποτελείται από δύο φάσεις: κατά την πρώτη φάση εφαρμόζεται επέκταση του ιστογράμματος κάθε καναλιού στο χρωματικό μοντέλο RGB για την εξισορρόπηση της χρωματικής αντίθεσης της εικόνας, ενώ κατά τη δεύτερη φάση εφαρμόζεται επέκταση των ιστογραμμάτων του κορεσμού (saturation) και της έντασης (intensity) στο χρωματικό μοντέλο HSI, με σκοπό τη διόρθωση της φωτεινότητας και την ενίσχυση των αληθινών χρωμάτων της εικόνας. Το μπλε χρώμα στην εικόνα ελέγχεται κατά τη δεύτερη φάση (διόρθωση κορεσμού και έντασης), ώστε να καταλαμβάνει εύρος από γαλάζιο έως βαθύ μπλε, ενώ με αυξομείωση της τιμής της έντασής του επιτυγχάνεται η επιθυμητή ένταση της εικόνας.

Οι Ancuti et al. (2012) πρότειναν μέθοδο ενίσχυσης υποβρύχιων εικόνων που βασίζεται στη συγχώνευση εικόνων διαφορετικών οπτικών αποτελεσμάτων για τη δημιουργία μιας τελικής εικόνας. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στο ότι η τελική εικόνα είναι δυνατό να παραχθεί από μία μοναδική αρχική εικόνα, η οποία τίθεται υπό επεξεργασία ενίσχυσης σε δύο στάδια: αφενός για τη διόρθωση της ισορροπίας λευκού (white balancing) και αφετέρου για την ενίσχυση της αντίθεσης της εικόνας με εφαρμογή της συνάρτησης CLAHE. Οι δύο εκδοχές της αρχικής εικόνας συγχωνεύτηκαν σε μία τελική, στην οποία εφαρμόστηκε ισοστάθμιση ιστογράμματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν ότι η μέθοδος ενδείκνυται για τη βελτίωση της έκθεσης των σκοτεινών περιοχών της εικόνας, ενισχύει τη συνολική αντίθεση και διευκολύνει την ανίχνευση λεπτομερειών και ακμών, ενώ βελτιώνει σημαντικά την εφαρμογή αλγορίθμων συνταύτισης, κατάτμησης και μείωσης του θορύβου (denoising) των εικόνων.

Οι Hitam et al. (2013) χρησιμοποίησαν την περιορισμένη κατά αντίθεση προσαρμοστική ισοστάθμιση ιστογράμματος, γνωστή και ως τεχνική CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), ειδικά διαμορφωμένη για υποβρύχιες εικόνες. Ο αλγόριθμος CLAHE διαιρεί την εικόνα σε υποπεριοχές (blocks ίσου μεγέθους) και εφαρμόζει ισοστάθμιση ιστογράμματος σε κάθε μία. Για κάθε υποπεριοχή ορίζεται ένα κατώφλι, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το μέγεθος κάθε υποπεριοχής και από την επιθυμητή ισοστάθμιση του ιστογράμματος σε κάθε μία από τις υποπεριοχές. Όταν το ύψος κάθε ιστογράμματος ξεπεράσει την προκαθορισμένη τιμή του κατωφλίου, το τμήμα του ιστογράμματος που ξεπερνά το κατώφλι κατανέμεται ομοιόμορφα στις γειτονικές υποπεριοχές. Παράλληλα, στο τελικό αποτέλεσμα εμφανίζεται μειωμένος θόρυβος, κάτι που βοηθά και στην εξισορρόπηση της φωτεινότητας, που συνήθως είναι υπερκορεσμένη σε εικόνες μετά από εφαρμογή ισοστάθμισης ιστογράμματος, ενώ με ταυτόχρονη εφαρμογή φίλτρων διαμέσου (median) και ενίσχυσης ακμών (edge sharpening) διατηρείται η έντονη μεταβολή χωρικών συχνοτήτων της εικόνας. Οι συγγραφείς εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, εφάρμοσαν την CLAHE σε χρωματικά μοντέλα RGB και HSV για κάθε υποβρύχια εικόνα, τα οποία και συνένωσαν μετά από την ανεξάρτητη ισοστάθμιση των ιστογραμμάτων τους, μέσω υπολογισμού μιας συνάρτησης απόστασης διανυσμάτων μεταξύ των αντίστοιχων καναλιών (ευκλείδεια νόρμα). Τα αποτελέσματα της μεθόδου απέδωσαν χαμηλό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και υψηλή μέγιστη αναλογία σήματος προς θόρυβο (PSNR) σε σχέση με άλλες μεθόδους ενίσχυσης υποβρύχιας εικόνας που προσεγγίζουν την εικόνα στο σύνολό της και όχι κατατέμνοντάς την.

Οι Andono et al. (2013) διερευνούν τα ποσοστά επιτυχίας του αλγορίθμου SIFT πριν και μετά την επεξεργασία της υποβρύχιας εικόνας, με εφαρμογή των τεχνικών CLAHE και επέκτασης της αντίθεσης της εικόνας, εντοπίζοντας 41% αυξημένη απόδοση του SIFT μετά από την επεξεργασία των εικόνων με τεχνικές CLAHE-Rayleigh.

Οι Bianco et al. (2011) και οι Hernández et al. (2016) χρησιμοποιούν μία μέθοδο ενίσχυσης εικόνας, βασισμένη στην υπόθεση “white-world” των Ruderman et al. (1998) πάνω στον χρωματικό χώρο  $L\alpha\beta$  και στην ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας της απεικονιζόμενης σκηνής. Ο χρωματικός χώρος  $L\alpha\beta$  χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χρωματικής διαφοράς μεταξύ δύο σημείων, διαχωρίζοντας την αντιληπτή φωτεινότητα ( $L$ ) σε δύο συνιστώσες χρώματος ( $\alpha, \beta$ ), οι οποίες καθορίζουν την ανάμειξη κόκκινου-πράσινου και κίτρινου-μπλε αντίστοιχα, και κατανέμουν την διασπορά τους γύρω από το λευκό σημείο (0,0). Το χρωματικό μοντέλο  $L\alpha\beta$  έχει σχεδιαστεί ώστε να μεταφράζει την αντιληπτή χρωματική διαφορά σε ποσοτική απόσταση στον χρωματικό χώρο. Με τον τρόπο αυτό, απομακρύνονται οι ανεπιθύμητες - εσφαλμένες - αποχρώσεις της εικόνας, ενώ η περικοπή και επανεπέκταση του ιστογράμματος της φωτεινότητας χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της αντίθεσης της εικόνας.

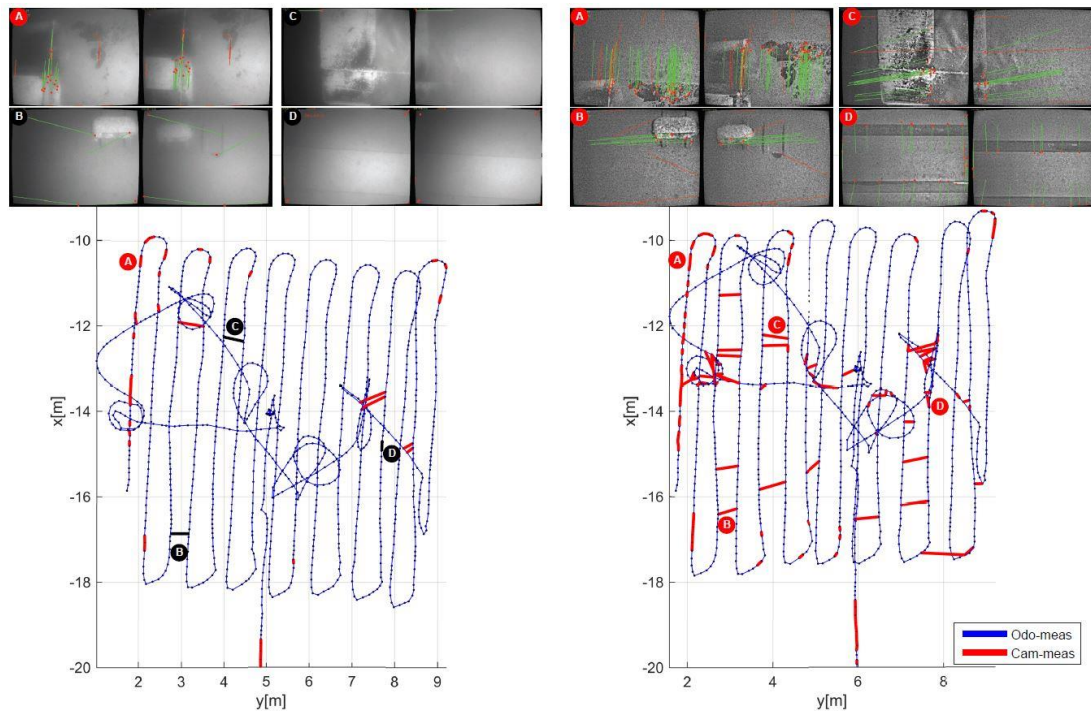
### 3.2.3 Υβριδικές μέθοδοι επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας

Στις περισσότερες περιπτώσεις επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας, η μεθοδολογική προσέγγιση συχνά εμφανίζει την ανάγκη συνδυασμού τεχνικών αποκατάστασης και ενίσχυσης για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος, κυρίως λόγω των ταχέως εναλλασσόμενων και πολύπλοκων συνθηκών κατά τη σύνθεση της εικόνας. Ο συνδυασμός μοντελοποίησης φυσικών παραμέτρων και επιλογής υποκειμενικών κριτηρίων κατά τον οπτικό έλεγχο της εικόνας είναι τελικά, η συνηθέστερη κατηγορία επεξεργασίας εικόνας.

Τέτοια εκδοχή συνδυασμού τεχνικών αποκατάστασης και ενίσχυσης είναι αυτή των Arnold-Bos et al. (2005), κατά την οποία επιχειρείται η απομάκρυνση του θορύβου της υποβρύχιας εικόνας μέσω συνδυασμού αλγορίθμων αποσυνέλιξης και βελτίωσης εικόνας. Αρχικά, τα φαινόμενα του backscatter, της εξασθένησης του φωτός και των ανομοιομορφιών της ακτινοβολίας διορθώνονται μέσω αλγορίθμου εξισορρόπησης της αντίθεσης. Αν  $I(I, j)$  είναι η αρχική εικόνα και  $I_{LP}(i, j)$  η χαμηλοπερατή εκδοχή της μετά από εφαρμογή ενός φίλτρου Gauss, τότε μετά την εξισορρόπηση της αντίθεσης η εικόνα  $I$  γίνεται  $I_{eq} = I/I_{LP}$ . Μετά από την εξισορρόπηση, το ιστόγραμμα περικόπτεται (clipping) για την απομάκρυνση της βασικής πηγής θορύβου στην εικόνα, του backscatter, και έπειτα επεκτείνεται για την εξομάλυνση της αντίθεσης στο σύνολο της εικόνας. Αν και το backscatter θεωρείται η κυρίαρχη πηγή θορύβου το φίλτρο εξισορρόπησης της αντίθεσης διορθώνει ταυτόχρονα σε σημαντικό και την εκθετική εξασθένηση του φωτός λόγω απόστασης. Ο εναπομένον θόρυβος που οφείλεται σε αιωρούμενα σωματίδια, σε θόρυβο του αισθητήρα της κάμερας ή σε άλλα είδη σφαλμάτων απαλείφεται με χρήση κυματίων log-Gabor, μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier μικρού χρόνου (short time), μία τεχνική ευρέως διαδεδομένης μεταξύ των τεχνικών επεξεργασίας εικόνας, όπως ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων, ο εντοπισμός ακμών ή η κατάτμηση εικόνας.

Αν και η επόμενη μέθοδος κατατάσσεται βιβλιογραφικά στις μεθόδους ενίσχυσης εικόνας, η αλήθεια είναι ότι θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως υβριδική μέθοδος, αφού λαμβάνεται υπόψη το μαθηματικό μοντέλο των συντελεστών εξασθένησης για τη διόρθωση της εικόνας. Οι Áhlién et al. (2007) εκμεταλλεύονται υπερφασματικά δεδομένα για τη διόρθωση εικόνων με σκοπό την παρακολούθηση κοραλλιογενών υφάλων και θαλάσσιων ενδιαιτημάτων. Αναπτύσσουν ένα μαθηματικό μοντέλο αντιστοιχίας μήκους κύματος και βάθους, ώστε να προκύψει ο συντελεστής εξασθένησης για κάθε αντίστοιχο βάθος λήψης μιας εικόνας. Χρησιμοποιούν μία χρωματική παλέτα και με φασματόμετρο μετρούν την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας δειγματοληπτικά για κάποια βάθη. Από το νόμο των Beer-Lambert και τις μετρήσεις του φασματόμετρου, μετατρέπουν τις μετρημένες ακτινοβολίες στις αληθείς. Έπειτα μετατρέπουν τις υπερφασματικές εικόνες σε RGB, οι οποίες χρωματικά έχουν “αναδυθεί” μέχρι τα 1-2 m βάθος, όπου και απαντώνται όλα τα χρώματα.

Οι Cho & Kim (2017) συνδύασαν μεθόδους αποκατάστασης και ενίσχυσης εικόνων με σκοπό, στη συνέχεια, την επιτυχήστερη δυνατή εφαρμογή αλγορίθμων SLAM σε δεδομένα υποβρύχιων εικόνων από περιοχές αυξημένης θολότητας, για τη λήψη των οποίων χρησιμοποιήθηκε τεχνητός φωτισμός. Ως προς την μέθοδο αποκατάστασης, το πρόβλημα προσεγγίζεται σε τρεις άξονες: (i) σε τοπικό επίπεδο στην εικόνα λόγω της χωρικής ανομοιομορφίας του τεχνητού φωτισμού, μέσω της ανάλυσης των ιδιοτεροτήτων της μετάδοσης φωτισμού LED, (ii) μοντελοποιώντας το θολό “πέπλο” που καλύπτει την εικόνα μέσω του προσδιορισμού της συνάρτησης PSF και (iii) μοντελοποιώντας τον τυχαίο θόρυβο που προκαλείται από σωματίδια (συχνά αποκαλούμενο και marine snow). Για την ενίσχυση της εικόνας (ενίσχυση αντίθεσης και ακμών) εφαρμόστηκε η περιορισμένη κατά αντίθεση προσαρμοστική ισοστάθμιση ιστογράμματος CLAHE. Τα αποτελέσματα μετά από εφαρμογή της μεθοδολογίας σε δεδομένα διαφορετικών συνθηκών υποβρυχίως απέδειξαν την ταχύτητα και αποτελεσματικότητα της μεθόδου, ανεξαρτήτως αριθμού καναλιών της εικόνας (εξίσου αποτελεσματική σε εικόνες grayscale και RGB) καθώς και τη βελτίωση των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων SLAM (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμων SLAM πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την επεξεργασία των υποβρύχιων εικόνων (Cho & Kim, 2017).

Μία δημοφιλής κατηγορία επεξεργασίας εικόνων της τελευταίας δεκαετίας, είναι αυτή των μεθόδων που στηρίζονται σε τεχνικές Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning). Η ιδιαιτερότητα των υποβρύχιων εικόνων όσον αφορά την ανάπτυξη νευρωνικών δικτύων είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητα όπως και η δυσκολία συλλογής ικανοποιητικού όγκου δεδομένων πολλαπλών συνθηκών και αντικειμένων για τις ανάγκες των τεχνικών Deep Learning. Οι Perez et al. (2017) δημιούργησαν ένα μοντέλο διόρθωσης υποβρύχιων εικόνων βασισμένο σε ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (CNN - Convolutional Neural Network). Για την εκπαίδευση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν υποβρύχιες εικόνες, χωρισμένες σε έξι κατηγορίες ανάλογα με το αντικείμενο απεικόνισής τους (άμμος, βράχος, κοράλλια κ.ά.) από διαφορετικά βάθη λήψης. Το νευρωνικό δίκτυο λαμβάνει ως δεδομένο εισόδου την αρχική εικόνα και μετά από έξι

συνελικτικά βήματα γνωστών αλγορίθμων αποκατάστασης εικόνας (υπολογισμός συντελεστών εξασθένησης, δημιουργία χάρτη βάθους, φίλτρο απαλοιφής θορύβου σκέδασης, μοντέλο MRF κ.ά.) εξάγει τη διορθωμένη εικόνα. Οι Li et al. (2017) ανέπτυξαν μία μέθοδο αποκατάστασης ρεαλιστικών χρωμάτων υποβρύχιων εικόνων, μέσω της εφαρμογής ενός δικτύου GAN, του WaterGAN, ειδικά σχεδιασμένου για υποβρύχιες εικόνες. Το δίκτυο WaterGAN λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου εικόνες εκτός και εντός νερού για την εκπαίδευση του “ανταγωνιστικού” δικτύου. Οι εκτός νερού εικόνες σε συνδυασμό με τους χάρτες βάθους τους, χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση ψευδοϋποβρύχιων εικόνων (προσομοίωση υποβρύχιων εικόνων) και εκπαιδεύουν το μοντέλο, ώστε με την αντίστροφη διαδικασία, οι πραγματικές υποβρύχιες εικόνες να αποκτήσουν τα χαρακτηριστικά των εκτός νερού εικόνων και τελικά να προκύψει η διόρθωση. Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί η μέθοδος προέρχονται από λήψεις, αρχικά σε αέρα για την εκπαίδευση του συστήματος και έπειτα σε ελεγχόμενο υποβρύχιο περιβάλλον (πισίνα) αλλά και σε πραγματικές συνθήκες. Οι Li et al. (2018) προτείνουν μία μέθοδο μη επιβλεπόμενης, χρωματικής διόρθωσης υποβρύχιων εικόνων, χωρίς την προϋπόθεση ύπαρξης εικόνων κατά ζεύγη και χωρίς την απαραίτητη γνώση του βάθους λήψης τους, εμπνευσμένη από τα δίκτυα CycleGAN (Cycle-Consistent Generative Adversarial Networks). Μία επαναληπτική διαδικασία χαρτογράφησης και διαδοχικής χωρικής συσχέτισης της αρχικής εικόνας με την αληθή εικόνα για τον προσδιορισμό της διαφοράς τους, μέσω των generators και discriminators του δικτύου, σε συνδυασμό με συναρτήσεις αποκατάστασης εικόνας συνθέτουν το προτεινόμενο μοντέλο.

### 3.3 Γεωμετρία συστήματος υποβρύχιας κάμερας

Μετά από την περιγραφή της γεωμετρίας και των συνθηκών διάδοσης της φωτεινής δέσμης στο νερό, είναι απαραίτητη η ανάλυση της πορείας της δέσμης, καθώς αυτή προσπίπτει στη θήκη στεγανοποίησης μέχρι να συναντήσει τον αισθητήρα της κάμερας όσο και η γεωμετρία του συστήματος κάμερα - θήκη, για τον προσδιορισμό τελικά όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για τη διόρθωση της επίδρασης που έχει η διάδοση της ακτίνας σε πολλαπλά μέσα (νερό - υλικό θήκης κάμερας - αέρας). Η κατανόηση όλων των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν τη γεωμετρία μιας υποβρύχιας λήψης είναι μείζονος σημασίας για την εφαρμογή αλγορίθμων (SfM, mosaicing, SLAM) ανακατασκευής αντικειμένων στον τρισδιάστατο χώρο. Το εντονότερο φαινόμενο που κατά τη διάδοση της ακτίνας μεταξύ διαφορετικών μέσων, που επηρεάζει τη γεωμετρία του συστήματος, είναι αυτό της διάθλασης, η οποία και εξετάζεται ως προς τη διόρθωσή της μέσα από την ανάπτυξη γεωμετρικών μοντέλων.

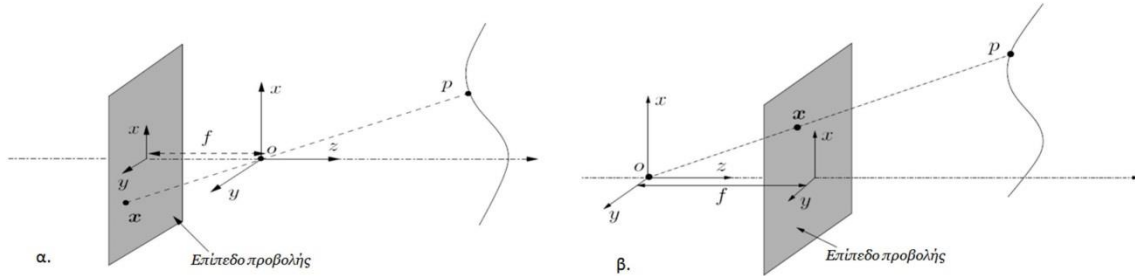
Ο συνηθέστερος τύπος κάμερας που χρησιμοποιείται είναι αυτός της κάμερας σημειακής οπής (pinhole). Σημείο  $P [X, Y, Z]^T$  του χώρου (Εικόνα 3.9) προβάλλεται στο εστιακό επίπεδο  $Z$  μέσω ευθείας που διέρχεται από προβολικό κέντρο  $O$  στο σημείο  $\chi [x, y]^T$ . Από τις ομοιότητες των τριγώνων για τον μετασχηματισμό της ιδανικής προοπτικής προβολής του σημείου  $P[X,Y,Z]^T$  που ανήκει στον τρισδιάστατο Ευκλείδειο χώρο  $\mathbb{R}^3$  στο σημείο  $\chi[x, y]^T$  που ανήκει στον δισδιάστατο Ευκλείδειο χώρο  $\mathbb{R}^2$  προκύπτει ότι:

$$\chi = -f \frac{x}{Z} \text{ και } y = -f \frac{Y}{Z}$$

όπου  $Z \equiv f$ . Σε ομογενείς συντεταγμένες, ο μετασχηματισμός εκφράζεται ως:

$$Z \cdot \begin{bmatrix} \chi \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fX \\ fY \\ fZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

όπου  $\begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  ο προβολικός πίνακας της κάμερας (camera projection matrix),  $\begin{bmatrix} fX \\ fY \\ fZ \end{bmatrix}$  οι ομογενείς συντεταγμένες του σημείου P στο προβολικό επίπεδο και  $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$  οι ομογενείς συντεταγμένες του σημείου P στο χώρο.



Εικόνα 3.9: Γεωμετρία προοπτικής προβολής κάμερας σημειακής οπής

Αν ληφθεί υπόψη ότι το πρωτεύον σημείο στην πραγματικότητα αντί για  $(0,0)$  έχει συντεταγμένες  $(x_0, y_0)$ , τότε ο προβολικός πίνακας της κάμερας γίνεται  $\begin{bmatrix} f_x & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f_y & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  και

ονομάζεται πίνακας της κάμερας (camera matrix) ή πίνακας εσωτερικών παραμέτρων (intrinsic parameters matrix). Για τη σύνδεση του συστήματος της κάμερας με το σύστημα του χώρου απαιτείται η εφαρμογή ενός μετασχηματισμού στερεού σώματος (μία μετάθεση και μία στροφή). Οι παράμετροι που συνδέουν τα δύο συστήματα ονομάζονται εξωτερικές παράμετροι (extrinsic). Για τον μετασχηματισμό αυτό συνήθως χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Άμεσου Γραμμικού Μετασχηματισμού DLT (Direct Linear Transformation). Στη συνέχεια με ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση υπολογίζονται 2 παράμετροι ακτινικής διαστρόφης ( $k_1, k_2$ ).

Στη φωτογραμμετρική βιβλιογραφία, το μοντέλο της κάμερας σημειακής οπής στηρίζεται γενικά στην αρχή της συγγραμμικότητας, κατά την οποία για σημείο P  $(X_i, Y_i, Z_i)$  του χώρου που προβάλλεται μέσω μιας ευθείας από ένα προβολικό κέντρο O  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , στο επίπεδο της εικόνας στο σημείο p  $(X, Y, Z)$  ισχύει ότι:

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

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

Το σύνολο των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας, ήτοι ο εσωτερικός προσανατολισμός, αποτελείται από το πρωτεύον σημείο  $(X_0, Y_0)$ , δηλαδή την προβολή στο εστιακό επίπεδο του προβολικού κέντρου O  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , από το οποίο διέρχονται οι ακτίνες προβολής, την απόσταση c (σταθερά της μηχανής) του προβολικού κέντρου από το εστιακό επίπεδο και το μέτρο της ακτινικής διαστρόφης του φακού Δr. Λόγω του φαινομένου της διάθλασης η συνθήκη συγγραμμικότητας δεν ισχύει για το γεωμετρικό σύστημα της υποβρύχιας κάμερας. Η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού διερευνάται γενικά σε δύο επίπεδα, αφενός για τη γεωμετρική ερμηνεία της διάδοσης της ακτίνας σε ένα πολυμεσικό περιβάλλον και αφετέρου για τον προσδιορισμό των παραμέτρων λόγω διάθλασης. Για το πρώτο

επίπεδο, υποστηρίζεται ότι με βάση ένα αμετάβλητο προβολικό κέντρο, μπορεί να προταθεί η διόρθωση της σταθεράς της μηχανής και των παραμέτρων των διαστροφών μόνο ως συνάρτηση του δείκτη διάθλασης (Lavest et al., 2003). Κοινώς, η εστιακή απόσταση της κάμερας όταν αυτή είναι βυθισμένη διαφέρει από αυτήν που έχει όταν βρίσκεται στον αέρα με μια αναλογία που δίνεται αριθμητικά από τον δείκτη διάθλασης του νερού, οπότε

$$c_{\text{νερού}} = n * c_{\text{αέρα}}$$

όπου  $n$  ο δείκτης διάθλασης. Οι McNeil et al. (1986) προτείνουν τη διόρθωση της διάθλασης ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης της ακτίνας, ενώ οι Li et al. (1997) προτείνουν την παρακολούθηση της πορείας της ακτίνας στα διαφορετικά μέσα, με χρήση μιας διάταξης δύο στερεοκαμερών (σταθερής βάσης). Στο δεύτερο επίπεδο, δημοφιλέστερο μεταξύ των δύο, επιδιώκεται ο προσδιορισμός παραμέτρων για τη διόρθωση της επίδρασης που έχει η διάδοση της ακτίνας σε πολλά μέσα. Με αφετηρία το μοντέλο της κάμερας σημειακής οπής (ο άξονας λήψης είναι κάθετος στο επίπεδο της εικόνας και διέρχεται από το προβολικό κέντρο) είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι παράμετροι επίδρασης και τα γραμμικά μέρη της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής. Οι Höhle et al. (1971) βαθμονόμησαν την εστιακή απόσταση της κάμερας με δέσμευση μιας γνωστής απόστασης ενός πλαισίου τοποθετημένου σε ένα ναυάγιο. Οι Harvey et al. (2007), Canciani (2003) και Drap (2007) εφάρμοσαν αυτοβαθμονόμηση της κάμερας, αντιμετωπίζοντας το σύστημα κάμερα - θήκη ως ενιαίο.

Οι Telem & Filin (2010) προτείνουν ένα φωτογραμμετρικό μοντέλο, που παρά τη διάθλαση, διατηρεί τη βασική αρχή της συγγραμμικότητας, συνυπολογίζοντας μόνο ένα μικρό αριθμό πρόσθετων παραγόντων και παράλληλα με την επίδραση της εναλλαγής μέσων κατά την πορεία της ακτίνας, λαμβάνει υπόψη κατασκευαστικά σφάλματα του συστήματος κάμερας - θήκης. Στο προτεινόμενο μοντέλο (Εικόνα 3.10) γίνεται η υπόθεση ότι ο άξονας λήψης, η προσπίπτουσα ακτίνα και η διαθλώμενη ακτίνα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και, σύμφωνα με το νόμο του Snell για τις γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης για δύο διαφορετικά μέσα, ισχύει ότι

$$n_1 * \sin \alpha = n_2 * \sin \beta \quad \Rightarrow \quad \sin \beta = n * \sin \alpha$$

όπου  $n$  ο λόγος των δεικτών διάθλασης. Από το σχήμα της Εικόνας 3.10 προκύπτει ότι

$$\sin \alpha = \frac{r}{\sqrt{c^2+r^2}} \quad \sin \beta = n \frac{r}{\sqrt{c^2+r^2}} \quad \tan \beta = \frac{R}{c+\Delta c}$$

$$\text{και από } R = \frac{c}{c} r \text{ η } \Delta c \text{ μπορεί να εκφραστεί ως } \Rightarrow \Delta c(\alpha) = c \left( \frac{\sqrt{1-n^2(1-\cos^2\alpha)}}{n \cos\alpha} - 1 \right)$$

Η πρόταση αυτή αφορά ένα “εικονικό” μοντέλο, που καθιστά τη συνθήκη συγγραμμικότητας εφαρμόσιμη με τη χρήση του επιπέδου της θήκης της κάμερας ως του νέου επιπέδου της εικόνας και την απόσταση  $c+\Delta c$  ως της νέας εστιακής απόστασης. Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων και της συνθήκης συγγραμμικότητας, για το νέο σύστημα με προβολικό κέντρο  $O'$  πλέον προκύπτει ότι:

$$x_p - x_{O'} = -C \frac{\sqrt{1-n^2(\cos^2\alpha)}}{n \cos\alpha} \frac{r_{11}(X_p - X_{O'}) + r_{12}(Y_p - Y_{O'}) + r_{13}(Z_p - Z_{O'})}{r_{31}(X_p - X_{O'}) + r_{32}(Y_p - Y_{O'}) + r_{33}(Z_p - Z_{O'})}$$

$$y_p - y_{O'} = -C \frac{\sqrt{1-n^2(\cos^2\alpha)}}{n \cos\alpha} \frac{r_{21}(X_p - X_{O'}) + r_{22}(Y_p - Y_{O'}) + r_{23}(Z_p - Z_{O'})}{r_{31}(X_p - X_{O'}) + r_{32}(Y_p - Y_{O'}) + r_{33}(Z_p - Z_{O'})}$$

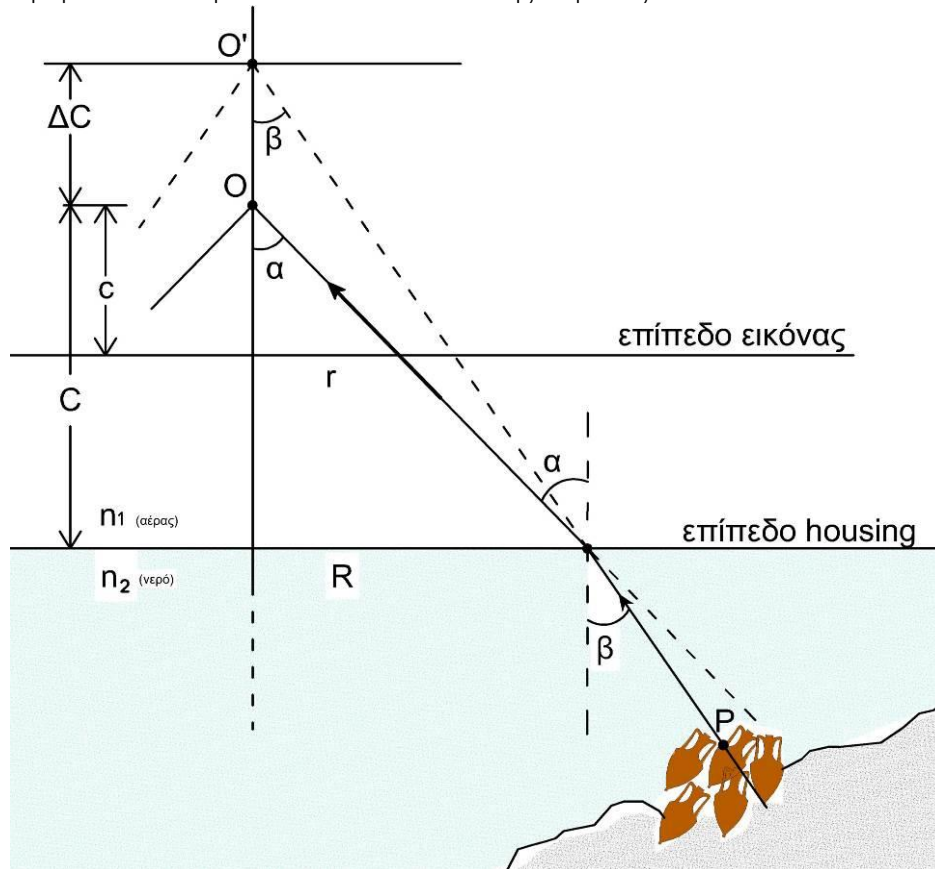
Το προτεινόμενο μοντέλο εκφράζει τη γεωμετρική ερμηνεία της διάδοσης του φωτός σε διαφορετικά μέσα, την οποία ενσωματώνει στις σχέσεις της συγγραμμικότητας. Δεν απαιτεί



πολύπλοκο μετασχηματισμό για να συνδέσει το χώρο του αντικειμένου με το σύστημα της εικόνας και προτείνει μία ενιαία μορφή συνάρτησης, η οποία μοντελοποιεί την ακτίνα ως εξής:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (O + \Delta O) + \lambda R^T \begin{bmatrix} x_{O'} \\ y_{O'} \\ C + \Delta C \end{bmatrix}$$

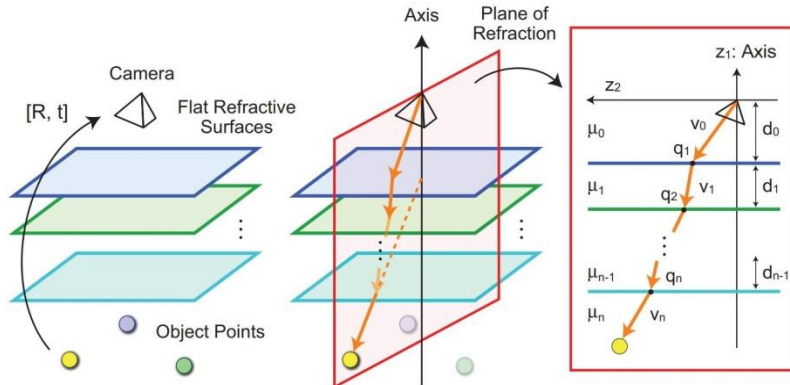
όπου  $O = [X_0, Y_0, Z_0]^T$  το προβολικό κέντρο,  $\Delta O = -r_3 \Delta C$  ο πίνακας που εκφράζει τη μετατόπιση του νέου προβολικού κέντρου  $O'$  και  $\lambda$  ο συντελεστής κλίμακας.



Εικόνα 3.10: Πορεία ακτίνας στα διαφορετικά μέσα. Το πραγματικό προβολικό κέντρο βρίσκεται σε απόσταση  $c$  από το επίπεδο της εικόνας, ενώ το τροποποιημένο  $O'$ , ώστε να αγνοηθεί η διάθλαση (διακεκομμένη ακτίνα), προβολικό κέντρο, βρίσκεται σε απόσταση  $\Delta C$ . Η επιφάνεια της θήκης βρίσκεται σε μία απόσταση  $C$  από το πραγματικό προβολικό κέντρο. Για τη διατήρηση της συγγραμμικότητας αρκεί η υπόθεση μιας ακτίνας της οποίας η διεύθυνση ξεκινά από το σημείο  $P$  και συναντά το προβολικό κέντρο  $O'$  παραμένοντας ευθεία ήδη από το νερό (διακεκομμένη στο νερό, συνεχόμενη στον αέρα).

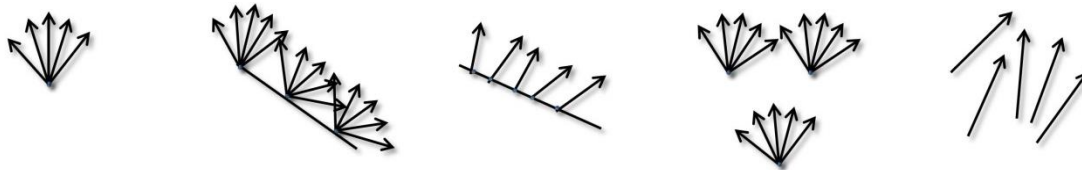
Το συγκεκριμένο μοντέλο γεωμετρίας κάμερας είναι αυτό που υιοθετείται κυρίως, λόγω της απλής αρχής λειτουργίας του και της αποτελεσματικής εφαρμογής του ακόμα και στις υποβρύχιες εφαρμογές, όπου η διάθλαση καθιστά τη γεωμετρία του συστήματος πολύπλοκη. Ένα χαρακτηριστικό του μοντέλου της κάμερας σημειακής οπής είναι ότι η κάμερα διαθέτει ένα μοναδικό προβολικό κέντρο στο οποίο συγκλίνουν όλες οι ακτίνες. Ωστόσο, υπάρχουν κάμερες, μεταξύ των οποίων κάποια μοντέλα αμφίβιων (αδιάβροχων) καμερών, fish-eye κάμερες ή κάμερες που διαθέτουν πάνω από έναν αισθητήρα αλλά συνθέτουν μία κοινή εικόνα, που περιγράφονται από πιο σύνθετες γεωμετρικές δεσμεύσεις. Οι Agrawal et al. (2012) απέδειξαν ότι οι κάμερες που τοποθετούνται σε θήκες flat-port ανήκουν στην κατηγορία των αξονικών καμερών (axial cameras) και ότι όλες οι ακτίνες τέμνουν έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο της επίπεδης θήκης που περνά από το προβολικό κέντρο της κάμερας (Εικόνα 3.11). Βάσει αυτού

του άξονα που τέμνουν οι ακτίνες και την απόσταση κάμερας - θήκης παραμετροποιείται το γεωμετρικό μοντέλο μιας επίπεδης θήκης, με επίλυση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων αρχικά και μη γραμμικών, στη συνέχεια, για τη βελτιστοποίηση της επίλυσης.



Εικόνα 3.11: Αριστερά: Επίπεδες διαθλαστικές επιφάνειες. Κέντρο: Η πορεία ενός *pixel* καθώς αυτό διαπερνά επίπεδες επιφάνειες ανήκει σε ένα επίπεδο, το επίπεδο της διάθλασης. Δεξιά: Τομή του επιπέδου της διάθλασης (Agrawal et al., 2012).

Οι Swaninathan et al. (2003) επιχειρούν την ταξινόμηση γεωμετρικών μοντέλων καμερών βάσει των διαστροφών τους, διακρίνοντας τις κατηγορίες (i) της ιδανικής κάμερας σημειακής οπής (απαλλαγμένη από διαστροφές), (ii) των καμερών ενιαίας προβολής (SVP - Single View point cameras) και (iii) των καμερών μη ενιαίας προβολής (nSVP - non Single View point cameras). Στις κατηγορίες SVP και nSVP ανήκουν οι κάμερες υπερευρυγώνιων φακών, οι fish-eye, οι περιστροφικές ή οι κάμερες πολλαπλών κατευθύνσεων (catadioptric camera systems). Μία άλλη κατηγοριοποίηση των γεωμετρικών μοντέλων των καμερών γίνεται από τους Pless (2003) και Li et al. (2008), βάσει της γεωμετρίας της ακτίνας (Εικόνα 3.12) σε (i) κάμερες προοπτικής γεωμετρίας όπου όλες οι ακτίνες συγκλίνουν σε ένα σημείο (SVP cameras), (ii) σύστημα καμερών προοπτικής γεωμετρίας των οποίων τα προβολικά κέντρα περνούν από έναν κοινό άξονα (Locally central, Axial cameras - nSVP cameras), (iii) κάμερες όπου οι ακτίνες τέμνουν έναν κοινό άξονα (Axial cameras), (iv) σύστημα δύο ή περισσότερων καμερών προοπτικής γεωμετρίας των οποίων τα προβολικά κέντρα δεν τέμνουν κάποιον κοινό άξονα (Locally central, General cameras - nSVP cameras) και (v) γενικευμένα μοντέλα καμερών με αδυναμία περιγραφής της γεωμετρίας της ακτίνας (General nSVP cameras).



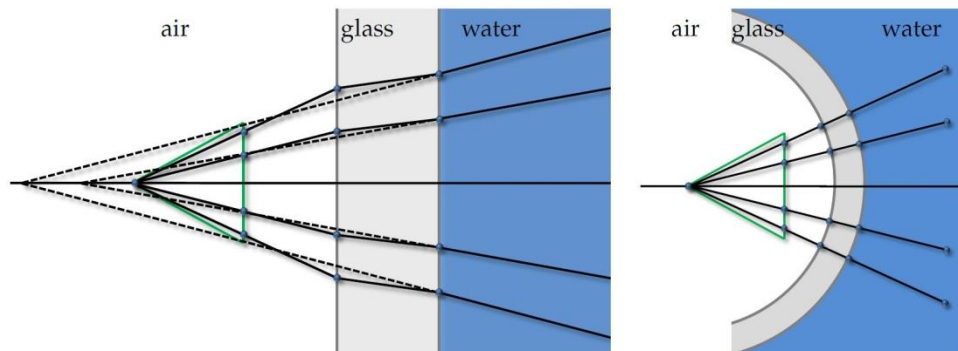
Εικόνα 3.12: Από αριστερά προς τα δεξιά η κατηγοριοποίηση των γεωμετρικών μοντέλων καμερών βάσει της γεωμετρίας της ακτίνας: (i) single-view-point perspective camera, (ii) locally central, axial camera, (iii) axial camera, (iv) locally central, central, general camera, (v) general camera (Jordt, 2013).

Το φαινόμενο της διάθλασης εκφράζει τη γωνία εκτροπής των ακτίνων καθώς διαπερνούν μία επιφάνεια και ενώ αλλάζουν μέσο διάδοσης. Η επιφάνεια αυτή στις θήκες στεγανοποίησης μιας κάμερας διακρίνεται σε δύο βασικά είδη: στις θήκες επίπεδης θύρας (*flat port housings*) και στις θήκες θολωτής θύρας (*dome port housings*). Στην πρώτη κατηγορία, όλες οι ακτίνες αναπόφευκτα διαθλώνται (σύμφωνα με το νόμο του Snell), ενώ κατά τη διάδοσή τους από ένα μέσο με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης σε μέσο με μικρότερο δείκτη υπάρχει πιθανότητα ολικής ανάκλασης. Με εφαρμογή του νόμου του Snell υπολογίζεται η κρίσιμη γωνία, με την οποία οι

ακτίνες οριακά εισέρχονται στην κάμερα ή ανακλώνται, και αποδεικνύεται η μείωση του οπτικού πεδίου κάτω των  $100^\circ$ . Το παραπάνω συνεπάγεται ότι η μείωση του οπτικού πεδίου, με σταθερή την απόσταση αντικειμένου-κάμερας, μεγεθύνει το αντικείμενο σε αναλογία ίση με το λόγο του δείκτη διάθλασης του νερού προς τον δείκτη διάθλασης του αέρα και μεταφράζεται σε αύξηση της τιμής της εστιακής απόστασης. Επίσης, μία κάμερα σημειακής οπής πίσω από μία επίπεδη θήκη καταργεί την ιδιότητα single-view-point του μοντέλου της κάμερας (το σύστημα “κάμερα - θήκη” κατατάσσεται στις κατηγορίες nSVP - non single viewpoint) και περιπλέκει τα στάδια της επίλυσης και του προσδιορισμού των σφαλμάτων κατά την εφαρμογή αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης και SLAM. Για παράδειγμα, η προβολή ενός τρισδιάστατου σημείου στην εικόνα απαιτεί επίλυση ενός πολυωνύμου  $12^{ου}$  βαθμού (Agrawal et al., 2012).

Πέραν των γεωμετρικών παραμορφώσεων, οι ακτίνες που διαπερνούν θήκες flat port προκαλούν ραδιομετρικές αλλοιώσεις (αλλοίωση ευκρίνειας και χρωματικού κορεσμού) στην εικόνα, αφού καθώς διαθλώνται, διαφοροποιούνται ως προς τα μήκη κύματός τους (συνηθέστερα για μικρές εστιακές αποστάσεις και μεγάλα διαφράγματα). Οι Treibitz et al. (2011) και Jordt et al. (2016) προτείνουν μεθόδους ανάλυσης του γεωμετρικού μοντέλου του συστήματος “κάμερα - θήκη flat port” με βάση τις αρχές της διάθλασης και προτείνουν τη γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων που συλλέγονται, όπως επίσης και τη βαθμονόμηση του συστήματος με σκοπό τη βέλτιστη χρήση των εικόνων και του αποκατεστημένου εσωτερικού προσανατολισμού σε εργασίες τρισδιάστατης ανακατασκευής υποβρύχιων αντικειμένων.

Από την άλλη μεριά, οι θολωτές θήκες (dome housings) κατασκευάστηκαν με σκοπό να διορθώσουν τα γεωμετρικά προβλήματα των flat ports. Οι ιδανικές θολωτές θήκες είναι κατασκευασμένες έτσι, ώστε το προβολικό κέντρο της κάμερας να ταυτίζεται με το κέντρο της σφαίρας του θόλου και οι διερχόμενες ακτίνες να προσπίπτουν και να διαπερνούν την επιφάνεια κάθετα, αποφεύγοντας τη διάθλασή τους. Ωστόσο, στην πραγματικότητα η κατασκευή μιας θήκης ιδανικού θόλου είναι το ίδιο δύσκολη με τον προσδιορισμό του πραγματικού προβολικού κέντρου της κάμερας. Το οπτικό πεδίο παραμένει σταθερό, όπως επίσης και η εστιακή απόσταση πολύ κοντά στην πραγματική τιμή του φακού. Ο θόλος αποτελεί ομόκεντρο φακό αρνητικό (ή αποκλίνοντα) που δρα σαν επιπλέον στοιχείο του φακού της κάμερας. Το είδωλο σχηματίζεται αρνητικό μπροστά από το θόλο και είναι μικρότερο από το πραγματικό αντικείμενο, ενώ ο φακός της κάμερας δεν εστιάζει στο αντικείμενο αλλά στο είδωλο (μόλις μερικά εκατοστά μπροστά του).



Εικόνα 3.13: Αριστερά, η διάθλαση στις θήκες flat port. Δεξιά, οι ακτίνες αλλάζουν μέσο διάδοσης χωρίς να διαθλώνται και το προβολικό κέντρο ταυτίζεται - σχεδόν - με το κέντρο του θόλου (Jordt, 2013).

Η διατύπωση του γεωμετρικού προβλήματος των δύο τύπων συστημάτων κάμερας - θήκης προσεγγίζεται με δύο τρόπους, είτε με τη μοντελοποίηση και τον προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων της διάθλασης για τα μέσα “κάμερα, θήκη, νερό” (Treibitz et al., 2011; Jordt et al.,

2016), είτε με προσομοίωση όλου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της θήκης, ως μια κάμερα σημειακής οπής (Shortis, 2015). Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, στην περίπτωση των επίπεδων θηκών, η διάθλαση απορροφάται από τις βασικές παραμέτρους της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας, όπως η εστιακή απόσταση και η ακτινική διαστρόφη. Ωστόσο, λόγω του ότι η διάθλαση εξαρτάται άμεσα από την απόσταση, η δεύτερη προσέγγιση είναι καταλληλότερη για περιπτώσεις υποβρύχιων λήψεων σε μια προγραμματισμένη, σταθερή απόσταση παρά για λήψεις για εφαρμογές SLAM εκτελούμενες από υποβρύχια οχήματα, όπου η απόσταση λήψης είναι δύσκολο να διατηρηθεί σταθερή. Για τις θολωτές θήκες, από την άλλη μεριά, το γεωμετρικό πρόβλημα μπορεί να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους προβλήματα: στη μηχανολογική προσπάθεια ταύτισης του προβολικού κέντρου της κάμερας με το κέντρο της σφαίρας του θόλου και στη βαθμονόμηση ενός υποθετικού εναπομένου διανύσματος μεταξύ των δύο αυτών σημείων. Το πρώτο υποπρόβλημα προσεγγίζει τη φιλοσοφία των πανοραμικών εικόνων, κατά την οποία η κάμερα περιστρέφεται περί το προβολικό κέντρο με σκοπό τη λήψη διαδοχικών, επικαλυπτόμενων εικόνων από την ίδια θέση. Μία πανοραμική εικόνα μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένη, χωρίς ορατή στρέβλωση ή μετάθεση, όταν αφορά απεικόνιση μικρής κλίμακας, ακόμα κι αν το κέντρο λήψης δεν είναι ίδιο για όλες τις επιμέρους εικόνες. Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται δηλαδή από την απόσταση μεταξύ αντικειμένου και κάμερας. Στις υποβρύχιες λήψεις όμως όπου η απόσταση κάμερας και αντικειμένου είναι μειωμένη, κυρίως για λόγους εξασθένησης της φωτεινής δέσμης, μία μικρή μετατόπιση στο προβολικό κέντρο επιφέρει επιπλέον μη αμελητέα σφάλματα λόγω διάθλασης. Το δεύτερο πρόβλημα αφορά την παραδοχή αδυναμίας ταύτισης των δύο κέντρων και στην προσπάθεια βαθμονόμησης του συστήματος. Με αφετηρία την έρευνα των Kunz & Singh (2008), οι She et al. (2019) επιχειρούν να αναλύσουν τη γεωμετρία του συστήματος κάμερα - θολωτή θήκη, υπό το πρίσμα της συνταύτισης προβολικού κέντρου κάμερας και κέντρου σφαίρας θόλου και της βαθμονόμησης τυπικών συστημάτων θολωτών θηκών για συλλογή και επεξεργασία δεδομένων με σκοπό την τρισδιάστατη ανακατασκευή.

### 3.4 Βαθμονόμηση συστήματος υποβρύχιας κάμερας

Τα χαρακτηριστικά της μηχανής που προσδιορίζονται κατά τη βαθμονόμηση διακρίνονται σε γεωμετρικά (θέση πρωτεύοντος σημείου, σταθερά μηχανής φακού, επιπεδότητα εστιακού αντικειμένου) και σε φυσικά χαρακτηριστικά (παραμόρφωση φακών, διακριτική ικανότητα φακών), σημαντικότερο εκ των οποίων είναι η σταθερά μηχανής του φακού, λόγω του ότι είναι και το πιο ευμετάβλητο ως χαρακτηριστικό - σε σχέση με τα υπόλοιπα - και κυρίως διότι είναι το μέγεθος εκείνο το οποίο είναι συγγραμμικό της τρίτης διάστασης, η οποία είναι αυτή που συνήθως υπολογίζεται με τη μικρότερη ακρίβεια (Πατιάς, 1991). Οι εσωτερικές παράμετροι της κάμερας (intrinsic parameters) συνήθως αναπαρίστανται σε έναν πίνακα 3x4 (camera matrix) και σε έναν πίνακα 5x1 που αφορά τους συντελεστές της παραμόρφωσης. Στην περίπτωση των υποβρύχιων καμερών, η βαθμονόμηση εξετάζεται σε επίπεδο συστήματος κάμερας - θήκης και μελετάται ο προσδιορισμός των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας, των παραμέτρων της θήκης στεγανοποίησης και των παραμέτρων συστημάτων - άνω της μίας - καμερών.

Στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται διάφορες μέθοδοι για τη βαθμονόμηση της κάμερας, δημοφιλέστερη των οποίων είναι η μέθοδος του Zhang (Zhang, 2000). Κατά τη μέθοδο αυτή, ένα δισδιάστατο πεδίο βαθμονόμησης γνωστής γεωμετρίας και διαστάσεων (συνήθως το μοτίβο της σκακιέρας) φωτογραφίζεται από διαφορετικές θέσεις και γωνίες. Για την επίλυση απαιτούνται τουλάχιστον 2 λήψεις, αλλά για λόγους συνόρθωσης και αύξησης της αξιοπιστίας της βαθμονόμησης χρησιμοποιούνται αρκετά περισσότερες. Από κάθε εικόνα εξάγεται ένας

αριθμός χαρακτηριστικών σημείων (ακμές ή κορυφές σκακιάρας) από τα οποία προκύπτουν οι ομογραφίες των εικόνων με το επίπεδο του χώρου μέσω ενός προβολικού μετασχηματισμού μεταξύ του επιπέδου της εικόνας και του επιπέδου της πραγματικής σκακιάρας, σχηματίζοντας για κάθε εικόνα έναν πίνακα που εκφράζει τις προβολές των τρισδιάστατων σημείων στις δύο διαστάσεις (projection matrix ή homography). Από τους πίνακες των ομογραφιών υπολογίζονται οι 5 παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού, συμπεριλαμβανομένων των skewness και aspect ratio. Στη συνέχεια, με συνόρθωση ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται γραμμικά 2 παράμετροι ακτινικής διαστρόφης. Η μέθοδος του Zhang, τέλος, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Levenberg - Marquardt, για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων και τη μείωση του σφάλματος επαναπροβολής (reprojection error). Για τη βαθμονόμηση υποβρύχιων καμερών (ή συστημάτων υποβρύχιων καμερών) ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η χρήση δισδιάστατων πεδίων βαθμονόμησης, με εφαρμογή αλγορίθμων όμοιων με εκείνου του Zhang (Zhang, 2000), σε δημοφιλή προγραμματιστικά περιβάλλοντα όπως το Matlab (Wehkamp & Fischer 2014; Agdestein, 2018; Chadebecq et al., 2019;).

Οι πρώτες απόπειρες βαθμονόμησης υποβρύχιων καμερών εντοπίζονται από τους Fryer & Fraser (1986) και Harvey & Shortis (1996), με την υιοθέτηση τυπικών (σε αέρα) τεχνικών τυπικής φωτογραμμετρικής βαθμονόμησης ή αυτοβαθμονόμησης μέσω φωτογραφήσεων αντικειμένων ή σκηνών γνωστών διαστάσεων και γνωστής γεωμετρίας στον τρισδιάστατο χώρο. Στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές απαντώνται προ-βαθμονομήσεις του συστήματος κάμερα - θήκη, σε περιβάλλον αέρα, με σκοπό τον αρχικό προσδιορισμό των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας και με δεδομένο το συντελεστή διάθλασης του νερού, τον προσδιορισμό παραμέτρων που εξαρτώνται από την απόσταση, όπως η εστιακή απόσταση του φακού και η θέση του προβολικού κέντρου του συστήματος, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης εντός και εκτός νερού. Με γνώμονα τις απαιτήσεις σε ακρίβεια, η λύση βαθμονόμησης του συστήματος εκτός νερού και εκ των υστέρων αναγωγής των αποτελεσμάτων βάσει του συντελεστή διάθλασης του μέσου διάδοσης για τον προσδιορισμό των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας, είναι συχνά αποδεκτή.

Ανάλογα με τη γεωμετρία της ακτίνας και το πώς αυτή διαθλάται κατά τη διάδοσή της σε πολλαπλά μέσα, αναπτύσσονται τεχνικές βαθμονόμησης συστημάτων “κάμερας - θήκης” δύο κατηγοριών: αυτών που αφορούν επίπεδες θήκες (flat ports) και αυτών που αφορούν θολωτές (dome ports). Στην περίπτωση των επίπεδων θηκών, η υπόθεση της σύγκλισης των ακτίνων σε ένα κοινό προβολικό κέντρο (υπόθεση SVP - Single Point View) καταργείται και όλες οι ακτίνες, αρχικές και διαθλώμενες, κείνται σε ένα κοινό επίπεδο, το επίπεδο της διάθλασης (POR - Plane of Refraction). Με αφετηρία το μοντέλο των Agrawal et al. (2012), οι Jordt & Koch (2012) διατύπωσαν έναν αλγόριθμο βαθμονόμησης αποτελούμενο από τρία μέρη, την αρχικοποίηση των γεωμετρικών δεσμεύσεων, τη γεωμετρική και τη ραδιομετρική βαθμονόμηση. Κατά το στάδιο της αρχικοποίησης προσδιορίζονται οι θέσεις των εικόνων ενός δισδιάστατου πεδίου (σκακιάρας) στο νερό, καθώς και οι παράμετροι που περιγράφουν τη γεωμετρία της θήκης. Για τον προβολικό μετασχηματισμό ενός σημείου του τρισδιάστατου χώρου στο επίπεδο της εικόνας προτείνουν ένα πολυώνυμο  $12^{ου}$  βαθμού. Στη φάση της γεωμετρικής βαθμονόμησης, οι αρχικές παράμετροι και οι θέσεις των εικόνων προσδιορίζονται τελικά μέσω ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης, γνωστού ως Στρατηγική Εξέλιξης Προσαρμογής Πίνακα Συνδιακύμανσης CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy). Στο τελευταίο στάδιο του αλγορίθμου, αναλύονται και μοντελοποιούνται οι παράμετροι που περιγράφουν τη διάδοση της φωτεινής δέσμης στην υδάτινη στήλη με σκοπό τη ραδιομετρική διόρθωση και αποκατάσταση των εικόνων.

Σε συνέχεια της έρευνας των Agrawal et al. (2012) και Jordt & Koch (2012), οι Yau et al. (2013) ενσωματώνουν στα προτεινόμενα μοντέλα τις φυσικές ιδιότητες του φωτός κατά τη διάδοσή του σε διαφορετικά μέσα και συγκεκριμένα την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης  $n$  από το μήκος κύματος  $\lambda$ , φαινόμενο που ονομάζεται διασπορά ή διασκεδασμός. Το προτεινόμενο γεωμετρικό μοντέλο περιγράφει τη διάθλαση των ακτίνων όχι ενιαία αλλά με επιμέρους ανάλυση κάθε ακτίνας ανά μήκος κύματος. Η βαθμονόμηση του συστήματος “κάμερας - θήκης” επιτυγχάνεται με διαδικασία επίλυσης γραμμικών εξισώσεων με πρόσθετους συντελεστές τα μήκη κύματος και τα διανύσματα των ακτίνων στα οποία αντιστοιχούν. Για τις πειραματικές εφαρμογές τους, οι συγγραφείς φωτογράφησαν ένα επίπεδο πεδίο, με μοτίβο κανάβου ή σκακιέρας, προσθέτοντας τεχνητό φωτισμό για να αυξήσουν το εύρος των μηκών κύματος στην εικόνα. Παρατήρησαν ότι η ενσωμάτωση του φαινομένου της διασποράς του φωτός στο μοντέλο των Agrawal et al., απέδωσε σημαντική αύξηση της ακρίβειας στη βαθμονόμηση κάμερας σε επίπεδη υποβρύχια θήκη.

Οι Telem & Filin (2010), με βάση το μοντέλο διατήρησης της συνθήκης συγγραμμικότητας μέσω του σχεδιασμού ενός νέου ιδεατού προβολικού κέντρου, προτείνουν τη βαθμονόμηση του συστήματος “κάμερα - επίπεδη θήκη - αντικείμενο” σε δύο στάδια: αρχικά εκτός νερού για τον προσδιορισμό των πραγματικών παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας χωρίς την επίδραση της διάθλασης και σε επόμενο στάδιο εντός νερού για τον προσδιορισμό των νέων παραμέτρων κατόπιν επίδρασης της διάθλασης. Η υποβρύχια βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους: αφενός με χρήση ενός επίπεδου ταμπλώ βαθμονόμησης και με λήψη εικόνων από διαφορετικές γωνίες και αποστάσεις και αφετέρου μονοεικονικά, με χρήση ενός τρισδιάστατου πλέγματος. Παράλληλα, εξετάζουν πώς η μη ορθογωνικότητα στο σύστημα του άξονα λήψης με τον άξονα του επιπέδου της θήκης, όπως επίσης και το πάχος του υλικού της θήκης επιδρούν στον προσδιορισμό των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας του συστήματος. Όμοια, οι Bräuer-Burchardt et al. (2015) προτείνουν τη βαθμονόμηση του συστήματος, σε πρώτη φάση, εκτός νερού και στη συνέχεια με γνώση του συντελεστή διάθλασης, του πάχους της θήκης και της απόστασης προβολικού κέντρου κάμερας και επιπέδου θήκης, την περιγραφή της γεωμετρίας των ακτίνων που διέρχονται από αέρα, γυαλί και νερό, για τον τελικό προσδιορισμό των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας του συστήματος, όπως διαμορφώνεται εντός νερού. Η απόκλιση από την ορθογωνικότητα (περίπτωση non Single View Point καμερών) δεν λαμβάνεται υπόψη.

Οι Łuczynski et al. (2017) εισάγουν τον όρο Pinax model για να περιγράψουν το γεωμετρικό μοντέλο μιας κάμερας σημειακής οπής (pinhole), όπως αυτό διαμορφώνεται όταν η κάμερα βρίσκεται εντός μιας επίπεδης θήκης στεγανοποίησης και έτσι μετατρέπεται σε μοντέλο αξονικής (axial) κάμερας. Όμοια με τους Telem & Filin (2010) προτείνουν τη βαθμονόμηση του συστήματος βάσει ενός ιδεατού προβολικού συστήματος που προσομοιάζει αυτό μιας τυπικής κάμερας σημειακής οπής. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη το συντελεστή διάθλασης του θαλασσινού νερού, με την τιμή του να επηρεάζεται από την αλατότητα, το πάχος της επιφάνειας της θήκης και την απόσταση του πραγματικού προβολικού κέντρου της κάμερας από την επιφάνεια της θήκης. Η διαδικασία της βαθμονόμησης διενεργείται σε 4 εκδοχές: (i) εκτός νερού σε τυπική διαδικασία βαθμονόμησης με φωτογράφιση του πεδίου, (ii) εντός (θαλασσινού) νερού με διορθωμένο το συντελεστή διάθλασης βάσει μετρήσεων της αλατότητας, (iii) εντός (γλυκού) νερού χωρίς διορθωμένο συντελεστή διάθλασης και (iv) εκτός νερού με ενσωμάτωση του συντελεστή και συνόρθωση του γεωμετρικού μοντέλου Pinax. Και στις 4 βαθμονομήσεις, οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι υπολογίζονται με βάση τη μέθοδο βαθμονόμησης του Zhang (2000). Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι, με διόρθωση και ενσωμάτωση του συντελεστή

διάθλασης στην επίλυση της βαθμονόμησης, η διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί επιτυχώς εκτός νερού.

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες μελέτες, οι Rahman et al. (2013) επισημαίνουν την ανάγκη βαθμονόμησης μιας υποβρύχιας κάμερας ή ενός συστήματος υποβρύχων καμερών *in situ*. Συγκεκριμένα, βαθμονομούν στερεοσκοπικό σύστημα δύο καμερών (με επίπεδες θήκες) με χρήση ενός τρισδιάστατου πεδίου βαθμονόμησης (κύβος, στις πλευρές του οποίου διακρίνεται μοτίβο κανάβου), τόσο εκτός νερού όσο και εντός, με εφαρμογή των αλγορίθμων βαθμονόμησης των Heikkila (2000) και Rahman - Krouglicof (2011). Με τρισδιάστατη ανακατασκευή του πεδίου βαθμονόμησης και αξιολόγηση των σφαλμάτων ανακατασκευής (*reconstruction errors*) για τα 4 σετ επιλύσεων (δοκιμές 2 αλγορίθμων για 2 σετ εικόνων), ο αλγόριθμος των Rahman - Krouglicof αποδεικνύεται αποτελεσματικότερος των δύο για περιπτώσεις βαθμονόμησης στερεοσκοπικών συστημάτων καμερών εντός νερού. Ο Heikkila (2000) προτείνει την πλήρη κάλυψη του καρέ και των δύο εικόνων από το πεδίο βαθμονόμησης για τη βέλτιστη δυνατή βαθμονόμηση, κάτι που είναι αδύνατο στην περίπτωση των στερεοσκοπικών λήψεων. Ο αλγόριθμος των Rahman - Krouglicof στηρίζεται στην απλούστευση του Ιακωβιανού πίνακα, κατά το στάδιο της - μη γραμμικής - βελτιστοποίησης της συνόρθωσης, περιγράφοντας τη γεωμετρία του μοντέλου και τον τρισδιάστατο χώρο μέσω του συστήματος των τετραδονίων (*unit quaternions*).

Οι θολωτές θήκες, από την άλλη μεριά, αν και θεωρητικά δημιουργήθηκαν με σκοπό τη διόρθωση των βασικών επιδράσεων της διάθλασης, όπως είναι η κάθετη διέλευση των ακτίνων από τα διαφορετικά μέσα μέσω της ταύτισης του προβολικού κέντρου της κάμερας με το κέντρο της σφαίρας του θόλου, στην πραγματικότητα η ταύτιση αυτή δεν είναι εφικτή. Οι She et al. (2019) προτείνουν μία μέθοδο βαθμονόμησης του συστήματος “κάμερα - θολωτή θήκη” αποτελούμενη από πέντε βήματα:

- (i) βαθμονόμηση πεδίου εκτός νερού για τον μετασχηματισμό των τρισδιάστατων σημείων του πεδίου στο χώρο σε δισδιάστατα σημεία στο επίπεδο της εικόνας και εκτίμηση των παραμέτρων εσωτερικής γεωμετρίας του συστήματος (εστιακή απόσταση, θέση πρωτεύοντος σημείου, διαστρόφες φακών) με χρήση του Bouguet Toolbox.
- (ii) ευθυγράμμιση της θολωτής θήκης με την κάμερα, με βιδωτό μηχανισμό, με τρόπο ώστε η διάθλαση λόγω απόκλισης προβολικού κέντρου και κέντρου θόλου, είτε να διορθώνεται πλήρως, είτε να θεωρείται αμελητέα. Η διαδικασία της ευθυγράμμισης αξιολογείται με οπτικό έλεγχο (Εικόνα 3.14) και αποτελέσματά της θεωρούνται αποδεκτά όταν το μερικώς βυθισμένο πεδίο προβάλλεται ενιαίο.

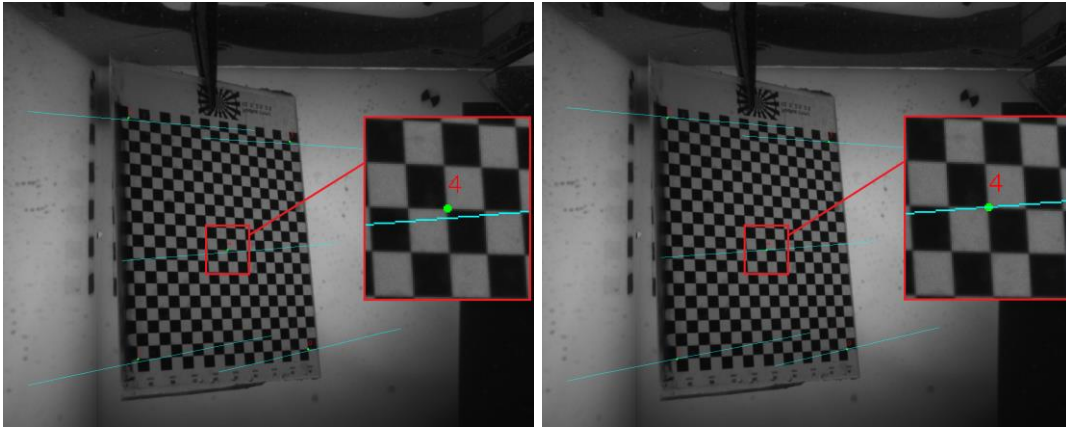


Εικόνα 3.14: Διαδικασία ευθυγράμμισης θόλου, με μερική βύθιση του πεδίου βαθμονόμησης και οπτικό έλεγχο, για την απαλοιφή της διάθλασης (She et al., 2019).

- (iii) φωτογράφιση του πεδίου βαθμονόμησης (σκακιέρας) σε δεξαμενή χωρίς νερό (σε αέρα) και επίλυση του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων.
- (iv) φωτογράφιση του πεδίου βαθμονόμησης (σκακιέρας) στην ίδια δεξαμενή, με νερό, και επίλυση του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων.

- (v) προσδιορισμός της ελάχιστης εναπομένουσας απόστασης (offset) μεταξύ του κέντρου του θόλου και του προβολικού κέντρου της κάμερας, που ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ των δισδιάστατων συντεταγμένων των αποτελεσμάτων των σχετικών προσανατολισμών στα βήματα (iii) και (iv).

Η μέθοδος της μηχανικής, βιδωτής, ευθυγράμμισης, απέδωσε μία ακρίβεια της τάξης μερικών μμ. Με εκτίμηση των επιπολικών ευθειών των κορυφών της σκακιέρας μεταξύ ζευγών εικόνων για τις βαθμονομήσεις εκτός και εντός νερού, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στον προσδιορισμό των επιπολικών ευθειών μετά από τη βαθμονόμηση του συστήματος βάσει του εκτιμώμενου offset (Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15: Επιπολικές ακτίνες κορυφών της σκακιέρας πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη βαθμονόμηση του εναπομένουσας σφάλματος μετατόπισης από τη διαδικασία της ευθυγράμμισης (She et al., 2019).



## 4 | Το πρόβλημα SfM υπό την επίδραση της διάθλασης (Refractive SfM)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο επιχειρήθηκε εκτενής βιβλιογραφική αναζήτηση και περιγραφή του τρόπου σχηματισμού της υποβρύχιας εικόνας και της γεωμετρίας του συστήματος “κάμερα - θήκη στεγανοποίησης-υποβρύχια σκηνή”. Η ανάγκη βαθμονόμησης αυτού του συστήματος, για την αποκατάσταση της εσωτερικής του γεωμετρίας και τον προσδιορισμό των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας όπως διαμορφώνονται υπό την επίδραση του φαινομένου της διάθλασης, αποτελεί το πρώτο καθοριστικό στάδιο της τρισδιάστατης ανακατασκευής ενός υποβρύχιου αντικειμένου. Πέραν αυτού όμως, οι ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος (μεταξύ των οποίων οι περιορισμοί στην απόσταση λήψης των εικόνων και στο χρόνο παραμονής του παρατηρητή και της κάμερας υποβρυχίως) επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος του προς τεκμηρίωση αντικειμένου, με τρόπο που για την ολοκληρωμένη κάλυψη ευρύτερων περιοχών ενδιαφέροντος να απαιτείται η συλλογή μεγάλου αριθμού εικόνων, χωρίς αυστηρές γεωμετρικές δεσμεύσεις λήψης (διαφορετικές αποστάσεις και γωνίες, μη διαδοχικές εικόνες, άτακτα στερεοζεύγη) και με ποικίλες ραδιομετρικές συνθήκες (διαφοροποίηση φωτιστικών συνθηκών, θολότητα).

Το πρόβλημα της τρισδιάστατης ανακατασκευής του χώρου από τέτοιου είδους εικόνες, που συλλέγονται με κίνηση του παρατηρητή (εν προκειμένω μιας υποβρύχιας κάμερας που είτε κρατά ένας δύτης είτε φέρεται από υποβρύχιο όχημα) είναι γνωστό με τον όρο Δομή από Κίνηση (SfM - Structure from Motion). Στόχος του προβλήματος SfM είναι η εκτίμηση των θέσεων λήψης κάθε εικόνας με ταυτόχρονο πυκνό προσδιορισμό των τρισδιάστατων σημείων του χώρου. Η τυπική διαδικασία SfM έχει ως αφετηρία την εξαγωγή 2D - 2D ομολογιών μεταξύ των εικόνων, μέσω της εφαρμογής σημειακών τελεστών για την ανίχνευση και συνταύτιση χαρακτηριστικών σημείων. Στη συνέχεια, με υπολογισμό του επιτολικού πίνακα των εικόνων ανά δύο, προσδιορίζεται η σχετική θέση τους. Από τον σχετικό προσανατολισμό των δύο εικόνων υπολογίζεται ένα πλήθος τρισδιάστατων ομόλογων σημείων (μοντέλου), που αντιστοιχούν σε 2D σημεία επί των δύο εικόνων. Μία νέα εικόνα μπορεί έπειτα να προστεθεί στη συνόρθωση και να προκύψουν νέες 2D ομολογίες με τις ήδη προσανατολισμένες εικόνες, και κατ’ επέκταση να προσδιοριστούν οι σχετικές θέσεις των καμερών της επίλυσης βάσει των τελικών 3D ομόλογων σημείων. Γενικά, ο έλεγχος για χονδροειδή εναπομένοντα σφάλματα πραγματοποιείται με εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC (Random Sample Consensus) ώστε να απορρίπτονται τα μη αποδεκτά ομόλογα σημεία. Τελικά, οι έγκυρες ομολογίες σε όλες τις εικόνες συνορθώνονται, ως παρατηρήσεις, με τη μέθοδο της δέσμης (bundle adjustment) και, μέσω μη γραμμικής επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι την ελαχιστοποίηση του σφάλματος επαναπροβολής των ομόλογων σημείων, βελτιστοποιείται ο σχετικός προσανατολισμός όλων των εικόνων, σε αυθαίρετο σύστημα. Οι εξισώσεις παρατήρησης κατά τη συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης, για τον μετασχηματισμό των ομολογιών από δισδιάστατα σημεία πολλών εικόνων σε τρισδιάστατα σημεία του χώρου, περιγράφονται από τη συνθήκη συγγραμμικότητας.

Όπως όμως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συνθήκη συγγραμμικότητας αδυνατεί να περιγράψει αυστηρά τον μετασχηματισμό αυτό όταν τα ομόλογα σημεία ανήκουν σε υποβρύχιες εικόνες οι οποίες έχουν σχηματιστεί με επίδραση του φαινομένου της διάθλασης. Έτσι, η ανάγκη αποκατάστασης της εσωτερικής γεωμετρίας του συστήματος “κάμερα - θήκη - υποβρύχια σκηνή” επεκτείνεται στην εφαρμογή των αλγορίθμων SfM. Η γενική περίπτωση του προβλήματος SfM που αφορά το μοντέλο κεντρικής (προοπτικής) προβολής της κάμερας σημειακής οπής, στην περίπτωση των υποβρύχιων εικόνων μετατρέπεται σε μοντέλο “διαθλαστικής” προβολής, εκείνο δηλαδή μιας γενικότερης κατηγορίας καμερών, των nSVP (non Single View Point), που έχουν προαναφερθεί, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την απουσία ενιαίου προβολικού κέντρου. Στη διεθνή βιβλιογραφία, το πρόβλημα SfM σε υποβρύχιες λήψεις απαντάται συνήθως ως “διαθλαστικό SfM” (Refractive SfM ή RSfM) για να τονίσει την επίδραση της διάθλασης στη γεωμετρία του συστήματος και να διαφοροποιήσει τους νόμους της επιπολικής γεωμετρίας, αντικαθιστώντας έτσι το κλασικό προοπτικό μοντέλο (Perspective SfM). Αν και η γεωμετρία της ακτίνας κατά τη διάδοσή της σε διαφορετικά μέσα έχει αναλυθεί επανειλημμένως (Li et al., 1997; Telem et al., 2010; Treibitz et al., 2011; Agrawal et al., 2012; Shortis, 2015 κ.ά.), η γνώση αυτή έχει αξιοποιηθεί κυρίως στο στάδιο της βαθμονόμησης ενός συστήματος υποβρύχιας κάμερας, εισάγοντας τις νέες παραμέτρους στο γνωστό μοντέλο επιπολικής γεωμετρίας για την τρισδιάστατη ανακατασκευή υποβρύχιων σκηνών. Οι Joridt-Sedlazeck & Koch (2013) ενσωματώνουν πληρέστερα το φαινόμενο της διάθλασης, μοντελοποιώντας τη γεωμετρία καμερών εντός θηκών επίπεδης θήκης (ακόμα και μεγάλου πάχους υλικού, όπως αυτές των υποβρύχιων οχημάτων που επιχειρούν σε μεγάλα βάθη), πολύ πέραν του βήματος της βαθμονόμησης, στα στάδια του προβλήματος SfM, από τον σχετικό προσανατολισμό δύο εικόνων ως και την τελική συνόρθωση δέσμης (bundle adjustment) μεγάλου πλήθους εικόνων.

#### **4.1 Ανίχνευση και αντιστοίχιση χαρακτηριστικών σημείων**

Πρώτο στάδιο μιας διαδικασίας βαθμονόμησης κάμερας, μιας διαδικασίας εκτίμησης θέσης ή γενικότερα μιας τρισδιάστατης ανακατασκευής είναι η ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε εικόνα και η αντιστοίχισή τους, στη συνέχεια, μεταξύ των εικόνων. Σε σύνολα εικόνων διαφορετικών κλιμάκων και προσανατολισμών (η συνηθέστερη περίπτωση συλλογής υποβρύχιων εικόνων με σκοπό την τρισδιάστατη ανακατασκευή) η επιλογή ανιχνευτών τοπικών χαρακτηριστικών γίνεται με βασικό κριτήριο τη δυνατότητα εξαγωγής των ίδιων τοπικών χαρακτηριστικών ακόμα και αν η κλίμακα των εικόνων ποικίλει. Έτσι, οι μέθοδοι ανίχνευσης και περιγραφής τοπικών χαρακτηριστικών που συνήθως επιλέγονται, εν προκειμένω ανήκουν στην κατηγορία των αμετάβλητων σε μεταβολές κλίμακας (scale-invariant), με πιο δημοφιλείς τους τελεστές SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) και SURF (Speeded-Up Robust Features). Η επιτυχία των τελεστών SIFT και SURF στηρίζεται αφενός, γεωμετρικά, στην ανεξαρτησία τους από μεταβολές σε κλίμακα, στροφές και εν μέρει αφινικούς μετασχηματισμούς και, αφετέρου, στην αποτελεσματικότητά τους ακόμα και μετά την επίδραση συχνών φαινομένων στο σχηματισμό της υποβρύχιας εικόνας (ύπαρξη έντονου θορύβου, αλλαγή του σημείου θέασης, απότομες αλλαγές στη ραδιομετρία). Σε κάθε περίπτωση πάντως, η επιτυχία της εκάστοτε μεθόδου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην προεπεξεργασία των υποβρύχιων εικόνων (ενίσχυση και αποκατάσταση εικόνας).

Πολύ συνοπτικά, ο τελεστής SIFT αποτελείται από μία ακολουθία επιμέρους σταδίων, που ξεκινά με τη δημιουργία πυραμίδας εικόνων DoG (Difference of Gaussians), που προκύπτει από εφαρμογή στην αρχική εικόνα σειράς διαδοχικών φίλτρων εξομάλυνσης διαφορετικής τυπικής απόκλισης, στις οποίες εντοπίζονται ακρότατα σε αυτόν τον χώρο κλίμακας (scale space). Η αναζήτηση γίνεται συνολικά στην εικόνα, ενώ για κάθε εξαγόμενο χαρακτηριστικό σημείο καταγράφεται η κλίμακα και η θέση του, ενώ του αποδίδεται ακόμα μέτρο και προσανατολισμός της κλίσης της αντίστοιχης εικόνας στη γειτονιά του. Για κάθε γειτονιά εικονοψηφίδων που περικλείει κάποιο υποψήφιο χαρακτηριστικό σημείο υπολογίζονται οι τοπικοί προσανατολισμοί της κλίσης του, που τελικά αποδίδουν στο σημείο τον περιγραφέα του (descriptor). Οι ομολογίες μεταξύ εικόνων αποκαθίστανται με σύγκριση αυτών των περιγραφέων. Η ανεξαρτησία από τις εκάστοτε κλίμακες των εικόνων επιτυγχάνεται έτσι με εφαρμογή του αλγορίθμου σε διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης της εικόνας, ενώ με ορισμό κατάλληλου κατωφλίου, αποκλείονται οι πολύ υψηλές τιμές κλίσης, επιτυγχάνοντας ανεξαρτησία απέναντι σε μη γραμμικές μεταβολές της ραδιομετρίας (Lowe, 2004). Οι Jordt & Koch (2013), Hernández et al. (2016), Andono et al. (2013), Bryson et al. (2016) και Erič et al. (2016) είναι ορισμένοι από τη μεγάλη πλειοψηφία των ερευνητών που επιλέγουν εφαρμογή του τελεστή SIFT για το στάδιο της ανίχνευσης ομολογιών μεταξύ υποβρύχιων εικόνων.

Ο τελεστής SURF (Bay et al., 2006) αποτελεί απλούστερη εκδοχή του SIFT, με παρόμοιες ιδιότητες ανεξαρτησίας από κλίμακα και στροφές, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μειωμένο υπολογιστικό κόστος που επιτυγχάνεται με τη χρήση “ολοκληρωτικών εικόνων” (integral images). Η λειτουργία του SURF βασίζεται στον “Ταχύ Εσσιανό Πίνακα” (Fast Hessian Matrix) για την ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων και σε συνδυασμό με τις ολοκληρωτικές εικόνες επιτυγχάνεται γρήγορος, σε πραγματικό χρόνο, υπολογισμός αποκρίσεων τετραγωνικών φίλτρων (box-type). Κάθε χαρακτηριστικό σημείο που εντοπίζεται περικλείεται εντός τετράγωνης περιοχής που αντιστοιχεί σε ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα (feature vector). Αυτό το διάνυσμα-περιγραφέας που ανιχνεύεται σε κάθε εικόνα επιτρέπει τη συνταύτιση μεταξύ των επικαλυπτόμενων εικόνων. Και εδώ η αντιστοίχιση πραγματοποιείται με υπολογισμό της απόστασης (π.χ. Ευκλείδειας) μεταξύ των διανυσμάτων. Η διάσταση του περιγραφέα επηρεάζει άμεσα τον χρόνο υπολογισμού: όσο μικρότερες οι διαστάσεις, τόσο ταχύτερη η λύση. Για την αποσύνδεση διαστάσεων περιγραφέα και χρόνου υπολογισμού, ο SURF χρησιμοποιεί τις ολοκληρωτικές εικόνες, οπότε ακόμη και με τετραγωνικά φίλτρα μεγάλου μεγέθους ο υπολογισμός των συνελίξεων να πραγματοποιείται σε σταθερό χρόνο. Οι Prabhakar & Kumar (2012) επιλέγουν τον τελεστή SURF για την ανίχνευση, σε συνδυασμό με τον περιγραφέα Center-Symmetric Local Binary Patterns (CS-LBP) για την περιγραφή χαρακτηριστικών σημείων, σε δεδομένα υποβρύχιων εικόνων με έντονες ραδιομετρικές μεταβολές. Οι Mahiddine et al. (2012) χρησιμοποιούν και τους δύο τελεστές SIFT και SURF συνδυαστικά, εκμεταλλευόμενοι την αποτελεσματικότητα του πρώτου και την ταχύτητα του δεύτερου, στο πλαίσιο μιας έρευνας σε τρία επίπεδα (ενίσχυση εικόνας, επιλογή κατάλληλου ανιχνευτή-περιγραφέα, μέθοδοι υπολογισμού διανυσμάτων χαρακτηριστικών σημείων κατά τη συνταύτιση εικόνων) σχετικά με την προεπεξεργασία των εικόνων πριν από την τρισδιάστατη ανακατασκευή.

Οι Singh et al. (2007), από την άλλη μεριά, επέλεξαν τον ανιχνευτή Harris (Harris & Stephens, 1988) κατά τα σχετικά στάδια επίλυσης των προβλημάτων SfM και SLAM, με επεξεργασία συνόλων εικόνων από υποβρύχια οχήματα. Ο Harris ανήκει στην κατηγορία των ανιχνευτών

γωνιών (corner detector) και βασίζεται στην τοπική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (local autocorrelation function) που περιγράφει την αλλαγή της έντασης της φωτεινότητας, τοπικά, σε μία γειτονιά περί ένα χαρακτηριστικό σημείο. Με ορισμό ενός τετραγωνικού Γκαουσιανού φίλτρου (παραθύρου) που μετατοπίζεται προς κάθε κατεύθυνση, αναζητείται ουσιαστική μεταβολή έντασης σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις· εντοπίζεται δηλαδή αν ένα χαρακτηριστικό σημείο ανήκει σε γωνία, σε ακμή ή σε περιοχή ομοιόμορφης έντασης. Οι συγγραφείς προσάρμοσαν τον Harris με τρόπο ώστε να καθορίζει μία γειτονιά ενός σημείου ενδιαφέροντος, ανεξάρτητη από αφινικούς μετασχηματισμούς, που μετακινείται γραμμικά στην εικόνα. Σε κάθε γραμμή επιλέγονται τα ακρότατα (μέγιστα), ως οι διαφορές του σημείου ενδιαφέροντος με τα γειτονικά σημεία πάνω στη γραμμή, με αποτέλεσμα το σύνολο των μεγίστων να ορίζει το όριο μιας περιοχής που μπορεί να εξαχθεί ακόμα και μετά από αφινικούς μετασχηματισμούς. Τα σημεία ενδιαφέροντος, τέλος, περιγράφονται με χρήση περιγραφικών - γεωμετρικών ροπών, μεταξύ των οποίων ιδιαίτερα διαδεδομένες σε εφαρμογές αναγνώρισης προτύπου, είναι οι περιγραφείς Zernike που βασική τους ιδιότητα είναι ότι παραμένουν αμετάβλητοι σε αυθαίρετες περιστροφές του αντικειμένου που περιγράφουν (Pizarro et al., 2003).

## 4.2 Σχετικός προσανατολισμός στερεοζεύγους υποβρύχιων εικόνων

Η ανίχνευση και αντιστοίχιση ομόλογων σημείων μεταξύ ζεύγους επικαλυπτόμενων εικόνων αποτελεί το πρώτο στάδιο για την αποκατάσταση της αλληλοτομίας ομόλογων οπτικών ακτίνων, μέσω της συνθήκης συνεπιπεδότητας. Ο προσδιορισμός των σχετικών θέσεων και στροφών δύο επικαλυπτόμενων δεσμών, ήτοι το πρόβλημα του σχετικού προσανατολισμού, είναι η αφετηρία για μία ενιαία πολυεικονική συνόρθωση, στο πλαίσιο της επίλυσης ενός προβλήματος SfM, για τον τελικό προσδιορισμό των θέσεων των καμερών και του τρισδιάστατου νέφους των ομόλογων σημείων. Βασικό χαρακτηριστικό για την εκτίμηση της σχετικής θέσης δύο επικαλυπτόμενων εικόνων είναι η αξιοποίηση της εσωτερικής ακρίβειας των εικόνων, καθώς δεν απαιτείται a priori γεωμετρική πληροφορία ή δέσμευση του τρισδιάστατου χώρου του απεικονιζόμενου αντικειμένου (Καλησπεράκης, 2010).

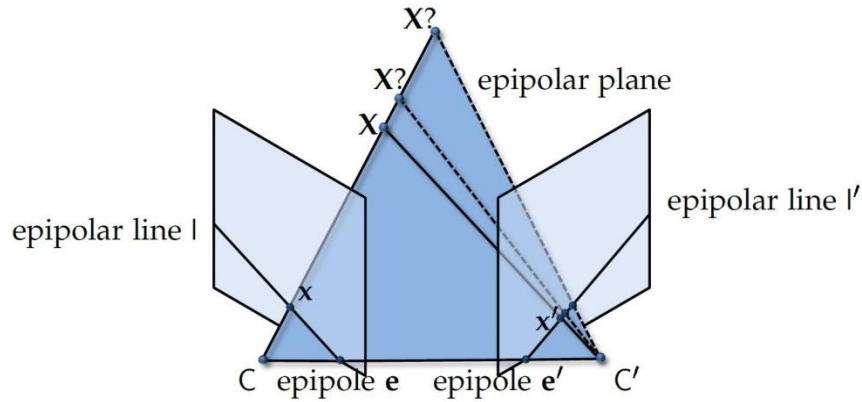
Στην Εικόνα 4.1 αποτυπώνεται η επιπολική γεωμετρία ενός στερεοζεύγους εικόνων· κάθε σημείο  $X$  του αντικειμένου προβάλλεται στην αριστερή και στη δεξιά εικόνα στα σημεία  $x$  και  $x'$ , αντίστοιχα. Από τα προβολικά κέντρα  $C$ ,  $C'$  και τα  $x$ ,  $x'$ , για την αριστερή και τη δεξιά εικόνα αντίστοιχα, ορίζονται δύο ακτίνες, των οποίων σημείο τομής είναι το σημείο  $X$  του αντικειμένου. Η βάση  $B$  του στερεοζεύγους, που ορίζεται από τα προβολικά κέντρα  $C$  και  $C'$ , τέμνει τις εικόνες στα σημεία  $e$  και  $e'$ , που ονομάζονται πόλοι του στερεοζεύγους. Η βάση  $CC'$  και το σημείο  $X$  του χώρου, ή η βάση  $CC'$  και οι ομόλογες ακτίνες  $Cx$  και  $C'x'$ , ορίζουν ένα επίπεδο που ονομάζεται επιπολικό, το οποίο τέμνει τις δύο εικόνες, σε δύο ευθείες  $l$  και  $l'$ , τις επιπολικές ευθείες. Με αφετηρία του συστήματος συντεταγμένων την θέση και τον προσανατολισμό της αριστερής κάμερας, η σχετική θέση της δεξιάς κάμερας ως προς την αριστερή ορίζεται ως

$$[R^T] - R^T C]$$

όπου  $\mathbf{R}$  ο  $2 \times 2$  πίνακας στροφής της δεξιάς εικόνας στο σύστημα αναφοράς της αριστερής και  $\mathbf{C}$  το διάνυσμα της βάσης. Για τον υπολογισμό της επιπολικής ευθείας  $l'$  της δεξιάς εικόνας, ο πόλος  $e'$  ορίζεται ως προς το προβολικό κέντρο της αριστερής εικόνας  $(0,0,0,1)^T$  με τρόπο ώστε

$$e' = K'[R^T - R^T C](0,0,0,1)^T$$

όπου  $\mathbf{K}$  ο πίνακας που περιέχει τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού (σταθερά της μηχανής, εικονοσυντεταγμένες πρωτεύοντος σημείου, πρόσθετες προβολικές παράμετροι aspect ratio  $\alpha$  και skewness  $s$ ).



Εικόνα 4.1: Επιπολική Γεωμετρία. Κάθε σημείο  $X$  του αντικειμένου προβάλλεται σε δύο εικόνες στα σημεία  $x$  και  $x'$ . Οι ευθείες από τα προβολικά κέντρα προς τα σημεία  $x$  και  $x'$ , οι  $Cx$  και  $C'x'$ , μαζί με τη βάση  $CC'$  ορίζουν το επιπολικό επίπεδο. Κάθε σημείο της μίας εικόνας αντιστοιχεί σε μία επιπολική ευθεία της άλλης (Jordt, 2013).

Η αποκατάσταση του σχετικού προσανατολισμού δύο εικόνων από κάμερες γνωστής εσωτερικής γεωμετρίας επιτυγχάνεται με την συνθήκη συνεπιπεδότητας. Για μη βαθμονομημένες κάμερες η επιπολική γεωμετρία αποκαθίσταται μέσω του υπολογισμού του επιπολικού πίνακα  $\mathbf{F}$  (fundamental matrix). Στην περίπτωση γνωστού εσωτερικού προσανατολισμού, η συνθήκη συνεπιπεδότητας προϋποθέτει ότι τα διάνυσμα των δύο ομόλογων οπτικών ακτίνων  $Cx$  και  $C'x'$  είναι συνεπίεδα με το διάνυσμα της βάσης, ενώ στην περίπτωση άγνωστου εσωτερικού οι επιπολικές ευθείες ορίζονται με απευθείας μετάβαση από το επίπεδο της μίας εικόνας στο επίπεδο της άλλης στον δισδιάστατο προβολικό χώρο. Στη δεύτερη περίπτωση, εξετάζεται η σχέση μεταξύ ομόλογων σημείων και ομόλογων ευθειών ως μία μη αντιστρέψιμη ετερογραφία, κατά την οποία κάθε σημείο της μίας εικόνας αντιστοιχεί σε μία επιπολική ευθεία της άλλης εικόνας, οπότε βέβαια σε μία επιπολική ευθεία της μίας εικόνας δεν αντιστοιχεί μόνο ένα σημείο της άλλης (Hartley & Zisserman, 2003; Καλησπεράκης, 2010; Κυπαρίσση, 2011). Η ετερογραφία αυτή περιγράφεται μέσω του επιπολικού πίνακα  $\mathbf{F}$ , η γενική εξίσωση του οποίου περιγράφεται από τη σχέση:

$$l' = F \cdot x \quad \text{και} \quad l = F^T \cdot x'$$

Σύμφωνα με τους Hartley & Zisserman (2003) οι παραπάνω εξισώσεις αποδεικνύουν τη δυνατότητα δέσμευσης του επιπολικού πίνακα αποκλειστικά από τα ομόλογα σημεία:

$$x'^T \cdot F \cdot x = 0$$

Για τον υπολογισμό της επιπολικής ευθείας  $l'$  ισχύει η αντιστοίχιση των ομόλογων σημείων με τις ομόλογες επιπολικές ευθείες, έτσι ώστε

$$l' = [e']_x x'_\infty = [e']_x \underbrace{K'R^TK^{-1}}_{H_\infty} x$$

ενώ για τον επιπολικό πίνακα ισχύει ότι

$$F^T = [e']_x K'R^TK^{-1}$$

Ο επιπολικός πίνακας είναι ένας πίνακας  $3 \times 3$  με βαθμό 2 και 7 βαθμούς ελευθερίας (9 άγνωστες παράμετροι μείον τον βαθμό 2), που συνεπάγεται την ανάγκη προσδιορισμού 7 ομόλογων σημείων για τον υπολογισμό των στοιχείων του.

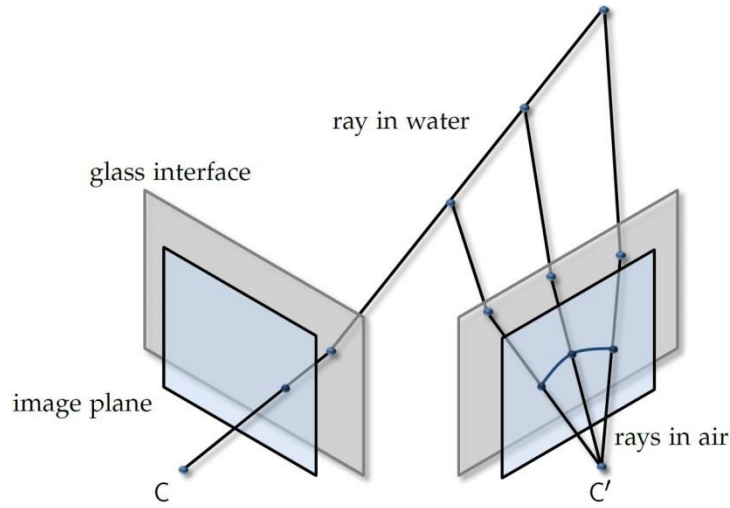
Με γνώση των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας κάθε κάμερας και χρήση των πινάκων  $\mathbf{K}$  και  $\mathbf{K}'$  του εσωτερικού προσανατολισμού των δύο εικόνων, οι 2D - 2D ομολογίες μπορούν να εκφραστούν ως

$$\tilde{x} = K^{-1} x \quad \text{και} \quad \tilde{x}' = K'^{-1} x'$$

και αντί του επιπολικού να προσδιοριστεί ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας  $\mathbf{E}$  (essential matrix).

$$E = K^T F K' = [C]_{\times} R$$

Στην περίπτωση δύο υποβρύχιων εικόνων (σχηματισμένων υπό την επίδραση του φαινομένου της διάθλασης) η κλασική επιπολική γεωμετρία χρήζει επαναδιατύπωσης. Στην Εικόνα 4.2 οι επιπολικές ευθείες μετατρέπονται, μετά από διαδοχικές διαθλάσεις, κατά τη διάδοση των ακτίνων στα μέσα αέρα, γυαλιού και νερού, σε επιπολικές “καμπύλες”.



Εικόνα 4.2: Γενικευμένη επιπολική γεωμετρία για την περίπτωση των υποβρύχιων λήψεων. Αντικατάσταση των επιπολικών ευθειών με επιπολικές “καμπύλες” (Maas, 1992).

Για τον ορισμό ακτίνας  ${}^{cc}\tilde{X}_a$ , που ξεκινά από το προβολικό κέντρο της κάμερας με πορεία σε περιβάλλον αέρα μέχρι να συναντήσει το επίπεδο της θήκης (έστω γυαλί), από όπου και τελικά διαθλάται και μετασχηματίζεται σε  ${}^{cc}\tilde{X}_g$ , ισχύει ότι

$${}^{cc}\tilde{X}_a = \frac{K^{-1}x}{\|K^{-1}x\|_2}$$

$${}^{cc}X_g = \frac{n_a}{n_g} {}^{cc}\tilde{X}_a + \left(-\frac{n_a}{n_g} {}^{cc}\tilde{X}_a^T \tilde{n} + \sqrt{1 - \frac{n_a}{n_g} (1 - ({}^{cc}\tilde{X}_a^T \tilde{n})^2)}\right) \tilde{n}$$

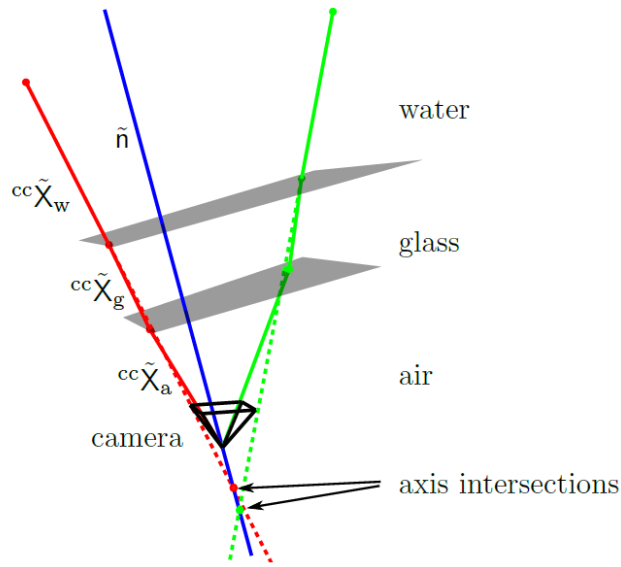
όπου  $\mathbf{K}^{-1}$  ο αντίστροφος του πίνακα  $\mathbf{K}$ ,  $n_a$  και  $n_g$  οι δείκτες διάθλασης του αέρα και του νερού (νόμος του Snell) και  ${}^{wc}, {}^{cc}$  το σύστημα συντεταγμένων του συστήματος (world coordinates) και της κάμερας (camera coordinates), αντίστοιχα. Με αφετηρία, στη συνέχεια, το διάνυσμα  ${}^{cc}\tilde{X}_g$  υπολογίζεται αντίστοιχα η ακτίνα  ${}^{cc}\tilde{X}_w$  όπως αυτή σχηματίζεται στο νερό μετά από τη διάθλασή της από τη γυάλινη επιφάνεια της θήκης (Jordt et al., 2016). Για κάθε ακτίνα  ${}^{cc}\tilde{X}_w$  ορίζεται ένα σημείο,  ${}^{cc}X_s$ , ως αφετηρία της ακτίνας στο νερό, που ξεκινά από τη γυάλινη επιφάνεια, αμέσως μετά τη διάθλαση:

$${}^{cc}X_s = \frac{d}{{}^{cc}\tilde{X}_a^T \tilde{n}} {}^{cc}\tilde{X}_a + \frac{d_g}{{}^{cc}\tilde{X}_g^T \tilde{n}} {}^{cc}\tilde{X}_g$$

Με μετασχηματισμό της ακτίνας από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της κάμερας ( ${}^{cc}$ ) στο σύστημα αναφοράς του συστήματος ( ${}^{wc}$ ) προκύπτει ότι

$${}^{wc}X_S = R^{cc}X_S + C \quad \text{και} \quad {}^{wc}\tilde{X}_W = R^{cc}\tilde{X}_W$$

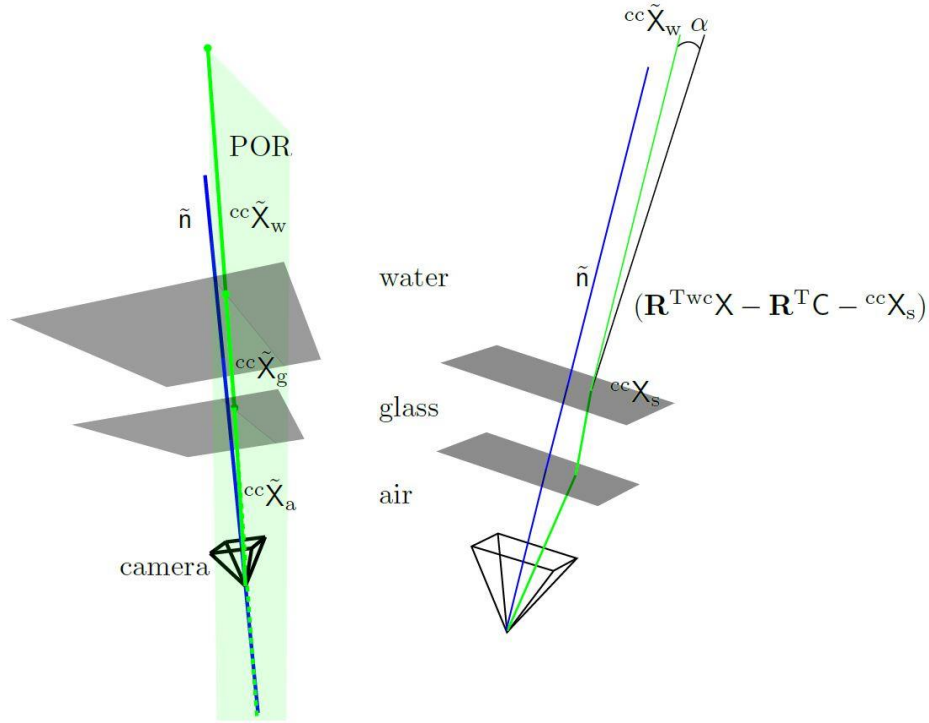
Οι Agrawal et al. (2012) επεσήμαναν δύο ακόμα βασικές ιδιότητες της διάθλασης με επιπτώσεις πάνω στα υποβρύχια συστήματα καμερών. Σύμφωνα με την πρώτη ιδιότητα, όλες οι διαθλώμενες ακτίνες τέμνουν έναν κοινό άξονα, τον  $\tilde{n}$ , που ορίζεται από το προβολικό κέντρο και προσπίπτει κάθετα στις επιφάνειες διάθλασης (Εικόνα 4.3). Η τομή των προεκτάσεων των ακτίνων (διακεκομμένες γραμμές στην Εικόνα 4.3) δεν συμπίπτει με το προβολικό κέντρο της κάμερας, κάτι που αποδεικνύει την ασυμβατότητα με το κλασικό προοπτικό μοντέλο της κάμερας σημειακής οπής.



Εικόνα 4.3: Επίπεδα διάθλασης και διαθλώμενες ακτίνες (Jordt et al., 2016).

Επίσης, αξιοποιώντας το δεύτερο μέρος του νόμου του Snell, απέδειξαν ότι όλα τα τμήματα μιας διαθλώμενης ακτίνας καθώς και ο άξονας  $\tilde{n}$  βρίσκονται σε ένα κοινό επίπεδο, το επίπεδο της διάθλασης (POR - Plane of Refraction), για το οποίο προκύπτει η γεωμετρική δέσμευση (γνωστή ως POR constraint) ότι κάθε 3D σημείο, μετασχηματισμένο στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας πρέπει να βρίσκεται επίσης στο επίπεδο POR (Εικόνα 4.4, αριστερά).

$$(R^T {}^{wc}X - R^T C)^T (\tilde{n} \times {}^{cc}\tilde{X}_W) = 0$$



Εικόνα 4.4: Αριστερά: POR (Plane of Refraction) το επίπεδο της διάθλασης όπως προκύπτει από τα διανύσματα των διαθλώμενων ακτίνων και του άξονα κεντρικής προβολής  $\tilde{n}$ . Δεξιά: FRC (Flat Refractive Constraint), κατά το οποίο ένα 3D σημείο στο σύστημα της κάμερας που μεταφέρεται στο σημείο,  $X_s$ , πρέπει να παρουσιάζει μηδενική γωνία ( $\alpha$ ) με την οπτική ακτίνα στο νερό (Jordt et al., 2016).

Η δεύτερη γεωμετρική δέσμευση που προτείνουν οι Agrawal et al. (2012), η FRC (Flat Refractive Constraint) ορίζει ότι για ένα 3D σημείο στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας, αν μεταφερθεί στο σημείο διάθλασης  ${}^{cc}X_s$ , η προέκταση της ακτίνας του ως το προβολικό κέντρο πρέπει να παρουσιάζει μηδενική γωνία απόκλισης από την ακτίνα στο νερό  ${}^{cc}\tilde{X}_w$  (Εικόνα 4.4, δεξιά).

$$({}^{R^T} {}^{wc}X - {}^{R^T} C - {}^{cc}X_s) \times {}^{cc}\tilde{X}_w = 0$$

Αντί για την αντιστοίχιση ομόλογων σημείων της πρώτης εικόνας σε επιπολικές ευθείες της δεύτερης εικόνας όπως περιγράφηκε παραπάνω, ο Pless (2003) χρησιμοποιεί τις ευθείες Plücker για να περιγράψει τις ακτίνες κάθε ομόλογου σημείου, όπως αυτές διαμορφώνονται μετά από τη διάθλασή τους, σε ένα σύστημα κάμερας “γενικευμένης” γεωμετρίας (generalized multi-camera system), όπως είναι αυτό μιας αξονικής (axial) κάμερας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, για κάθε σημείο  $x(x, y)$  στο προβολικό επίπεδο  $\mathbb{R}^2$  μίας εικόνας, η ευθεία Plücker  $(K(x, y, 1)^T, 0)$  μπορεί να προσδιοριστεί με την προϋπόθεση ότι οι εσωτερικές παράμετροι της κάμερας και η γεωμετρία της θήκης είναι γνωστές.

Όπως στις περισσότερες περιπτώσεις σχετικού προσανατολισμού δύο εικόνων, όπου αρχή του συστήματος αναφοράς (του συστήματος συντεταγμένων) είναι η πρώτη εικόνα, οπότε ζητείται η σχετική θέση της δεύτερης ως προς αυτήν, έτσι και στην περίπτωση δύο υποβρύχιων λήψεων διατηρείται η ίδια υπόθεση. Για το λόγο αυτό, για όλες τις ακτίνες της πρώτης εικόνας ισχύει ότι  ${}^{cc}\tilde{X}_w = {}^{wc}\tilde{X}_w$  και  ${}^{cc}X_s = {}^{wc}X_s$ . Αυτό που ζητείται να υπολογιστεί είναι οι πίνακες στροφής και μεταθέσης της δεύτερης εικόνας ως προς της πρώτη. Μία γραμμική προσέγγιση βασισμένη στην τομή των ευθειών Plücker που προτείνουν οι Jordt et al. (2016) για τις 2D - 2D ομολογίες είναι:



$$\begin{aligned}
0 &= {}^{wc}\tilde{X}_w^T (R({}^{cc}\tilde{X}'_w \times {}^{cc}X'_S) - [C]_x R {}^{cc}\tilde{X}'_w) + ({}^{wc}\tilde{X}_w \times {}^{wc}X_S)^T (R {}^{cc}\tilde{X}'_w) \\
&= \begin{pmatrix} {}^{wc}\tilde{X}_w \\ {}^{wc}\tilde{X}_w \times {}^{wc}X_S \end{pmatrix}^T \underbrace{\begin{pmatrix} -[C]_x R & R \\ R & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}}_{E_{GEC}} \begin{pmatrix} {}^{cc}\tilde{X}'_w \\ ({}^{cc}\tilde{X}'_w \times {}^{cc}X'_S) \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

όπου  $E_{GEC}$  είναι η επαναδιατύπωση του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα, ενώ η παραπάνω εξίσωση, κατά τον Pless (2003), ονομάζεται γενικευμένη επιπολική δέσμευση (Generalized Epipolar Constraint - GEC).

Αντίστοιχα με τους Agrawal et al. (2012), οι Jordt et al. (2016) εξετάζουν τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης της δεύτερης εικόνας ως προς την πρώτη, βάσει τριών γεωμετρικών δεσμεύσεων. Σύμφωνα με την πρώτη δέσμευση, η τομή δύο ακτίνων στο νερό σε ένα 3D σημείο μπορεί να εκφραστεί από την εξής εξίσωση τριγωνισμού:

$${}^{wc}X_S + \kappa {}^{wc}\tilde{X}_W = R {}^{cc}X'_S + C + \kappa' R {}^{cc}\tilde{X}'_W$$

όπου  $R$  και  $C$  ο πίνακας στροφής και το διάνυσμα μετάθεσης της δεύτερης εικόνας ως προς την πρώτη,  $({}^{wc}X_S, {}^{wc}\tilde{X}_W)$  και  $({}^{cc}X'_S, {}^{cc}\tilde{X}'_W)$  οι ακτίνες στο νερό για τα ομόλογα σημεία στις δύο εικόνες και  $\kappa, \kappa'$  οι συντελεστές κλίμακας των ακτίνων, ώστε οι τελευταίες να συγκλίνουν στο νερό στο ίδιο σημείο. Η δεύτερη γεωμετρική δέσμευση αποτελεί εφαρμογή της υπόθεσης FRC (Flat Refractive Constraint), για την ανίχνευση και τον μετασχηματισμό μίας ακτίνας της δεύτερης εικόνας στο σύστημα της πρώτης εικόνας:

$$(R {}^{cc}X'_S + C + \kappa' R {}^{cc}\tilde{X}'_W - {}^{wc}X_S) \times {}^{wc}\tilde{X}_W = 0$$

Οι παραπάνω δύο εξισώσεις είναι μη γραμμικές λόγω των  $R, C, \kappa$  και  $\kappa'$  και για το λόγο αυτό απαιτείται η εφαρμογή επαναληπτικών επιλύσεων για τον προσδιορισμό των αγνώστων. Για  $K$  πλήθος ομολογιών, όπου  $\mathcal{K}_k$  και  $\mathcal{K}'_k, k \in \{1, \dots, K\}$ , οι συντελεστές κλίμακας στους οποίους αποδίδεται μία αρχική τιμή που αντιστοιχεί σε 3 m (σύμφωνα με τις συνθήκες ορατότητας υποβρυχίως, αυτή θεωρείται μία τυπική απόσταση κάμερας - αντικειμένου). Έτσι, από τις 6 εξισώσεις που σχηματίζονται από τις 2 προηγούμενες δεσμεύσεις, οι 3 είναι γραμμικά ανεξάρτητες και συνθέτουν ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των  $R$  και  $C$ . Ακολούθως, με εφαρμογή του κανόνα του επιπέδου της διάθλασης (POR constraint) προκύπτει:

$$(R {}^{cc}X'_{S_k} + C + \kappa'_k R {}^{cc}\tilde{X}'_{W_k})^T (\tilde{n} \times {}^{wc}\tilde{X}_{W_k}) = 0$$

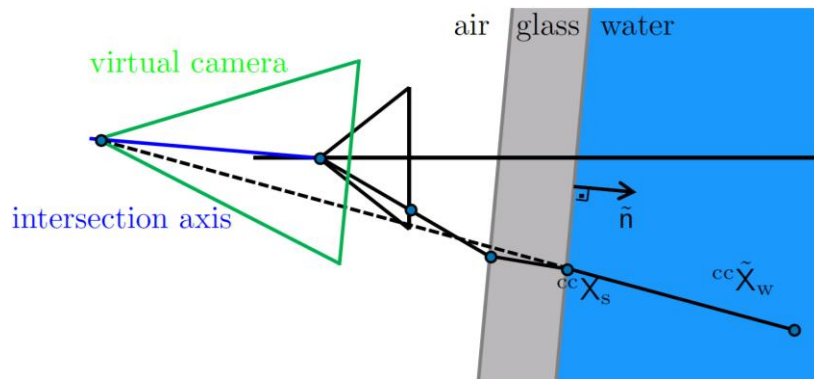
$$(R^T {}^{cc}X_{S_k} - \tilde{R}^T C + \kappa'_k R^T {}^{wc}\tilde{X}_{W_k})^T (\tilde{n} \times {}^{cc}\tilde{X}'_{W_k}) = 0$$

Με υπολογισμό των  $\mathcal{K}_k$  και  $\mathcal{K}'_k$  υπολογίζονται οι πίνακες  $R$  και  $C$ . Ο συνδυασμός των μεθόδων του Pless (2003) και των Jordt et al. (2016) εφαρμόζονται παράλληλα με έναν αλγόριθμο RANSAC για την απαλοιφή των χονδροειδών σφαλμάτων των ομολογιών πριν από την τελική συνόρθωση υπολογισμού του επαναδιατυπωμένου επιπολικού και δεσμευμένου επιπολικού πίνακα.

Κατά την μεταφορά του 3D σημείου από τον τρισδιάστατο προβολικό χώρο  $\mathbb{R}^3$  στο προβολικό επίπεδο της εικόνας  $\mathbb{R}^2$  εμφανίζεται ένα εναπομένον σφάλμα, το σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error), που εκφράζει την απόκλιση που έχουν οι συντεταγμένες του σημείου που τελικά προβάλλεται από το σημείο που αρχικά παρατηρήθηκε στην εικόνα. Για τον υπολογισμό και τη μείωση του σφάλματος επαναπροβολής, οι Jordt et al. (2016) προτείνουν τη δημιουργία μιας εικονικής κάμερας για κάθε παρατήρηση σημείου στο επίπεδο της εικόνας, ο οπτικός άξονας της οποίας ταυτίζεται με την κάθετο στα επίπεδα της διάθλασης άξονα (Εικόνα 4.5). Ο λόγος δημιουργίας καθώς και το πλεονέκτημα της εικονικής κάμερας είναι το ότι οι

μετασχηματισμοί από το επίπεδο της εικόνας στον τρισδιάστατο χώρο και αντίστροφα, προκύπτουν από την ακτίνα όπως αυτή κινείται μόνο μέσα στο νερό με αφετηρία το σημείο  $X_S$  (όπως αυτό προβάλλεται στη γυάλινη επιφάνεια) μέχρι το 3D σημείο του αντικειμένου, αντιμετωπίζοντας την ακτίνα ως μία και μοναδική, για κάθε σημείο, που καταλήγει στο προβολικό κέντρο  $C_v$  της εικονικής κάμερας. Αποφεύγεται με αυτόν τον τρόπο η ενσωμάτωση των διαδοχικών ακτίνων στο σύστημα εξισώσεων των μετασχηματισμών και απλοποιείται σημαντικά η επίλυση. Όλες οι παραπάνω υποθέσεις τους στηρίζονται στο μοντέλο εικονικής κάμερας, με  $(x_0, y_0) = (0,0)$ , χωρίς ακτινική διαστρόφη, που αποτυπώνει τα 3D σημεία του 3D χώρου  $\mathbb{R}^3$  στο προβολικό επίπεδο της εικόνας  $\mathbb{R}^2$ :

$$x = (R^T \mid -R^T C)^w c X$$



Εικόνα 4.5: Για τον προσδιορισμό της θέσης μιας 2D εικόνας, η ομόλογη ακτίνα στο νερό  $X_w$ , τέμνεται από έναν άξονα  $\tilde{n}$  (Interface normal) που ορίζεται από το προβολικό κέντρο, προσπίπτει κάθετα στα επίπεδα της διάθλασης και ταυτίζεται με τον οπτικό άξονα του μοντέλου της εικονικής κάμερας. Έτσι, ο 3D - 2D μετασχηματισμός κάθε 3D σημείου του αντικειμένου πραγματοποιείται μέσω της εικονικής κάμερας, με παράλληλο προσδιορισμό του σφάλματος επαναπροβολής (Jordt et al., 2016).

Με τον σχετικό προσανατολισμό των δύο πρώτων εικόνων, προκύπτει ένα νέφος 3D ομόλογων σημείων μετά από εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας τριγωνισμού και βελτιστοποίησης των ομολογιών, με διατήρηση, τελικά, χαμηλών σφαλμάτων επαναπροβολής. Η βελτιστοποίηση της επίλυσης της σχετικής θέσης της δεύτερης εικόνας ως προς την πρώτη και η εξαγωγή νέφους 3D ομολογιών επιτρέπει την προσθήκη περισσότερων εικόνων στο σύστημα της τρισδιάστατης ανακατασκευής. Η εξαγωγή των ομόλογων σημείων γίνεται στο σύστημα αναφοράς της πρώτης εικόνας (world coordinates) και έτσι μετά τις 2D - 3D ομολογίες με τις νέες προσθήκες εικόνων όλες οι εικόνες του συστήματος προσανατολίζονται σε κοινό, καθορισμένο από την πρώτη εικόνα, σύστημα αναφοράς.

Ακόμα και μετά από την εφαρμογή του RANSAC, στις υποβρύχιες εικόνες, λόγω των ιδιοτήτων του σχηματισμού εικόνας που προαναφέρθηκαν, οι πιθανότητες να μην απαλειφθεί ο θόρυβος (χονδροειδή σφάλματα) στο τρισδιάστατο νέφος των ομόλογων σημείων είναι αυξημένες. Οι Jordt et al. (2016) προτείνουν έναν επαναληπτικό αλγόριθμο για τον υπολογισμό της θέσης κάθε ομόλογου σημείου για κάθε εικόνα, χρησιμοποιώντας πλεονάζουσες παρατηρήσεις ομολογιών (αντί των 3 απαιτούμενων για τον μετασχηματισμό ομοιότητας χρησιμοποιούν 7). Η εξίσωση υπολογισμού της θέσης κάθε ομόλογου σημείου είναι:

$$w c X = R c c X_S + C + \kappa R c c \tilde{X}_w$$

Κάθε νέα εικόνα που προστίθεται στο μοντέλο προσανατολίζεται κατευθείαν με τα υπολογισμένα ομόλογα σημεία, ενώ το τρισδιάστατο νέφος των ομόλογων εμπλουτίζεται με νέα σημεία με παράλληλη διόρθωση των ήδη υπολογισμένων.

### 4.3 Συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης

Με το πέρας του υπολογισμού των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας (ή του συστήματος κάμερας - θήκης εν προκειμένω) καθώς και της σχετικής θέσης (παραμέτροι σχετικού προσανατολισμού) των εικόνων στο χώρο του μοντέλου, τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές μίας μη γραμμικής μεθόδου βελτιστοποίησής τους. Οι θέσεις των εικόνων, το νέφος των ομόλογων σημείων και ο εσωτερικός προσανατολισμός των εικόνων συνορθώνονται ενιαία με τη μέθοδο της δέσμης (bundle adjustment), με τρόπο ώστε ο συνδυασμός τους να προσαρμόζεται βέλτιστα στις παρατηρήσεις εικονοσυντεταγμένων των ομόλογων σημείων, μειώνοντας παράλληλα τα εναπομένοντα σφάλματα, όπως το σφάλμα επαναπροβολής. Η ολοκλήρωση της τελικής συνόρθωσης επηρεάζεται άμεσα από τις αρχικές προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων· πιθανή κακή ποιότητα αρχικών τιμών είναι δυνατό να προκαλέσει έως και αδυναμία σύγκλισης της συνόρθωσης. Κατά την εφαρμογή αλγορίθμων συνόρθωσης με τη μέθοδο της δέσμης, όπου χρησιμοποιούνται ελαχιστοτετραγωνικές συναρτήσεις, υιοθετείται η υπόθεση ότι το σφάλμα παρατήρησης των ομόλογων σημείων είναι κατανομημένο κανονικά (κατανομή Gauss). Έχει παρατηρηθεί (Telem & Filin, 2010; Jordt et al., 2016) ότι σε περιπτώσεις εικονικής κάμερας, διατηρείται η Γκαουσιανή κατανομή των σφαλμάτων παρατήρησης, αποδεικνύοντας ότι η προσέγγιση συνόρθωσης μίας εικονικής κάμερας δεν διαφοροποιείται από τις συνήθεις μεθοδολογίες. Η συχνότερα εμφανιζόμενη μέθοδος συνόρθωσης είναι αυτή του αλγορίθμου Levenberg-Marquardt, του οποίου ωστόσο η ελαχιστοτετραγωνική επίλυση συνεπάγεται τη διαχείριση μεγάλων και σύνθετων πινάκων, κάτι που οδηγεί σε κοστοβόρα, από άποψη χρόνου και υπολογιστικής ισχύος, συνόρθωση.

Σε συνορθώσεις πολλών εικόνων με σημαντικές μεταξύ τους επικαλύψεις (πολλές προβολές για κάθε ομόλογο σημείο ή/και πολλά ομόλογα σημεία σε κάθε εικόνα), σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες των σύγχρονων καμερών, οι παρατηρήσεις που εισάγονται στο σύστημα εξισώσεων είναι πιθανό να είναι της τάξης έως και μερικών εκατομμυρίων. Ο υπολογισμός των θέσεων και του σφάλματος επαναπροβολής ενός πλήθους σημείων που έχουν προκύψει από λήψεις ενός συστήματος στο οποίο οι ακτίνες διαθλώνται από διαφορετικά μέσα, είναι ασύμφορος με εφαρμογή μεθοδολογίας, όπως αυτή των Agrawal et al. (2012) που προτείνουν για την επίλυση ένα πολυώνυμο  $12^{ου}$  βαθμού. Η υπόθεση της εικονικής κάμερας όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, ανακουφίζει το σύστημα από τις υπεράριθμες παρατηρήσεις διαθλωμένων ακτίνων (συνεπώς και 3D σημείων) που μεταφέρουν διαδοχικά σφάλματα επαναπροβολής από τις διαδοχικές διαθλάσεις. Το μαθηματικό μοντέλο που προτείνουν οι Jordt et al. (2016) κατά την ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση είναι το μοντέλο Gauss-Helmert, διότι επιτρέπει τη συνόρθωση παραμέτρων και παρατηρήσεων χωρίς να τα διαχωρίζει, όπως στην περίπτωση ενός μοντέλου Gauss-Markov, όπου δεδομένα και παρατηρήσεις κινούνται στη συνόρθωση βάσει σχετικών δεσμεύσεων.

### 4.4 Πυκνή συνταύτιση υποβρύχιων εικόνων

Με την ολοκλήρωση της επίλυσης του προβλήματος SfM, για τον προσδιορισμό των θέσεων των λήψεων, τον επανυπολογισμό των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της κάμερας ή του συστήματος “κάμερας - θήκης” και τη δημιουργία ενός αραιού νέφους ομόλογων σημείων, σειρά στη διαδικασία μίας ολοκληρωμένης τρισδιάστατης ανακατασκευής έχει η πύκνωση του αραιού νέφους, με εφαρμογή αλγορίθμων πυκνής συνταύτισης (dense image matching). Οι ομολογίες σε μια μέθοδο πυκνής συνταύτισης προέρχονται από συνταύτιση διεικονική (stereo matching) είτε πολυεικονική (multi-view stereo). Σε κάθε περίπτωση αναζητούνται ομολογίες για όλα τα pixels της εικόνας και όχι μόνο για τα χαρακτηριστικά σημεία, με τελικό στόχο την

παραγωγή ενός χάρτη ανομοιοτήτων βάθους, ή ενός χάρτη ψηφιακής παράλλαξης, για κάθε ένα pixel της μίας εικόνας του ζεύγους που ορίζεται ως εικόνα αναφοράς (συνήθως της αριστερής), ώστε να αποδοθεί η πληροφορία της τρίτης διάστασης. Σε έναν χάρτη βάθους, κάθε pixel της εικόνας αναφοράς απεικονίζει, αντί για την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας, την τιμή της απόστασης από το φακό. Τα τέσσερα βασικά στάδια της πυκνής συνταύτισης εικόνων είναι ο υπολογισμός του κόστους συνταύτισης, η συσσωμάτωση του κόστους, η δημιουργία του χάρτη παράλλαξης και η βελτιστοποίηση του χάρτη παράλλαξης (Szeliski, 2010; Καρκάλου, 2016). Σχεδόν όλοι οι αλγόριθμοι πυκνής συνταύτισης στηρίζονται στην επιπολική γεωμετρία του προσανατολισμένου στερεοζεύγους ώστε να δεσμεύσουν χωρικά την αναζήτηση των ομολογιών.

Η ευκλείδεια 3D ανακατασκευή, ωστόσο, προϋποθέτει όχι απλώς τον σχετικό προσανατολισμό ζευγών εικόνων, αλλά δεσμών ακτίνων. Στην περίπτωση των υποβρύχιων εικόνων, όπου για κάθε 3D σημείο του  $\mathbb{R}^3$  χώρου η ακτίνα που συνδέει το σημείο του χώρου με το επίπεδο σχηματισμού της εικόνας, δεν είναι ευθεία αλλά τεθλασμένη γραμμή και ο προσδιορισμός της θέσης του 3D σημείου προϋποθέτει επίλυση πολυωνύμου  $12^{\text{ου}}$  βαθμού, οι γνωστές μέθοδοι πυκνής συνταύτισης χρήζουν σημαντικής απλοποίησης. Για τους λόγους αυτούς η επιλογή της μεθόδου πυκνής συνταύτισης πρέπει να χαρακτηρίζεται από οικονομία σε υπολογιστικό κόστος. Οι Jordt-Sedlazeck et al. (2013) ανέπτυξαν μία μέθοδο, που ονομάζεται διαθλαστική σάρωση επιπέδων (Refractive Plane Sweep) και ουσιαστικά στηρίζεται στον αλγόριθμο σάρωσης επιπέδων (Plane Sweep) όπως αυτός διατυπώθηκε από τους Gallup et al. (2007), κατά τον οποίο η αρχικοποίηση των τιμών βάθους επιτυγχάνεται με τον ορισμό τυχαίων υποθετικών επιπέδων μπροστά από το επίπεδο της εικόνας. Η μέθοδος θεωρήθηκε κατάλληλη για περιπτώσεις καμερών πολύπλοκης γεωμετρίας καθώς και για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, με σημαντικό πλεονέκτημα την οικονομία του υπολογιστικού κόστους.

Οι αλγόριθμοι πυκνής συνταύτισης εικόνων υπάγονται στις τοπικές (local) είτε στις σύνολες (global) μεθόδους. Αν και στις τοπικές μεθόδους η ψηφιακή παράλλαξη (disparity) που ορίζει τις ομολογίες των σημείων, υπολογίζεται για κάθε pixel με κριτήριο τη μικρότερη τιμή κόστους και με παράλληλη εφαρμογή κάποιας συνάρτησης βελτιστοποίησης, όπως την “Winner-Takes-All” (WTA), τα αποτελέσματά τους συχνά δεν είναι ικανοποιητικά σε περιπτώσεις απότομης αλλαγής βάθους ή εμφανίζεται αδυναμία ανακατασκευής τοπικά προβληματικών περιοχών, όπως αποκρύψεις, επαναλαμβανόμενα μοτίβα ή περιοχές ομοιογενούς υψής. Ικανοποιητικότερα αποτελέσματα στις περιπτώσεις αυτές επιτυγχάνονται γενικά μέσω των σύνολων μεθόδων, κατά τις οποίες η συνάρτηση βελτιστοποίησης της παράλλαξης εφαρμόζεται για όλα τα pixel της εικόνας αναφοράς με παράλληλη χρήση δεσμεύσεων εξομάλυνσης, αλλά ταυτόχρονα με ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστικό κόστος (Szeliski, 2010). Μία αξιόπιστη μέθοδος που αντιμετωπίζει συνδυαστικά τα προβλήματα των τοπικών και των σύνολων μεθόδων είναι η υποσύνολη μέθοδος συνταύτισης (semi-global), κατά την οποία υπολογίζονται τοπικά βέλτιστες λύσεις σε διαφορετικές διευθύνσεις και τελικά η ελαχιστοποίηση της σύνολης 2D δέσμευσης εξομάλυνσης, ως συνδυασμός των επιμέρους ανεξάρτητων 1D δεσμεύσεων βελτιστοποίησης, που επιτρέπει τελικά την ικανοποιητική απόδοση ορίων αντικειμένων και λεπτομερειών, με καλή ισορροπία υπολογιστικού χρόνου και ακρίβειας (Hirschmüller, 2007; Καρκάλου, 2016).

Οι Hernández et al. (2016) επέλεξαν μία υποσύνολη μέθοδο για τη διαδικασία πύκνωσης του τρισδιάστατου νέφους σημείων, η οποία εκτελείται μέσω του λογισμικού ανοιχτού κώδικα Mic Mac. Η πυκνή ανακατασκευή προσεγγίζεται μέσω μίας μεθόδου ελαχιστοποίησης της σύνολης ενέργειας της εικόνας και επιλύεται μέσω μίας 2D βελτιστοποίησης (μέθοδος graph-cut). Για κάθε υποθετικό 3D σημείο προσδιορίζεται ένα τμήμα (patch) στην εικόνα αναφοράς, το οποίο προβάλλεται σε όλες τις γειτονικές προσανατολισμένες εικόνες. Τα επιλεγμένα αυτά τμήματα

στη συνέχεια χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της ομοιότητας της μίας εικόνας ως προς την άλλη με χρήση του Κανονικοποιημένου Συντελεστή Συσχέτισης NCC (Normalized Cross Correlation). Για τη μείωση της ενέργειας συνταύτισης, εφαρμόζεται μέθοδος “πραγματικού χρόνου” που βασίζεται σε μία πυραμιδική προσέγγιση πολλαπλών αναλύσεων για την αναπαράσταση του χώρου της κλίμακας (scale space), κατά την οποία πραγματοποιείται αναζήτηση από την κορυφή (αδρό) προς τη βάση (λεπτομερές), αντλώντας κάθε φορά αρχικές τιμές για την αναζήτηση στο επόμενο επίπεδο (Roy & Cox, 1998). Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται για κάθε εικόνα αναφοράς ένα αποτέλεσμα πολυεικονικής συσχέτισης σε μορφή χάρτη βάθους. Με προβολή των εντοπισμένων 2D ομολογιών στον 3D χώρο σύμφωνα με τη θέση της εικόνας και την πληροφορία του βάθους, σχηματίζεται ένα πυκνό 3D νέφος σημείων, στο οποίο αποδίδεται χρωματική υφή από την εικόνα αναφοράς. Τα πειραματικά αποτελέσματα των Hernández et al. (2016) υπέδειξαν τη συγκεκριμένη υποσύνολη μέθοδο συνταύτισης ως βέλτιστη για την περίπτωση υποβρύχιων εικόνων, αφενός λόγω πολυπλοκότητας των απεικονιζόμενων αντικειμένων και αφετέρου λόγω του πλεονεκτήματος της οικονομίας σε υπολογιστική ισχύ κατά την εφαρμογή σε δεδομένα βίντεο με υπεράριθμα frames.

Η αδυναμία ορισμού επιπολικών “ευθειών” ώθησε τους Gedge et al. (2011) στον προσδιορισμό ομόλογων επιπολικών “καμπυλών” για κάθε pixel, ώστε να διευκολύνεται ο υπολογισμός του κόστους συνταύτισης που υπόκειται στην επίδραση της διάθλασης. Για κάθε pixel, η πληροφορία του βάθους υπολογίζεται και εδώ με χρήση της παραμετρικής συνάρτησης του Κανονικοποιημένου Συντελεστή Συσχέτισης (NCC) για παράθυρο 7x7. Στη συνέχεια, σε κάθε κόμβο της επιπολικής καμπύλης (επί της ουσίας τεθλασμένης γραμμής), αποδίδεται το κόστος συνταύτισης, και με εφαρμογή είτε κάποιας τοπικής μεθόδου συνταύτισης, όπως η WTA, είτε κάποιας σύνολης, όπως η MRF, υπολογίζεται τελικά η ψηφιακή παράλλαξη για κάθε pixel. Το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος παραμετροποιεί ουσιαστικά κάθε θεωρητική επιπολική ευθεία, επιδιώκοντας να ενσωματώσει στους κανόνες της επιπολικής γεωμετρίας το φαινόμενο της διάθλασης, ενώ λειτουργεί ως πλεονέκτημα γιατί καθιστά την μέθοδο ακριβή λόγω της αναλυτικής γεωμετρικής προσέγγισης, παράλληλα έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί οπισθοπροβολή (back-projection) ιδιαίτερα αυξημένου αριθμού 3D σημείων, με αποτέλεσμα να μην είναι εφαρμόσιμη η μέθοδος σε περιπτώσεις πυκνής συνταύτισης μεγάλου αριθμού εικόνων. Τον προσδιορισμό των επιπολικών “καμπυλών” (Εικόνα 4.6) διερεύνησαν επίσης οι Drap et al. (2015) στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος GROPLAN, ενσωματώνοντας τον πολυεικονικό αλγόριθμο πυκνής συνταύτισης PMVS των Furukawa & Ponce (2009) στη δική τους μεθοδολογία, με σκοπό την απλοποίηση των υπολογισμών.



Εικόνα 4.6: Η επιπολική “καμπύλη” (δεξιά) απεικονίζει την έντονη παραμόρφωση της υποβρύχιας εικόνας λόγω της διάθλασης ([www.groplan.eu](http://www.groplan.eu)).

Μία υπο-σύνολη μέθοδο για την πυκνή συνταύτιση στερεοζευγών υποβρύχιων εικόνων από κάμερες υποβρύχιων οχημάτων επέλεξαν και οι Huo et al. (2018). Εκτός από τον σχηματισμό επιπολικών εικόνων για την κατά την x διεύθυνση αναζήτηση των ομολογιών, οι Huo et al.

ενσωμάτωσαν στη διαδικασία ένα στάδιο κατάτμησης των εικόνων, βάσει της μεθόδου super-pixel. Η κατάτμηση των εικόνων σε ομοιογενείς υποπεριοχές συνέβαλε στην ομαδοποίηση των περιοχών ενδιαφέροντος και κυρίως στον αποκλεισμό του υποβάθρου, περιορίζοντας σημαντικά τις περιοχές αναζήτησης κατά τη διαδικασία της συνταύτισης. Η ενσωμάτωση ενός σταδίου κατάτμησης πριν από την πυκνή συνταύτιση είναι ιδιαίτερα σημαντική στις υποβρύχιες εικόνες λόγω των συνθηκών φωτισμού του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Η κατάτμηση τύπου super-pixel των εικόνων βοήθησε επίσης το στάδιο της βελτιστοποίησης του υπολογισμένου χάρτη παράλλαξης, αφού σε κάθε υποπεριοχή "super-pixel" εφαρμόστηκε ελαχιστοτετραγωνική μέθοδος παρεμβολής για τον υπολογισμό του βέλτιστου επιπέδου. Οι πειραματικές εφαρμογές της μεθόδου σε ελεγχόμενο περιβάλλον πεισίνας απέδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα σε ακρίβεια και χαμηλό χρόνο υπολογισμού, για αποστάσεις κάμερας - αντικειμένου της τάξης των δύο m.

#### **4.5 Εφαρμογές 3D ανακατασκευής με λήψεις από υποβρύχια οχήματα**

Η μοντελοποίηση των δύο βασικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την υποβρύχια εικόνα (ποιοτικά η απορρόφηση του φωτός και γεωμετρικά η διάθλαση) αποσπά το μεγαλύτερο βάρος της έρευνας της Όρασης Υπολογιστών στο πεδίο της τρισδιάστατης ανακατασκευής υποβρύχιων αντικειμένων. Οι απαιτήσεις παραμετροποίησης και γεωμετρικής διόρθωσης γίνονται δε πολυπλοκότερες όταν τα δεδομένα προέρχονται από υποβρύχια οχήματα, στελεχωμένα με κάμερες τοποθετημένες σε ανθεκτικές θήκες στεγανοποίησης (ανάγκη μοντελοποίησης γεωμετρίας συστήματος "κάμερας - θήκης") που επιχειρούν σε ιδιαίτερες συνθήκες υποβρύχιου περιβάλλοντος, όπως αυξημένα βάθη ή μηδενικές ορατότητες (ανάγκη αποκατάστασης εικόνας). Ακολουθώς, λοιπόν, γίνεται μία καταγραφή εφαρμογών τρισδιάστατης ανακατασκευής του βυθού, επικεντρωμένη σε μεθόδους ανακατασκευής SfM, με αξιοποίηση πολλαπλών ειδών δεδομένων (ακουστικές εικόνες, φωτογραφικές λήψεις, βυθομετρικά δεδομένα, δεδομένα πλοήγησης).

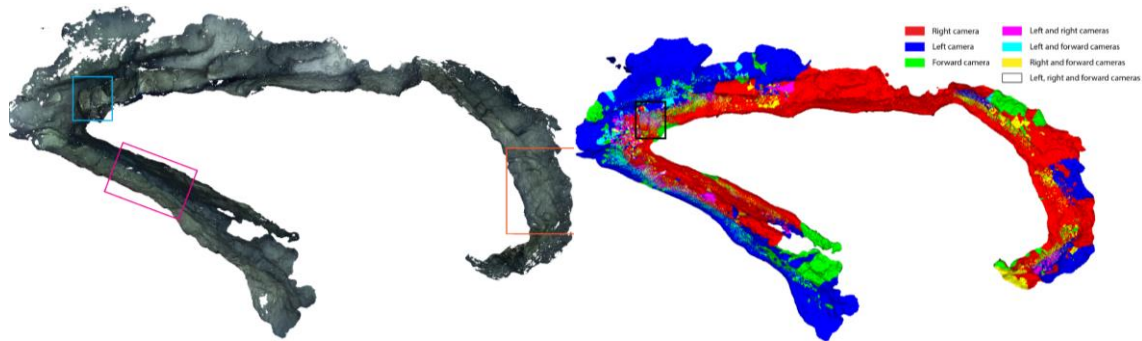
##### **Ωκεανογραφική Έρευνα**

Οι Sedlazeck et al. (2009) στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Future Ocean Excellence ([www.ocean-der-zukunft.de](http://www.ocean-der-zukunft.de)), ανέπτυξαν μία μεθοδολογία ολοκληρωμένης 3D ανακατασκευής περιοχής γεωθερμικών πηγών στον Ατλαντικό ωκεανό σε βάθος 3000 m περίπου, συνδυάζοντας δεδομένα βίντεο από κάμερα υψηλής ανάλυσης και στίγματα θέσης της πορείας του βίντεο από όργανα προσδιορισμού υποβρύχιας θέσης. Φορέας των μηχανών συλλογής ήταν το ROV Kiel 6000. Με χρήση της μίας από τις δύο κάμερες RGB HD, η περιοχή ενδιαφέροντος καλύφθηκε με λήψη 4500 συνολικά εικόνων από ακολουθίες βίντεο. Η κάμερα βαθμονομήθηκε με φωτογράφιση σκακιέρας στο ίδιο το περιβάλλον εφαρμογής. Στην εφαρμογή του αλγορίθμου βαθμονόμησης δεν ενσωματώθηκε κάποιο υποθετικό γεωμετρικό μοντέλο σχηματισμού εικόνας μετά από την επίδραση της διάθλασης, και τα αποτελέσματα της πρώτης προσεγγιστικής βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές τιμές για την έναρξη του αλγορίθμου SfM. Η ανίχνευση και οι αντιστοιχίσεις χαρακτηριστικών εικονοσημείων υπολογίστηκαν με εφαρμογή του ανιχνευτή γωνιών KLT (Lucas & Kanade, 1981). Η λειτουργία του KLT, όπως του τελεστή Harris, στηρίζεται στη σύγκριση μικρού τμήματος (patch) της εικόνας, μεταξύ δύο συνεχόμενων εικόνων, με την υπόθεση ότι είναι διαδοχικές και έχουν μεγάλη επικάλυψη (μικρή βάση λήψης). Ο αλγόριθμος συσχετίζει τις διαδοχικές λήψεις μέσω ενός παραθύρου που κινείται βάσει ενός διανύσματος μετατόπισης και είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στις εφαρμογές Optical Flow. Στη συνέχεια, από τις ομολογίες εικονοσημείων αποκλείονται τα χονδροειδή σφάλματα με εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC, και από τις εναπομένουσες ομολογίες υπολογίζεται ο

δεσμευμένος επιπολικός πίνακας ώστε να προκύψει μία πρώτη εκτίμηση των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού των δύο πρώτων εικόνων. Με τον υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού του πρώτου στερεοζεύγους, υπολογίζονται με διαδικασία τριγωνισμού τα πρώτα 3D ομόλογα σημεία. Για κάθε νέα εικόνα που προστίθεται στη συνέχεια, τα εντοπισμένα στην εικόνα χαρακτηριστικά σημεία αντιστοιχίζονται με το υπάρχον 3D νέφος σημείων. Τον πρώτο σχετικό προσανατολισμό όλων των εικόνων και τη δημιουργία ενός αραιού νέφους σημείων διαδέχεται η συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης, κατά την οποία εικόνες και σημεία επανυπολογίζονται με σκοπό να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συνταύτιση μεταξύ 2D εικονοσημείων και 3D σημείων του χώρου, όπως επίσης και να επανυπολογιστούν, με αυτοβαθμονόμηση, οι τιμές των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας. Σε όλη αυτή την τυπική ακολουθία SfM, η ερευνητική ομάδα ενσωμάτωσε τις μετρήσεις για τον προσδιορισμό της θέσης του υποβρύχιου οχήματος, αντιστοιχίζοντας τις θέσεις του ROV με σημεία της πορείας καταγραφής του βίντεο. Με εισαγωγή των δεδομένων της πλοήγησης του ROV, τόσο στη συνόρθωση του σχετικού προσανατολισμού των εικόνων όσο και στον αλγόριθμο RANSAC, οι θέσεις του ROV επίσης συνορθώθηκαν και συμμετείχαν τελικά στην επίλυση του απόλυτου προσανατολισμού του μοντέλου, αποδίδοντας κλίμακα και θέση. Ιδιαίτερα σημαντική στη μεθοδολογία αυτή υπήρξε η διαδικασία κατάτμησης των εικόνων, με σκοπό την ανίχνευση και απαλοιφή σημείων του υποβάθρου και αιωρούμενων σωματιδίων του νερού, που ενίσχυσε σημαντικά την εφαρμογή του αλγορίθμου RANSAC, όπως επίσης και η διαδικασία διόρθωσης των χρωμάτων του αντικειμένου. Για την αποκατάσταση του χρώματος στις εικόνες των 3000 m βάθους, όπου για να τεκμηριωθεί το αντικείμενο ήταν απαραίτητη η προσθήκη τεχνητού φωτισμού, χρησιμοποιήθηκε μία φόρμουλα μοντελοποίησης της εξασθένησης του φωτός υποβρυχίως. Με βάση τους χάρτες βάθους που προέκυψαν, κάθε εικόνα διορθώθηκε ως προς κάθε κανάλι R G B, με βάση την απόσταση του αντικειμένου από την κάμερα. Για την ορθή αντιστοίχιση των χρωμάτων βάσει απόστασης χρησιμοποιήθηκε επίσης χρωματική παλέτα αναφοράς.

Οι Hernández et al. (2016) διερεύνησαν τις δυνατότητες συνδυασμού δεδομένων πλοήγησης και προσδιορισμού υποβρύχιας θέσης από αισθητήρες τοποθετημένους πάνω στο αυτόνομο υποβρύχιο όχημα Sparus II, κατασκευής CIRS (Girona Underwater Vision and Robotics), με δεδομένα εικόνων που συλλέχθηκαν από τις κάμερες του AUV παράλληλα με τη συλλογή των δεδομένων πλοήγησης, με σκοπό τη χαρτογράφηση και την τρισδιάστατη αναπαράσταση ενός υποβρύχιου φαραγγιού, που σχηματίζεται εντός βραχωδών σχηματισμών, στο Sant Feliu de Guíxols στην Ισπανία. Για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του υποβρύχιου οχήματος, το AUV Sparus II διαθέτει μία σουίτα αισθητήρων πλοήγησης που αποτελείται από πιεζομετρικό αισθητήρα, σύστημα καταγραφής DVL, αδρανειακό σύστημα IMU και δέκτη GPS για την αρχικοποίηση της θέσης του AUV όταν αυτό βρίσκεται στην επιφάνεια. Επίσης διαθέτει ένα μονοδεσμικό σύστημα σόναρ για την καταγραφή βυθομετρικής πληροφορίας κατά την πλοήγησή του, ενώ για τη συλλογή εικονιστικών δεδομένων διαθέτει μία τριάδα καμερών GoPro, τοποθετημένων σε διάταξη δεξιά, αριστερά και πρόσθια, με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως επίσης και η δημιουργία στερεομοντέλων ικανοποιητικής γεωμετρίας. Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα προγραμματίζεται, κατευθύνεται και ελέγχεται μέσω μιας πλατφόρμας ελέγχου αυτονομίας, της COLA2 (Palomeras et al., 2012), η λειτουργία της οποίας βασίζεται στο λειτουργικό σύστημα ROS, καθώς και από έναν προσομοιωτή υποβρύχιου περιβάλλοντος, τον UWSim (Prats et al., 2012). Οι αποστολές του AUV προγραμματίστηκαν στο περιβάλλον της βιβλιοθήκης OMPL (Open Motion Planning Library) με αρχικά δεδομένα waypoints και χάρτες Google. Το AUV ακολούθησε

την προγραμματισμένη πορεία του καταγράφοντας μιάμιση περιστροφή γύρω από τη νησίδα, ακολουθώντας το φαράγγι και ολοκληρώνοντας επιτυχώς την αποστολή του, ενώ η θέση του προσδιορίστηκε μέσω μεθόδου *dead reckoning* με συνδυασμό των αισθητήρων πλοήγησης (GPS, DVL, IMU). Παράλληλα, οι τρεις κάμερες κατέγραψαν 12' 2.7 K HD βίντεο έκαστη, από τα οποία προέκυψαν 21.750 εικόνες ανάλυσης 2704x2028. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Lucas-Kanade (Lucas & Kanade, 1981) εξήγαγαν χαρακτηριστικά σημεία από τις εικόνες, ενώ με φιλτράρισμα βάσει της μέγιστης σχετικής διακύμανσης ανίχνευσαν και εξαίρεσαν θολές εικόνες, επιλέγοντας τελικά περί τις 1000 εικόνες συνολικά, και από τις τρεις κάμερες, για να συμμετέχουν στην επίλυση SfM. Οι επιλεγμένες εικόνες διορθώθηκαν χρωματικά με εφαρμογή την μεθοδολογία ενίσχυσης εικόνας που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, και ακολούθησε η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος SfM για τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης των εικόνων, της εξαγωγής ενός πρώτου αραιού νέφους ομόλογων σημείων και της αυτοβαθμονόμησης των καμερών κατά τη διαδικασία της συνόρθωσης με τη μέθοδο της δέσμης. Μία πρώτη βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε πριν από τις αποστολές του AUV, χωρίς να ληφθεί υπόψη η διάθλαση, μόνο για τον υπολογισμό των προσεγγιστικών τιμών των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας των καμερών. Με διαδικασία πυκνής συνταύτισης των προσανατολισμένων εικόνων, τριγωνισμό του πυκνού νέφους και απόδοση υψής στη νέα επιφάνεια, δημιουργήθηκαν φωτορεαλιστικά 3D μοντέλα του φαραγγιού (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Αριστερά: φωτορεαλιστικό 3D μοντέλο του φαραγγιού όπως προέκυψε από ανακατασκευή SfM. Δεξιά: Χρωματική κλίμακα 3D ανακατασκευής βάσει κάμερας (Hernández et al., 2016).

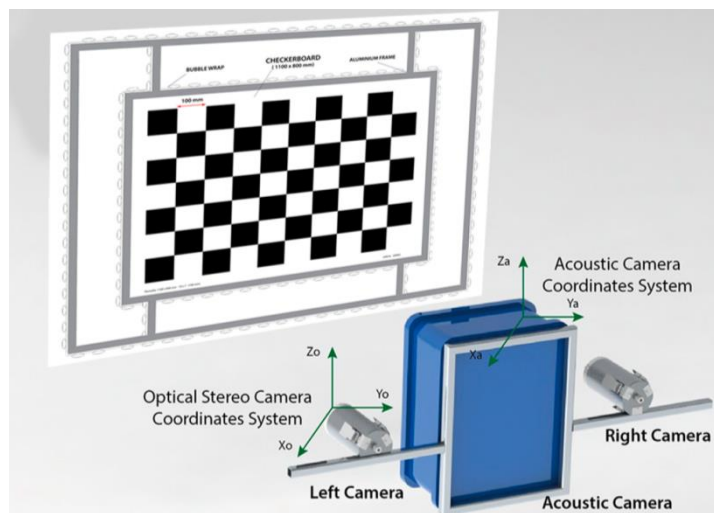
Η καταγραφή του βίντεο δεν ήταν συγχρονισμένη με τους αισθητήρες θέσης του υποβρύχιου οχήματος και η κλίμακα στην τρισδιάστατη ανακατασκευή αποδόθηκε προσεγγιστικά βάσει των αρχικών σημείων του προγραμματισμού της πορείας του AUV, όπως αυτά εξήχθησαν από τον χάρτη Google. Με αντιπαραβολή των σημείων της πορείας του οχήματος από τα αποτελέσματα *dead reckoning* και των θέσεων των καμερών κατά την τρισδιάστατη ανακατασκευή, παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στο μεγαλύτερο τμήμα της πορείας (Εικόνα 4.8). Το αποτέλεσμα της 3D ανακατασκευής παρουσιάζεται ως ρεαλιστικότερο σενάριο, παρότι υπάρχει ένα τμήμα ασυνέχειας, το οποίο αποδίδεται από τους συγγραφείς σε συνθήκες κακής ορατότητας. Αντίθετα, το όχημα, ενώ ακολούθησε επιτυχημένη σύμφωνα με τον προγραμματισμό του πορεία, δείχνει να τέμνει τη νησίδα, κάτι που δεν δικαιολογεί η γεωμορφολογία του εδάφους και του πυθμένα (ομαλές κλίσεις). Η αστοχία της μεθόδου προσδιορισμού θέσης στο συγκεκριμένο τμήμα οφείλεται στα σωρευτικά σφάλματα της μεθόδου πλοήγησης.





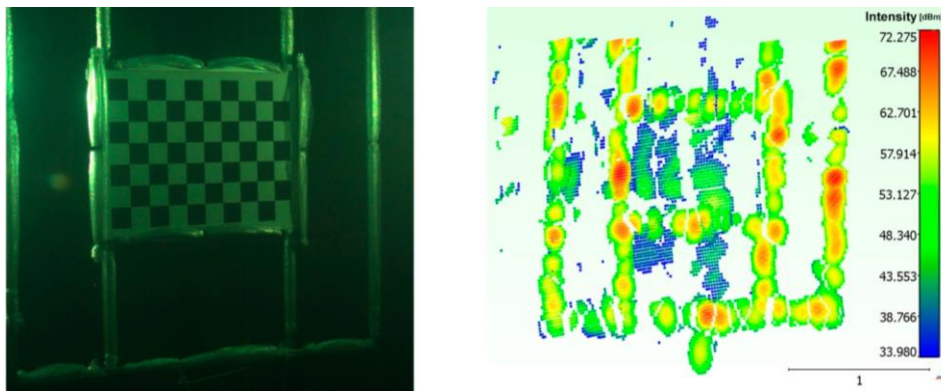
Εικόνα 4.8: Η πορεία του Sparus II AUV εντός του υποβρύχιου φαραγγιού. Με κόκκινη γραμμή η πορεία του οχήματος όπως προσδιορίστηκε από τις θέσεις των καμερών κατά την επίλυση SfM και με πράσινη γραμμή η πορεία του οχήματος βάσει της μεθόδου προσδιορισμού θέσης dead reckoning (Hernández et al., 2016)

Τέλος, στις περισσότερες εφαρμογές χαρτογράφησης και τρισδιάστατης αναπαράστασης του υποβρύχιου περιβάλλοντος με παράλληλη χρήση ηχοβολιστικών συσκευών και καμερών, τίθεται το ζήτημα του συγχρονισμού των αισθητήρων, ο οποίος συνήθως επιτυγχάνεται είτε προσεγγιστικά βάσει εξωτερικών δεσμεύσεων όπως σημεία ελέγχου (Hernández et al., 2016), είτε συνορθώνοντας όλες τις παρατηρήσεις (σχετικές θέσεις εικόνων και θέσεις υποβρύχιου οχήματος από όργανα πλοήγησης) ενιαία (Sedlazeck et al., 2009). Μία λύση με αυξημένα ποσοστά ακρίβειας στο πρόβλημα της χρονικής και χωρικής συσχέτισης ακουστικών και οπτικών αισθητήρων, τοποθετημένων σε κοινή διάταξη, κυρίως σε υποβρύχια οχήματα, επιχειρήσαν οι Lagudi et al. (2016). Στην ουσία βαθμονόμησαν ένα κοινό σύστημα μίας τριάδας καμερών, δύο οπτικών σε διάταξη στέreo και μίας ακουστικής κάμερα, της Coda Echoscope 3D acoustic camera, η οποία με μονοδεσμικές ηχοβολιστικές παρατηρήσεις καταγράφει εικόνες γεωμετρικής πληροφορίας, αντίστοιχες ενός χάρτη βάθους.



Εικόνα 4.9: Η γεωμετρία του συστήματος (Lagudi et al., 2016).

Στόχος των συγγραφέων είναι ο ακριβής μετασχηματισμός από το σύστημα της μίας κάμερας στο σύστημα της άλλης (ή των άλλων δύο, εν προκειμένω), με σκοπό το συνδυασμό των δύο ειδών δεδομένων γεωμετρικής πληροφορίας: αφενός του νέφους σημείων της ακουστικής κάμερας και αφετέρου του νέφους σημείων από την τρισδιάστατη ανακατασκευή των δύο οπτικών στερεοκαμερών (Εικόνα 4.9). Το πρώτο σκέλος της μεθοδολογίας τους αφορά μία πρώτη εκτίμηση των άγνωστων γεωμετρικών παραμέτρων του μετασχηματισμού και πραγματοποιείται μέσω της συνένωσης νεφών από τις δύο κάμερες, βάσει του γνωστού αλγορίθμου ICP, κάτι ωστόσο που αποδεικνύεται κατάλληλο μόνο για την αρχικοποίηση των τιμών των παραμέτρων, γιατί η συνένωση επηρεάζεται από την έντονη ύπαρξη θορύβου. Το δεύτερο σκέλος της μεθόδου αφορά την αξιόπιστη εκτίμηση των παραμέτρων του μετασχηματισμού και επιτυγχάνεται, κατά τους συγγραφείς, σε τοπικό επίπεδο, με προσέγγιση του μετασχηματισμού ανά επίπεδο θέσης του συστήματος των καμερών, με υπολογισμό του σχετικού προσανατολισμού ενός ακουστικού και ενός οπτικού συστήματος. Αναλυτικότερα, η μέθοδος των Lagudi et al. (2016) διακρίνεται από πέντε επιμέρους στάδια: (i) τη συλλογή των δεδομένων (Εικόνα 4.10), (ii) τον προσδιορισμό των παραμέτρων εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, (iii) για κάθε θέση λήψης, τον υπολογισμό του μετασχηματισμού που συνδέει τις τρεις εικόνες μεταξύ τους, (iv) την επεξεργασία των πινάκων του μετασχηματισμού βάσει των αρχικών τιμών και του ICP και (v) τον υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων του μετασχηματισμού με ελαχιστοτετραγωνική συνόρθωση.



Εικόνα 4.10: Ταυτόχρονη καταγραφή υποβρύχιας σκηνής από οπτική κάμερα (αριστερά) και ακουστική κάμερα (δεξιά) (Lagudi et al., 2016).

### Ενάλια Αρχαιολογική Έρευνα

Οι Drap et al. (2015), εκ μέρους του γαλλικού CNRS και στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος GROPLAN, αποτύπωσαν φοινικικό ναυάγιο διαστάσεων 14 m x 5 m, σε βάθος 110 m, ανοιχτά της νήσου Gozo, βορειοδυτικά της Μάλτας. Για τη φωτογραμμετρική τεκμηρίωση του ναυαγίου καταδύθηκαν το βαθυσκάφος REMORA 2000 και το ROV Super-Achille, της γαλλικής εταιρίας COMEX, ενώ κατασκευάστηκε διάταξη τριών καμερών, αποτελούμενη από δύο κάμερες χαμηλής ανάλυσης (1456x1936, συγχρονισμένες στα 10 Hz) και μία υψηλής (4384x6576, συγχρονισμένη στα 2 Hz), που να είναι προσαρμόσιμη και στα δύο οχήματα. Για το σύστημα των τριών καμερών, τοποθετημένων η καθεμία σε ξεχωριστή θήκη, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση σε δύο στάδια: αρχικά για τον προσδιορισμό των εσωτερικών παραμέτρων κάθε κάμερας και έπειτα για τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης των τριών καμερών μεταξύ τους, η οποία εξασφαλίζει και την κλίμακα στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Κατά τη λήψη των

δεδομένων, υπολογίστηκε με μέθοδο οπτικής οδομετρίας η τροχιά του οχήματος καθώς και ένα αραιό νέφος σημείων του ναυαγίου, ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρης φωτογραφική κάλυψή του. Το σύστημα των τριών καμερών συνδέθηκε μέσω καλωδίου Ethernet με υπολογιστή πάνω στο υποβρύχιο όχημα, όπου μεταφέρονταν τα δεδομένα και ήταν δυνατή η εκτέλεση της οπτικής οδομετρίας σε πραγματικό χρόνο. Με αρχικές τιμές αυτές της οδομετρίας πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη ανακατασκευή SfM, συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης, πύκνωση του αραιού νέφους με εφαρμογή μεθόδου MVS και, τέλος, δημιουργία επιφάνειας και απόδοση φωτορεαλιστικής υφής (Εικόνα 4.9).



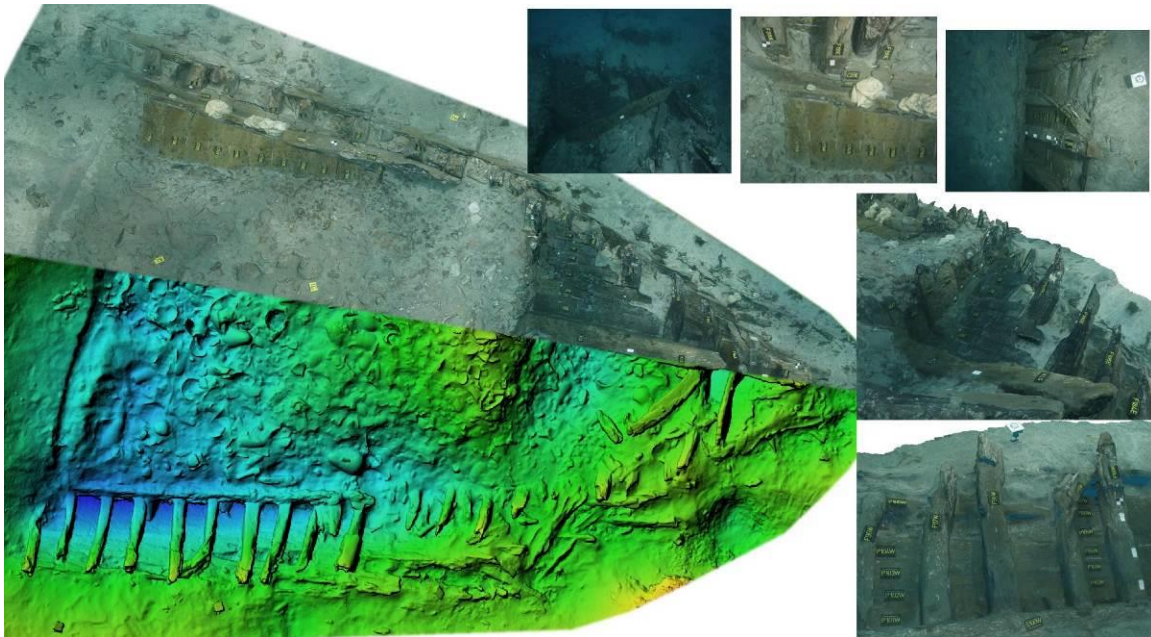
Εικόνα 4.9: Τρισδιάστατη ανακατασκευή φοινικικού ναυαγίου στη Μάλτα στα -110 m (Drap et al., 2015).

Στην Ελλάδα, η γεωμετρική τεκμηρίωση ενάλιων αρχαιολογικών χώρων εκπονείται κυρίως με τους αυτοδύτες να έχουν το ρόλο του φορέα αισθητήρων και μέσω των καταγραφών πληροφορίας, κάτι όμως που, αναπόφευκτα, περιορίζει το επιχειρησιακό βάθος στα 55 περίπου m. Από τις πρώτες απόπειρες χαρτογράφησης υποβρύχιων θέσεων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος με χρήση αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων είναι η συνεργασία της Εφορείας Εναλίων Αρχαιοτήτων, του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών και του Ινστιτούτου Woods Hole για τη λεπτομερή τεκμηρίωση αρχαίου ναυαγίου στο διάυλο Χίου-Οινουσσών. Εκεί χρησιμοποιήθηκε το AUV SeaBED, το οποίο κατέγραψε περί τις 3.500 εικόνες με σκοπό τη φωτογραμμετρική τους επεξεργασία, ενώ παράλληλα συνέλεξε βυθομετρικά δεδομένα μέσω πολυδεσμικού σαρωτή (Foley et al., 2009).

Την τελευταία δεκαετία, οι Diamanti et al. (2015, 2017), σε σταθερή συνεργασία με την Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων του ΥΠ.ΠΟ., το Ινστιτούτο Εναλίων Αρχαιολογικών Ερευνών και το Καθίδρυμα Ιστορικών και Αρχαιολογικών Ερευνών “Κορσεαί”, εργάζονται στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την ολοκληρωμένη τεκμηρίωση ενάλιων αρχαιολογικών χώρων, που ξεκινά από τις πρώτες καταδύσεις αναγνώρισης μιας περιοχής ενδιαφέροντος και φτάνει ως την εξαγωγή αποτελεσμάτων υψηλής ανάλυσης και μετρητικής αξιοπιστίας. Έχουν υποστηριχθεί φωτογραμμετρικά και χαρτογραφικά ενάλιες αρχαιολογικές έρευνες σε Αργολικό, Νότιο Ευβοϊκό και Παγασητικό Κόλπο, Μακρόνησο και Λαυρεωτική, Πάτμο, Λέβιθα, Φούρνους Ικαρίας, Κάσο,

Λέρο, Ρόδο, Κεφαλλονιά, Σαλαμίνα κ.ά., όπου η πλειοψηφία των θέσεων αφορά αρχαία ναυάγια και λιγότερο καταβυθισμένους οικισμούς και λιμένες. Χαρακτηριστικές έρευνες είναι:

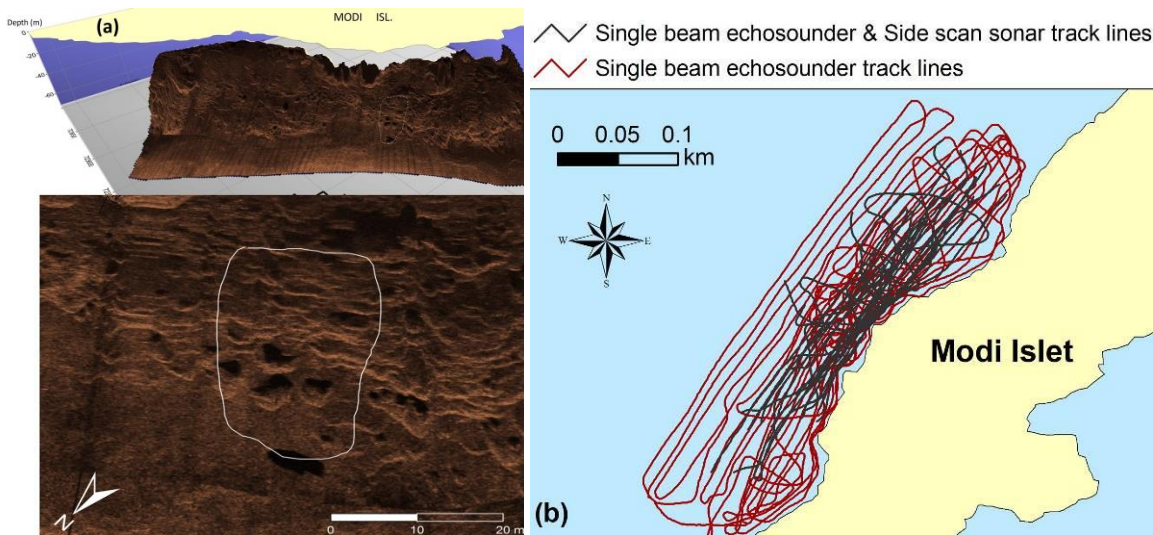
- Η υποβρύχια ανασκαφή βυζαντινού ναυαγίου του 12<sup>ου</sup> αιώνα στον εμπορικό λιμένα της Ρόδου στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος ΘΑΛΗΣΣ/ΕΣΠΑ 2007-2013 με τίτλο “MERMAID - Saving wooden shipwrecks in the Mediterranean marine ecosystems: research, development and applications of innovative methods of in situ protection” (Koutsouflakis, 2017) υπό τη συνδιεύθυνση της Εφορείας Εναλίων Αρχαιοτήτων και του Τμήματος Συντήρησης Αρχαιοτήτων και Έργων Τέχνης του ΤΕΙ Αθηνών. Το ναυάγιο, που κείται σε βάθος από 12 έως 14 m, τεκμηριώθηκε φωτογραμμετρικά, τόσο στην αρχή της ανασκαφής όσο και στο πέρας αυτής, και παρήχθησαν ορθοφωτοχάρτες, τρισδιάστατα φωτορεαλιστικά μοντέλα, ψηφιακά μοντέλα πυθμένα και τομές του ναυαγίου, μέσω επιλύσεων τεχνικών SfM (Εικόνα 4.10).



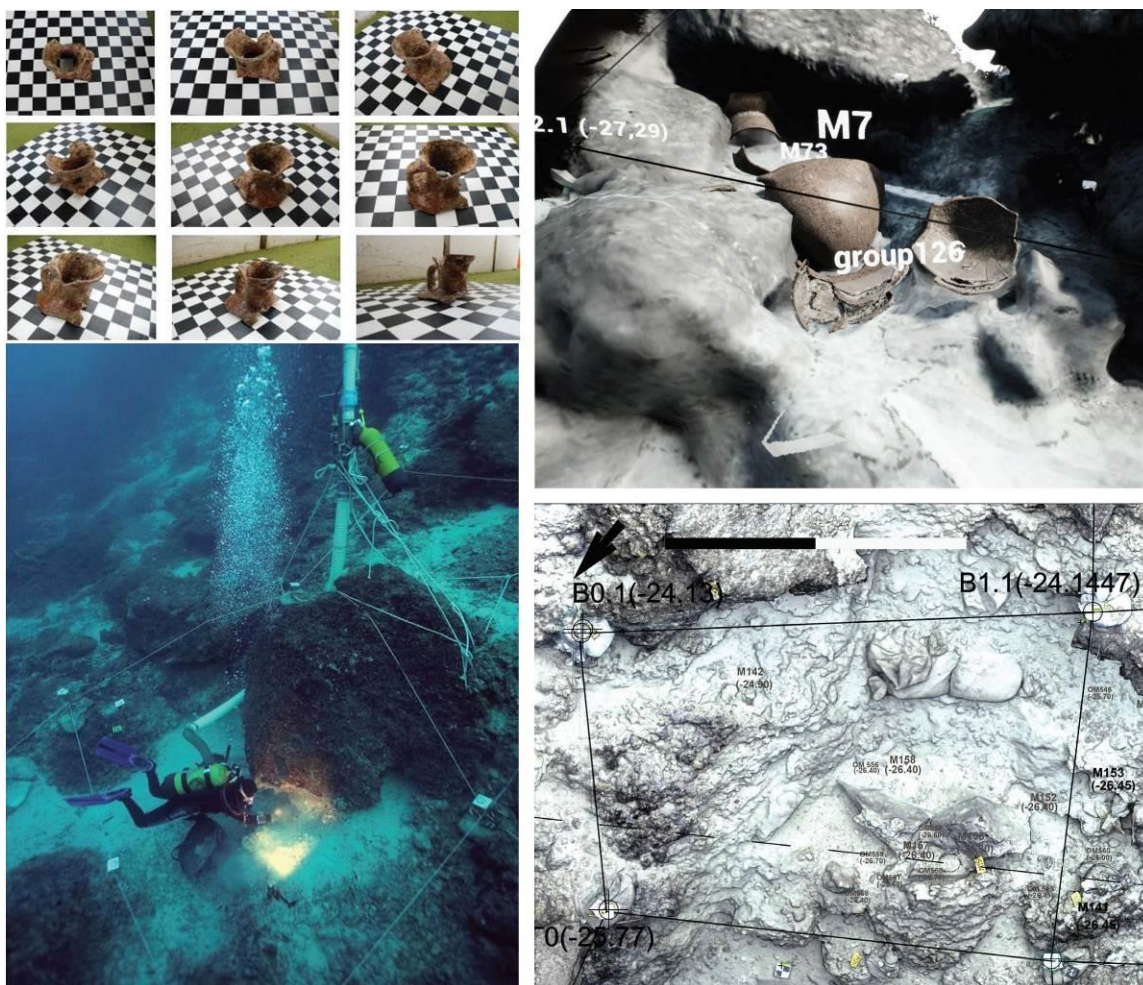
Εικόνα 4.10: Τρισδιάστατη ανακατασκευή βυζαντινού ναυαγίου στον εμπορικό λιμένα της Ρόδου, στα -12 έως -14 m (Διαμαντή - Μεντόγιαννης, *ufr-team.com*, 2013).

- Η υποβρύχια ανασκαφή του μυκηναϊκού ναυαγίου στη νησίδα Μόδι, νοτιοανατολικά του Πόρου, από το Ινστιτούτο Εναλίων Αρχαιολογικών Ερευνών, υπό τη διεύθυνση του αρχαιολόγου Χ. Αγουρίδη, από το 2009 έως το 2018, που ήταν η πιο πρόσφατη ανασκαφική αποστολή (Agouridis, 2011). Κατά τις πρώτες αναγνωριστικές αποστολές, τα έτη 2006 - 2007, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα SHARPS (Sonic High Accuracy Positioning System), με το οποίο, μέσω της πόντισης αναμεταδοτών σε διασπορά στο χώρο του ναυαγίου και της λήψης παρατηρήσεων sonar (παρόμοια φιλοσοφία συστήματος με τις τεχνικές Long Baseline), αποτυπώθηκαν οι θέσεις των επιφανειακών ευρημάτων σε βαθυμετρικό εύρος από τα -27 έως τα -37 m, ενώ υλοποιήθηκαν κορυφές κανάβου και ανασκαφικών τομών. Για τη γεωαναφορά του ναυαγίου σε σχέση με τη νήσο Μόδι αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα της ηχοβολιστικής σάρωσης που πραγματοποίησε το Εργαστήριο Θαλάσσιας Γεωλογίας και Φυσικής Ωκεανογραφίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών (Εικόνα 4.11; Geraga et al., 2017). Στις ανασκαφικές περιόδους που ακολούθησαν (2009, 2010, 2103, 2016, 2018) η

μεθοδολογία που ακολούθησε η ομάδα τεκμηρίωσης (Βλαχάκη Φ., Διαμαντή Ελ., Φαραζής Γ.) αφορά δύο ειδών 3D ανακατασκευή: πρώτη χρονικά είναι η φωτογραμμετρική, η οποία εκπονείται σε καθημερινή βάση κατά τη διάρκεια της ανασκαφής και αποτυπώνει όλες τις σημαντικές αλλαγές (διαμόρφωση μορφολογίας πυθμένα, θέσεις ευρημάτων, πύκνωση δικτύου φωτοσταθερών σημείων), ενώ η δεύτερη αξιοποιεί όλα τα στοιχεία της πρώτης ανακατασκευής, της φωτογραμμετρικής, με σκοπό να “ξαναχτίσει” το σύνολο του ναυαγίου που έχει πια αποσυντεθεί λόγω ανασκαφής, με σύνθεση και προβολή των ανελκυσμένων ευρημάτων, της στρωματογραφίας του πυθμένα και πληροφοριών όπως η ημερομηνία ανέλκυσης ή το ανασκαφικό έτος. Τελικός στόχος είναι η πλήρης τεκμηρίωση του ναυαγίου και η συγκέντρωση και οργάνωση όλης της πληροφορίας (γεωμετρική, φωτορεαλιστική, αρχαιολογική) σε πλατφόρμα, προσβάσιμη στο επιστημονικό και μη κοινό (Εικόνα 4.12; Vlachaki et al., 2017). Το 2018, το μυκηναϊκό ναυάγιο του Μοδιού εντάχθηκε ως case study στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα Lab4dive, στο πλαίσιο του προγράμματος “Implementation of the European Maritime and Fisheries Fund Work Programme 2016 - Blue Labs: innovative solutions for maritime challenges”, που στοχεύει στην ανάπτυξη και εφαρμογή της καινοτομίας “Mobile Smart Lab”, για την υποστήριξη ενάλιων αρχαιολογικών ερευνών. Συγκεκριμένα, στόχος είναι η ανάπτυξη και διάθεση ενός υποβρύχιου tablet που θα ενσωματώνει τεχνολογίες επαυξημένης πραγματικότητας και υποβρύχιου εντοπισμού θέσης και θα αυξήσει σημαντικά τον όγκο της συλλεγόμενης πληροφορίας από το χώρο του ναυαγίου με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής στο βυθό. Η πιλοτική λειτουργία του υποβρύχιου tablet στο πλαίσιο της ερευνητικής αποστολής του 2018 έδωσε σημαντικές και ελπιδοφόρες ενδείξεις για τη βελτίωση και χρήση του στο άμεσο μέλλον.

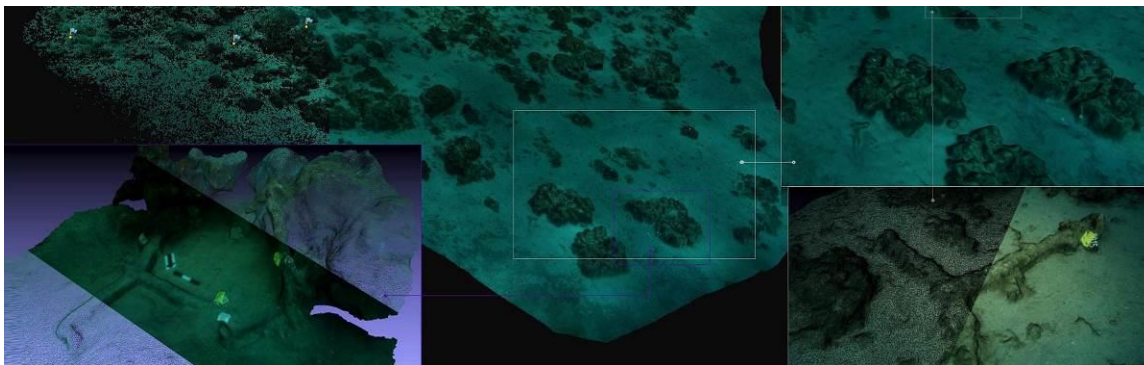


Εικόνα 4.11: Ηχοβολιστική σάρωση ευρύτερης περιοχής μυκηναϊκού ναυαγίου στη νησίδα Μόδι με χρήση single beam sonar και side scan sonar (Geraga et al., 2017).



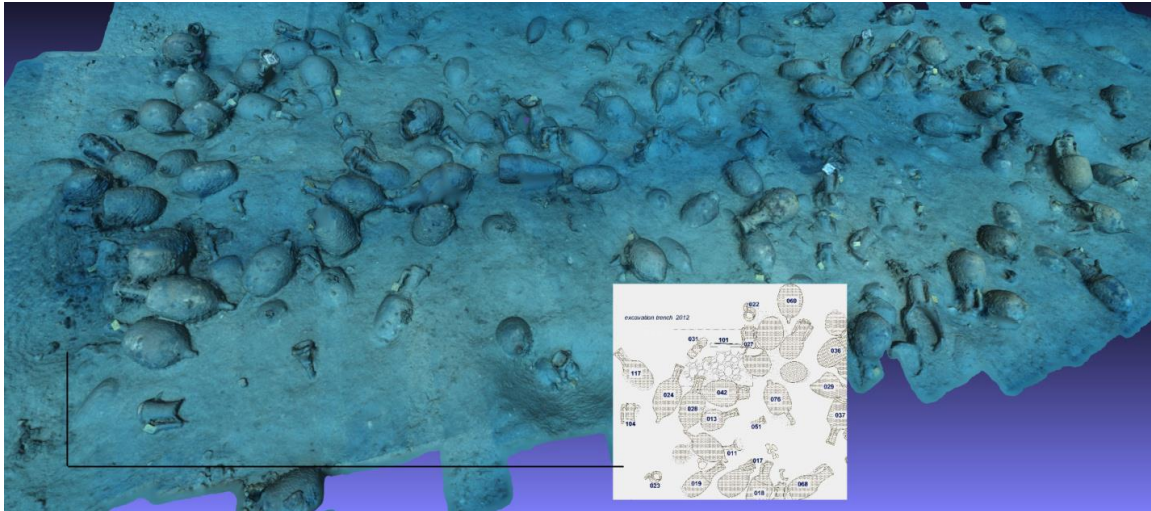
Εικόνα 4.12: Φωτογραμμετρική τεκμηρίωση ναυαγίου & ευρημάτων και 3D ανακατασκευή του ναυαγίου με χρονολογική παράθεση όλων των ανελκυσθέντων ευρημάτων (Vlachaki et al., 2017).

- Η πλήρης τοπογραφική και φωτογραμμετρική τεκμηρίωση του ενάλιου αρχαιολογικού χώρου στο ακρωτήριο Γλάρος στον Παγασητικό Κόλπο, το 2015, από το Ινστιτούτο Εναλίων Αρχαιολογικών Ερευνών, υπό τη διεύθυνση του αρχαιολόγου Ηλ. Σπονδύλη, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος ITACA (Innovation Technologies and Applications for Coastal Archaeological Sites). Η ενάλια αρχαιολογική περιοχή ενδιαφέροντος εκτείνεται από την ακτογραμμή μήκους περίπου 400 m προς τα βορειοδυτικά του ακρωτηρίου, φτάνοντας μέχρι και τα -36 m βάθος, έχει έκταση περί τα 26.000 m<sup>2</sup> και διακρίνεται από διασπορά ευρημάτων (κυρίως άγκυρες πολλαπλών χρονολογικών τοποθετήσεων, αλλά και κεραμικά). Λόγω της ευρείας διασποράς ήταν αδύνατη - αλλά και άσκοπη λόγω της ύπαρξης συνεχών τμημάτων χωρίς αντικείμενο - η πλήρης φωτογραμμετρική κάλυψη της περιοχής. Για το λόγο αυτό, έγινε επιλογή τριών βασικών συγκεντρώσεων, οι οποίες τεκμηριώθηκαν μεμονωμένα αλλά εντάχθηκαν σε κοινό χάρτη με γεωαναφορά τους στο σύστημα ΕΓΣΑ'87, μετά από αναβιβασμό σημείων ελέγχου στην επιφάνεια και μέτρησή τους από την ακτή. Η φωτογραμμετρική αποτύπωση εκπονήθηκε σε δύο επίπεδα κλίμακας, αρχικά σε μικρότερη (απόσταση λήψης περί τα 3-4 m από τον πυθμένα) για την κάλυψη εκτεταμένων περιοχών και έπειτα σε μεγαλύτερη κλίμακα (απόσταση λήψης περί τα 1-2 m από το αντικείμενο) με σκοπό τη λεπτομερέστερη αποτύπωση των ευρημάτων (Εικόνα 4.13).

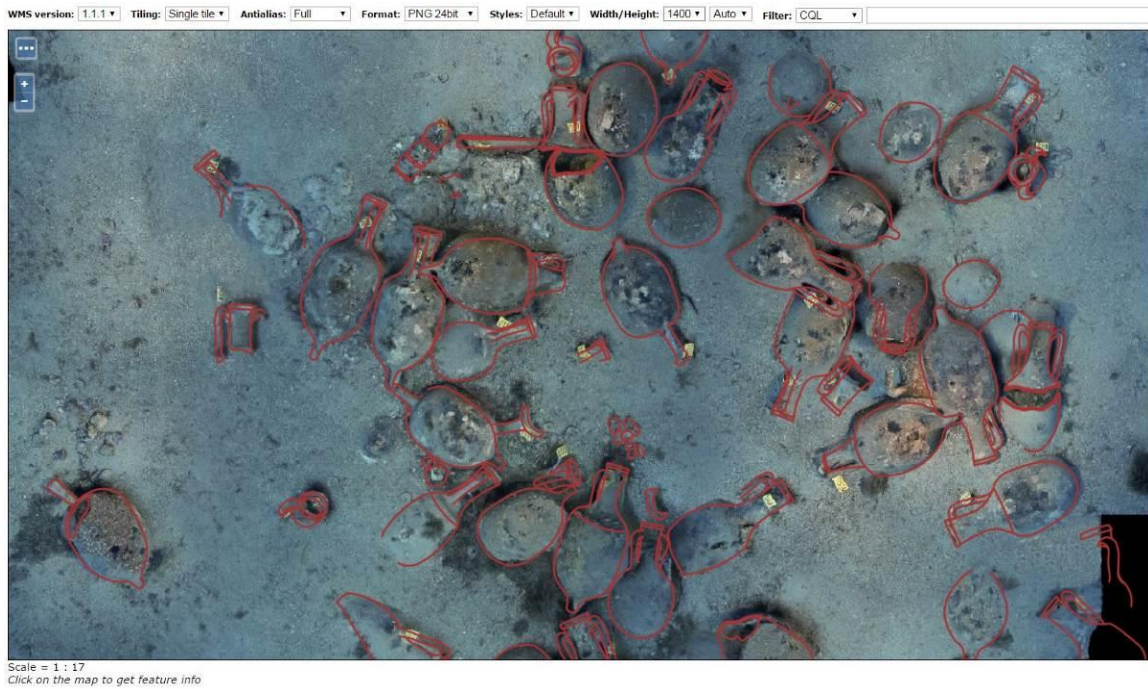


Εικόνα 4.13: 3D ανακατασκευή θέσεων ενάλιου αρχαιολογικού ενδιαφέροντος στο ακρωτήριο Γλάρος στον Παγασητικό Κόλπο (Diamanti et al., 2017).

- Η ενάλια αρχαιολογική έρευνα σε Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο και Μακρόνησο, από το 2007 έως το 2013, από το Ινστιτούτο Εναλίων Αρχαιολογικών Ερευνών, υπό τη διεύθυνση του αρχαιολόγου Δρ. Γ. Κουτσουφλάκη, με σκοπό τον εντοπισμό και την τεκμηρίωση υποβρύχιων αρχαιολογικών στόχων. Αποτέλεσμα των ερευνητικών αποστολών ήταν ο εντοπισμός 26 συνολικά θέσεων, κυρίως ναυαγίων. Από αυτά, επιλέχθηκαν έξι για να αποτυπωθούν φωτογραμμετρικά. Οι δυσμενείς στις περιοχές των ναυαγίων συνθήκες (αυξημένα βάθη με μέσο όρο τα -40 m, υποθαλάσσια ρεύματα και δυσκολία προσέγγισης λόγω καιρικών συνθηκών) επέτρεψαν τη διενέργεια δύο ή τριών καταδύσεων ανά ναυάγιο, με χρόνο βυθού περί τα 20 min. Η ίδρυση και μέτρηση δικτύου φωτοσταθερών σημείων κατέστη δυνατή μόνο σε ένα από τα έξι ναυάγια. Στα υπόλοιπα πέντε, η κλίμακα εξασφαλίστηκε με τοποθέτηση κλιμάκων στη διασπορά κάθε ναυαγίου, ο προσανατολισμός αποδόθηκε με χρήση πυξίδας, ενώ η βυθομετρική τεκμηρίωση επετεύχθη με μετρήσεις βαθών από τους καταδυτικούς υπολογιστές των δυτών. Λόγω της μειωμένης προσβασιμότητας στα σημεία, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιτυχή φωτογράφιση των ναυαγίων. Από επιλύσεις SfM προέκυψαν ορθοφωτοχάρτες, 3D φωτορεαλιστικά μοντέλα και Ψηφιακά Μοντέλα Επιφανείας και Πυθμένα, τα οποία αποτέλεσαν τα υπόβαθρα για τη σχεδιαστική αποτύπωση των ναυαγίων (Εικόνες 4.14, 4.15, 4.16). Για το ένα από τα έξι ναυάγια δημιουργήθηκε επίσης 3D ανακατασκευή του, σε περιβάλλον 3D σχεδίασης, με παράλληλη μοντελοποίηση του βασικού τύπου αμφορέα και ταξινόμηση του αντικειμένου σε επίπεδα όπως κεραμική, μέταλλο, αμμώδης πυθμένας, βραχώδεις περιοχές, φωτοσταθερά σημεία κ.ά. (Εικόνα 4.17).

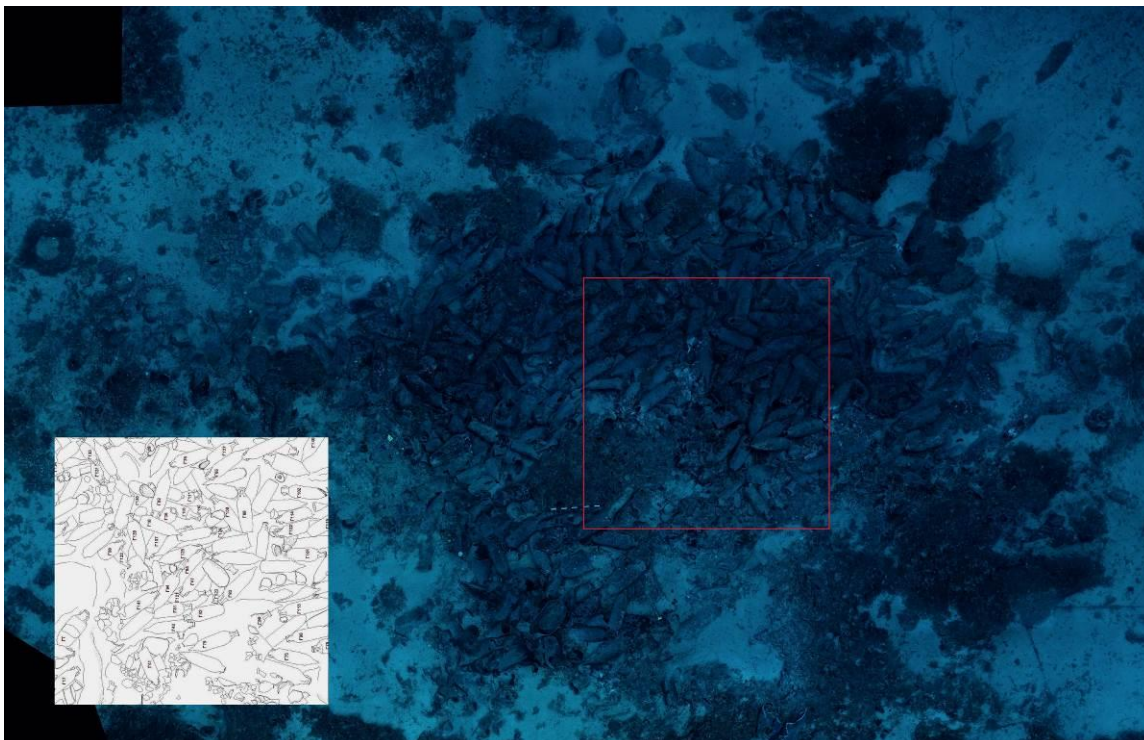


Εικόνα 4.14: 3D ανακατασκευή και απόσπασμα σχεδιαστικής αποτύπωσης ελληνιστικού ναυαγίου του 2<sup>ου</sup> αι. π.Χ., σε βάθος -39m, στη Μακρόνησο (Diamanti et al., 2015).



Εικόνα 4.15: Ψηφιοποίηση ορθοφωτοχάρτη ελληνιστικού ναυαγίου του 2<sup>ου</sup> αι. π.Χ., σε βάθος -39m, στη Μακρόνησο (Diamanti et al., 2015).





Εικόνα 4.16: Ψηφιοποίηση ορθοφωτοχάρτη ναυαγίου ρωμαϊκής περιόδου, σε βάθος -39 έως -45 m, στη Μακρόνησο (Diamanti et al., 2015).

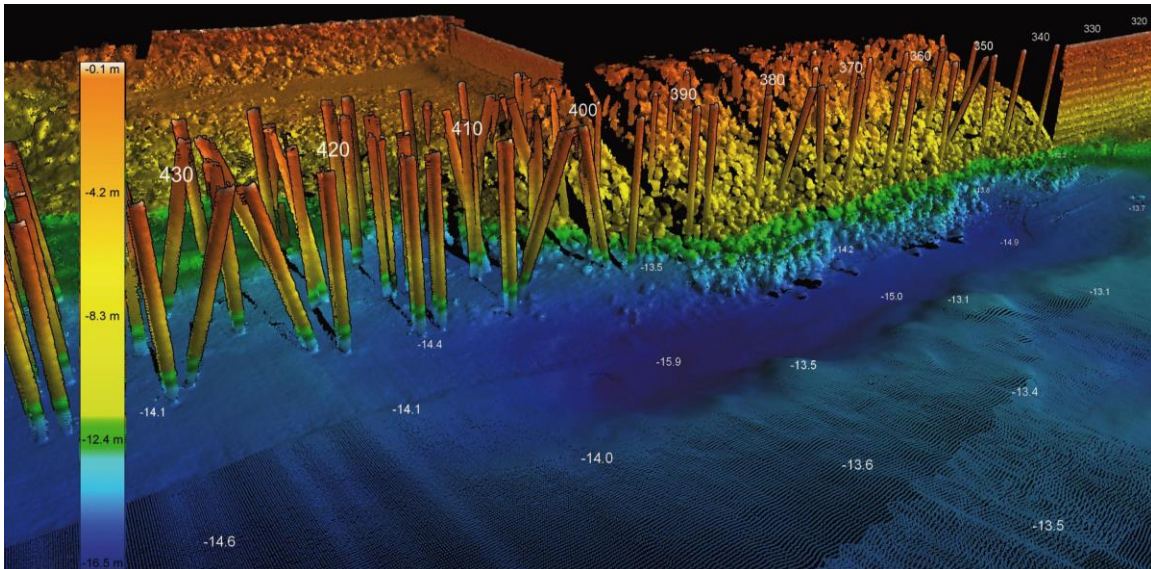
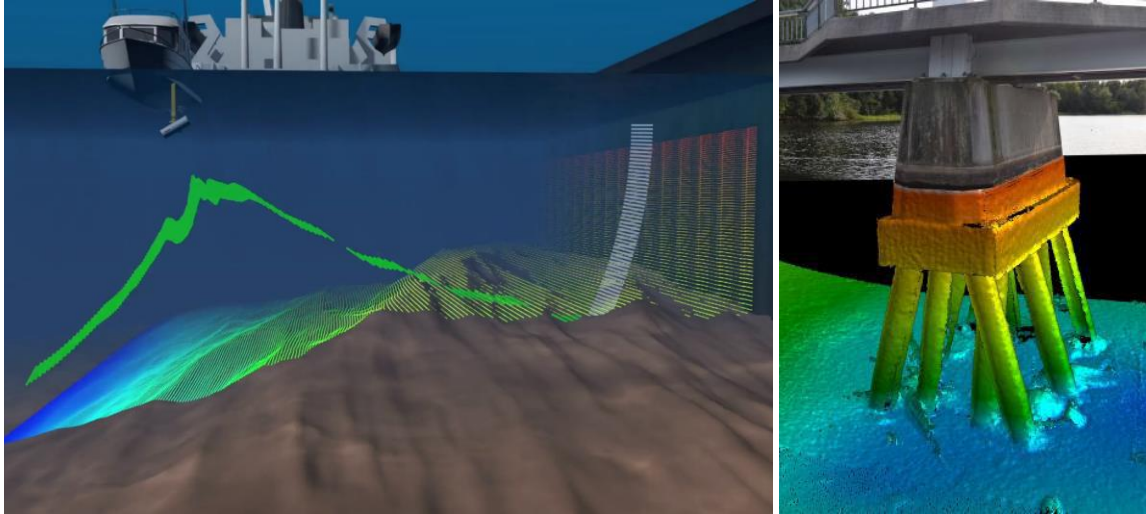


Εικόνα 4.17: 3D μοντελοποίηση και σχεδίαση ελληνιστικού ναυαγίου στη νήσο Αιγιλεία του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου (Diamanti et al., 2015).

- Η ενάλια αρχαιολογική έρευνα στους Φούρνους Ικαρίας, από το Καθίδρυμα Ιστορικών και Αρχαιολογικών Ερευνών “Κορσεαί” σε σύμπραξη με την Εφορεία Εναλίων Αρχαιοτήτων και το ερευνητικό ίδρυμα R.P.M. Nautical Foundation, υπό τη διεύθυνση του αρχαιολόγου Δρ. Γ. Κουτσοφλάκη, που μέχρι σήμερα έχει διανύσει μία τετραετή περίοδο ερευνητικών αποστολών (2015 - 2018) και ως σκοπό έχει τον εντοπισμό, την καταγραφή, τεκμηρίωση και μελέτη αρχαίων, μεσαιωνικών και νεότερων ναυαγίων. Στο νησιωτικό σύμπλεγμα του αρχιπελάγους των Φούρνων έχουν εντοπιστεί συνολικά 58 ναυάγια και μεμονωμένα ευρήματα, όπως απορρίψεις κεραμικής και άγκυρες. Αντίστοιχα με τις προαναφερθείσες ενάλιες αρχαιολογικές έρευνες, η τρισδιάστατη ανακατασκευή επιλεγμένων θέσεων ενδιαφέροντος πραγματοποιήθηκε με φωτογραφικές λήψεις και μετρητικές παρατηρήσεις αυτοδυτών. Η φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων από 50 περίπου ναυάγια βρίσκεται σε εξέλιξη, ενώ σημαντική ήταν και η καινοτόμα εφαρμογή χαρτογράφησης και τρισδιάστατης αναπαράστασης περιοχής αγκυροβολίων με χρήση τηλεκατευθυνόμενου οχήματος ROV, κατηγορίας Επιθεωρήσεων (Inspection Class) και σύστημα εντοπισμού υποβρύχιας θέσης USBL. Το Ίδρυμα R.P.M. διέθεσε για τις ανάγκες της έρευνας των Φούρνων το ερευνητικό σκάφος Herkules, στελεχωμένο με όργανα τεχνολογίας αιχμής για την πλοήγηση και καταγραφή πληροφορίας, μεταξύ των οποίων multibeam sonar και working class ROV. Με χρήση του πολυδεσμικού σαρωτή σαρώθηκαν εκτεταμένες θαλάσσιες περιοχές με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών στόχων. Ο συνδυασμός των δεδομένων σάρωσης από το multibeam και των δεδομένων καταγραφής θέσης και εικόνων για τρισδιάστατη ανακατασκευή από το ROV πρόκειται να αποδώσει την ολοκληρωμένη εικόνα της υποθαλάσσιας περιοχής των αγκυροβολίων. Τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης είναι υπό επεξεργασία για δημοσίευση το προσεχές διάστημα.

### **Λιμενικά Έργα και Κατασκευές**

Η δυνατότητα τρισδιάστατης ανακατασκευής υποθαλάσσιων αντικειμένων αποτέλεσε καθοριστικό εργαλείο στον λειτουργικό σχεδιασμό μελετών, την επίβλεψη, κατασκευή και συντήρηση λιμενικών έργων και κατασκευών, μεταξύ των οποίων κρηπιδότοιχοι, έργα προστασίας έδρασης κρηπιδωμάτων, αγωγοί ύδρευσης, αποχέτευσης, υγρών καυσίμων ή διέλευσης καλωδίων, ναύδετα, αγκυροβόλια, προσκρουστήρες, βυθοκορρήσεις, θαλάσσιες επιχώσεις, εγκαταστάσεις φορτοεκφόρτωσης πετρελαιοειδών και προσαιγιαλώσεις καλωδίων. Ο συνηθέστερος τρόπος συλλογής δεδομένων για την λεπτομερή τρισδιάστατη ανακατασκευή μιας υποθαλάσσιας κατασκευής είναι η χρήση σαρωτών πολλαπλής δέσμης (multibeam ecosounder sonars), τα οποία συνήθως φέρουν σκάφη ή πλατφόρμες υποστήριξης, με δυνατότητες επιλογής συχνοτήτων λειτουργίας ανάλογες των επιδιωκόμενων αποτελεσμάτων και ακριβή εντοπισμό θέσης μέσω δεκτών GNSS σε πραγματικό χρόνο. Οι τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία των σαρωτών multibeam δίνουν τη δυνατότητα αποτύπωσης με ανάλυση 1 cm και επίπεδα ακρίβειας ~ 2-3 cm στην οριζοντιογραφική θέση του οργάνου, ~ 0.03° στις γωνίες κίνησης pitch και roll και < 0.05 ° στον προσανατολισμό (heading), ενώ παρέχεται σε πραγματικό χρόνο η εκτίμηση της ακρίβειας TPU (Total Propagated Uncertainty), μέσω του συνδυασμού της αβεβαιότητας κάθε δέσμης και της συνόρθωσης των δεδομένων από τους υπόλοιπους αισθητήρες πλοήγησης. Τα αποτελέσματα εφαρμογών από πολυδεσμικούς σαρωτές είναι συνήθως τόσο απαραίτητα στις μελέτες λιμενικών έργων όσο και εντυπωσιακά (Εικόνα 4.18).



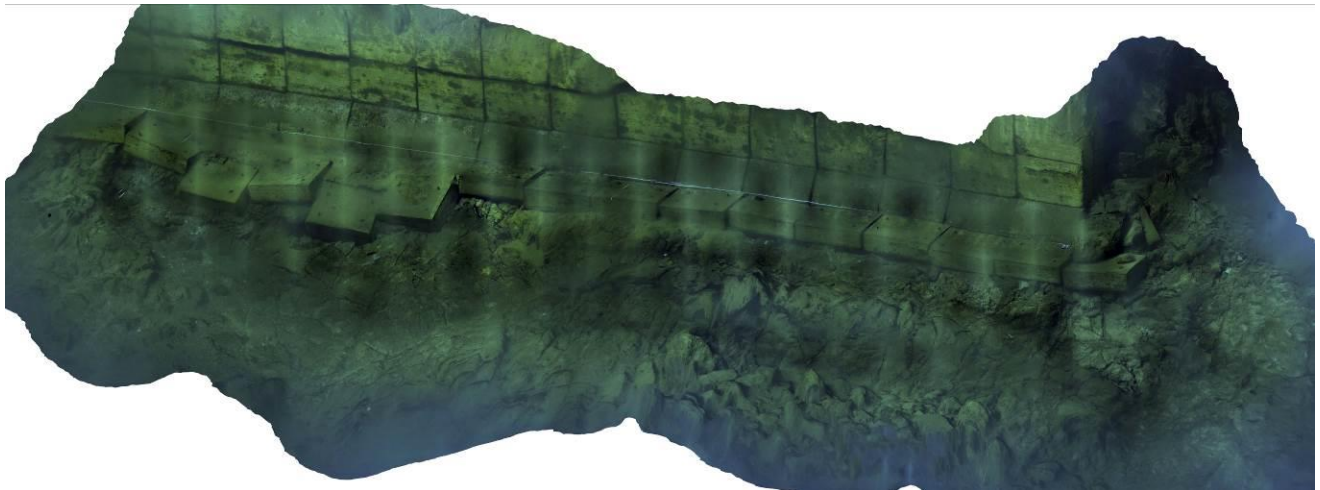
Εικόνα 4.18: Αποτελέσματα 3D ανακατασκευής λιμενικών έργων από δεδομένα σαρώτων multibeam ([www.vrt.fi](http://www.vrt.fi)).

Οι Διαμαντή Ελ., Μεντόγιαννης Β. και Παπαγεωργίου Κ., στο πλαίσιο μίας σειράς ύφαλων επιθεωρήσεων λιμένων σε όλη την Ελλάδα (Ηράκλειο, Μυτιλήνη, Χίος, Σύμη, Κως, Μύκονος, Κεφαλονιά κ.ά.), εκμεταλλεόμενοι την αλματώδη εξέλιξη των μέσων καταγραφής υποβρύχιας γεωμετρικής και οπτικής πληροφορίας, όπως επίσης και την εξίσου σημαντική ανάπτυξη των μεθόδων 3D ανακατασκευής της Όρασης Υπολογιστών, όπως οι τεχνικές SfM, ανέπτυξαν μεθοδολογία 3D αποτυπώσεων υποθαλάσσιων αντικειμένων, τα τελικά παράγωγα της οποίας πλεονεκτούν της ανάλυσης και ακρίβειας των σαρώσεων multibeam, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν τη δυνατότητα απόδοσης φωτορεαλισμού στο αντικείμενο, αφού προέρχονται κυρίως από την επεξεργασία εικόνων από κάμερες HD. Βασικός άξονας της μεθοδολογίας τους αποτελεί η φωτογραφική σάρωση της περιοχής ενδιαφέροντος, βάσει των τυπικών κανόνων SfM ως προς τη γεωμετρία των λήψεων, τις επικαλύψεις και τη ραδιομετρική συνέπεια. Η κλίμακα και γεωαναφορά του αντικειμένου στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς εξασφαλίζεται με πόντιση κλιμάκων γνωστών διαστάσεων και τη χρήση φωτοσταθερών σημείων και σημείων ελέγχου. Τέτοιου είδους σημεία μπορεί να είναι είτε φυσικά (γωνίες και άλλα χαρακτηριστικά

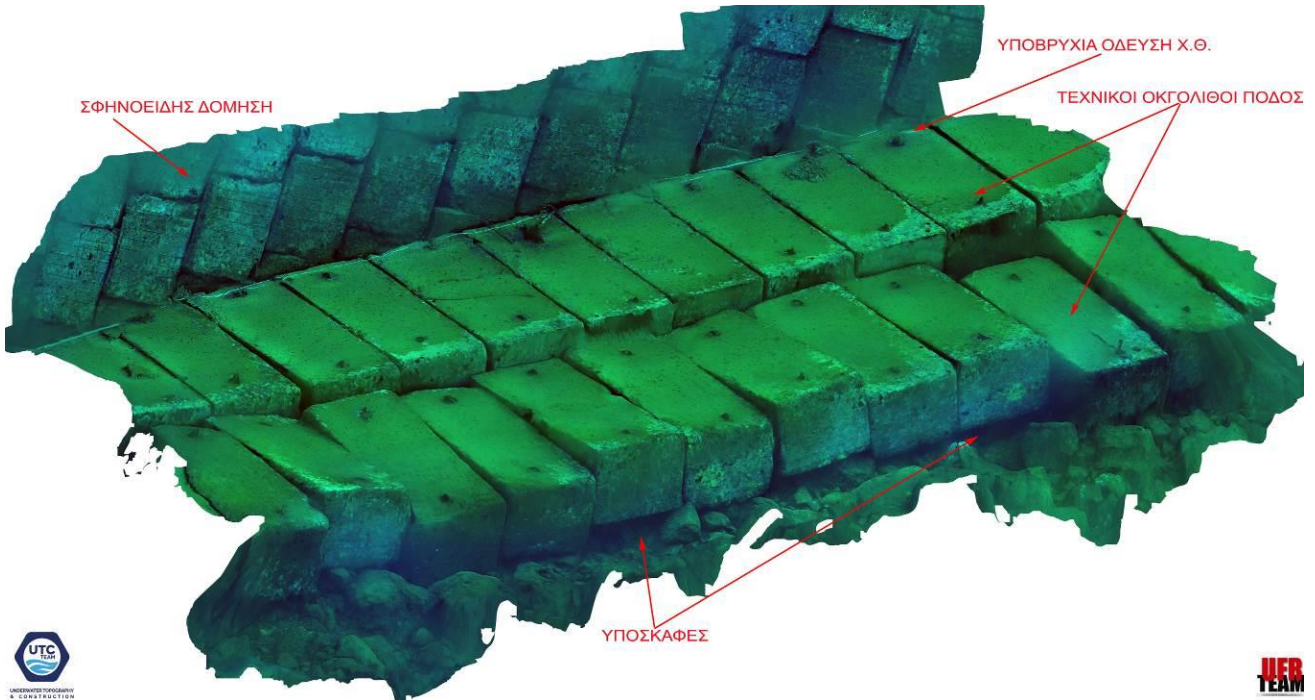
κατασκευαστικά σημεία, γνωστά από υπάρχουσες τοπογραφικές μετρήσεις) είτε τεχνητά - και συνήθως όχι μόνιμα - που υλοποιούνται και μετρούνται από την ομάδα. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου διενεργείται παράλληλα πλήρης βυθομετρική αποτύπωση ενός λιμένα, το νέφος των βυθομετρικών σημείων χρησιμοποιείται συνδυαστικά, για τη συνένωσή του με το τρισδιάστατο νέφος σημείων από την επίλυση SfM και την τελική απόδοση κλίμακας και θέσης στο φωτογραμμετρικό μοντέλο. Ακόμα κι αν οι οπτικοί αισθητήρες είναι υψηλής ανάλυσης, το υποβρύχιο περιβάλλον ενός λιμένα συχνά δεν επιτρέπει τη λήψη ικανοποιητικών εικόνων λόγω κακής ορατότητας, θολότητας και αιωρούμενων σωματιδίων, με αποτέλεσμα η απόσταση κάμερας-αντικειμένου να διατηρείται πολύ μικρή (συχνά έως και 20 cm), κάτι που εκτοξεύει τον όγκο της συλλεγόμενης πληροφορίας. Οι επόμενες εικόνες, που χρησιμοποιούνται κατά τις επιλύσεις SfM, αποτελούν τυπικά δείγματα φωτογραφικών λήψεων εντός ενός λιμένα.

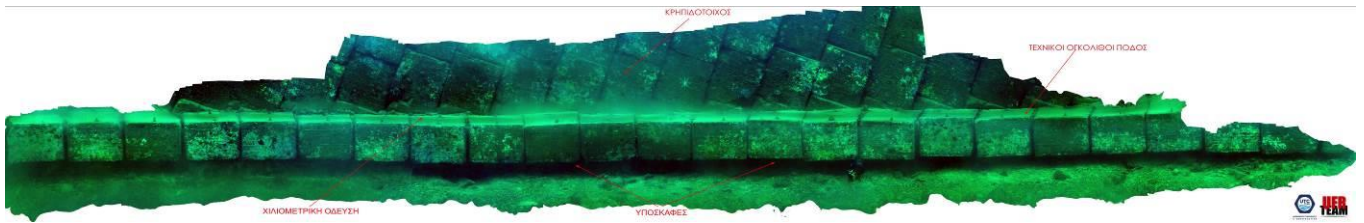


Αρχικά, η μέθοδός τους αφορούσε λήψεις εικόνων και μετρήσεων αποκλειστικά από τους ίδιους με καταδυτική προσέγγιση. Αργότερα, οι συχνές απαγορευτικές για τον άνθρωπο συνθήκες εντός ενός λιμένα (όπως οι μηδενικές ορατότητες, η υψηλή συγκέντρωση λυμάτων και απορριμάτων, η αδυναμία διατήρησης προσανατολισμού και διεξαγωγής οποιασδήποτε ύφαλής εργασίας) ώθησαν την ομάδα στην επέκταση της μεθόδου στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα, και συγκεκριμένα στη χρήση υποβρύχιου τηλεκατευθυνόμενου οχήματος ROV, με σύστημα εντοπισμού υποβρύχιας θέσης. Πέραν της λήψης των δεδομένων με σκοπό την τρισδιάστατη ανακατασκευή, η χρήση ROV κατά την ύφαλη επιθεώρηση αύξησε τους, έως τότε περιορισμένους, χρόνους βυθού, ελαχιστοποίησε την ανάγκη για διενέργεια μετρήσεων με σκοπό την απόδοση κλίμακας και γεωαναφοράς, ενώ με εφαρμογή μεθόδων Οπτικής Οδομετρίας κατέστη δυνατός ο έλεγχος της τροχιάς του ROV και της κάλυψης της περιοχής εργασίας μέσω αραιής ανακατασκευής. Ως τώρα έχουν καλυφθεί φωτογραμμετρικά, με δεδομένα ακολουθιών βίντεο, πάνω από 2 km, κυρίως κρηπιδωμάτων και έδρασης κρηπιδότοιχου, σε λιμένες σε ολόκληρη την Ελλάδα, χαρακτηριστικά δείγματα των οποίων παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.19 - 4.21. Η έρευνα των Διαμαντή, Μεντόγιαννη και Παπαγεωργίου βρίσκεται υπό επεξεργασία προς δημοσίευση.

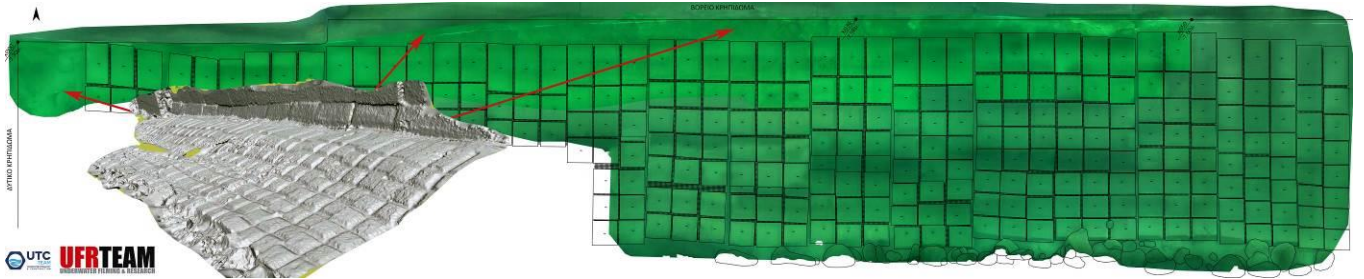


Εικόνα 4.19: Τμήμα 3D ανακατασκευής κρηπιδώματος Λιμένα Σύμης





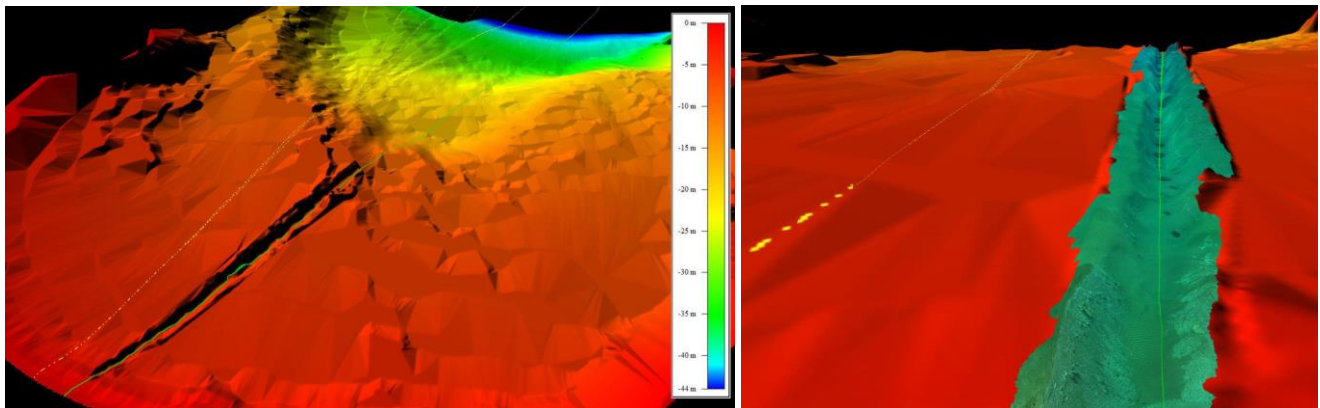
Εικόνα 4.20: 3D ανακατασκευή κρηπιδώματος και συστήματος προστασίας κρηπιδώματος Λιμένα Ηρακλείου



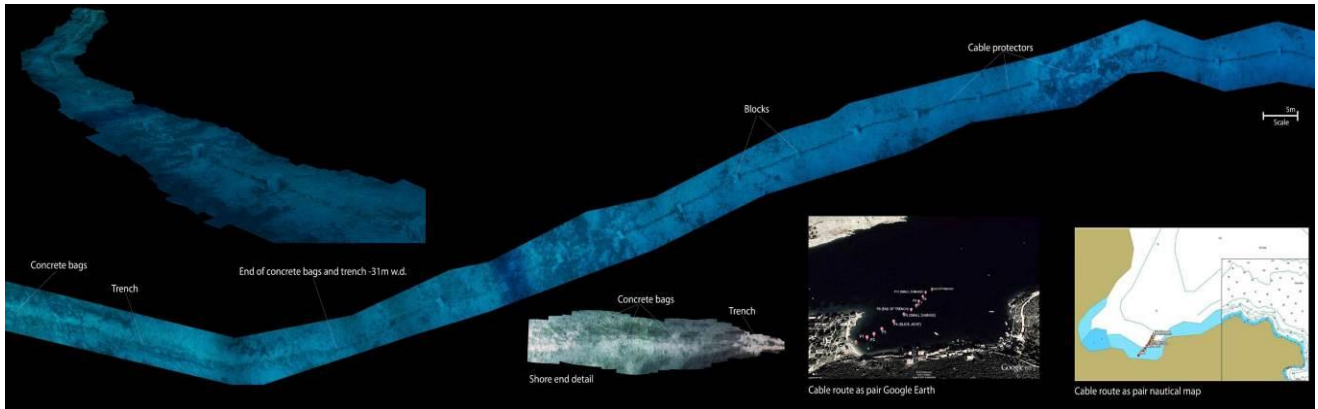
Εικόνα 4.21: Κάτοψη και 3D προοπτική όψη συστήματος προστασίας κρηπιδώματος Λιμένα Μυτιλήνης

### Υπεράκτια Βιομηχανία

Αντίστοιχα, η προαναφερθείσα μέθοδος εφαρμόστηκε σε εφαρμογές υπεράκτιας βιομηχανίας (Offshore Industry), όπου η χρήση υποβρύχιων οχημάτων επιβάλλεται λόγω αυξημένου βάθους. Έργα υπεράκτιας βιομηχανίας θεωρούνται η δημιουργία υπεράκτιων αιολικών πάρκων, οι μελέτες της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι ποντίσεις καλωδίων ενέργειας ή τηλεπικοινωνιών (Εικόνες 4.22, 4.23) ή οι ποντίσεις αγωγών.



Εικόνα 4.22: Χαρτογράφηση όδευσης και 3D φωτορεαλιστική απεικόνιση ορύγματος πόντισης καλωδίου



Εικόνα 4.23: Χαρτογράφηση όδευσης καλωδίου τηλεπικοινωνιών

## 5 | Το πρόβλημα SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στο πεδίο της αυτόνομης ρομποτικής είναι ο ταυτόχρονος προσδιορισμός της θέσης ενός κινούμενου αντικείμενου και η χαρτογράφηση του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται το αντικείμενο, γνωστό με τον όρο SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Η πρώτη ολοκληρωμένη διατύπωση του προβλήματος SLAM έρχεται από τους Durrant-Whyte στις αρχές της δεκαετίας του '90, η δουλειά των οποίων στηρίχθηκε στη μελέτη των Smith, Crowley και Cheeseman, με την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου πλοήγησης μέσω της χρήσης ενός υποβρύχιου ραντάρ (sonar-based navigation), κατά τον οποίο με βάση ένα μοντέλο περιβάλλοντος, ήταν δυνατή η εκτίμηση της θέσης του. Αυτός ο αλγόριθμος εκτίμησης θέσης αναπτύχθηκε βάσει ενός φίλτρου, του Extended Kalman Filter (EKF), το οποίο προσέφερε τη δυνατότητα εκτίμησης των θέσεων του συστήματος, με αξιοποίηση των δεδομένων από το σόναρ, με μεγάλη ταχύτητα (Ribas, 2008).

Σχετικά με τον όρο SLAM, προκύπτουν δύο ερωτήματα: αυτό του localization και αυτό του mapping. Ως localization νοείται ο εντοπισμός της θέσης του ρομπότ στο χώρο, μέσα από τη χρήση χαρακτηριστικών σημείων (ορόσημα) και προϋπόθεση τη γνώση του χάρτη του χώρου. Το πρόβλημα του εντοπισμού της θέσης θεωρείται ευρύ και διαιρείται σε δύο υποκατηγορίες: τον σύνολο εντοπισμό θέσης (global position tracking), όπου η θέση του ρομπότ προσδιορίζεται βάσει ενός γνωστού χάρτη (αν δεν υπάρχει χαρτογραφικό υπόβαθρο θα πρέπει με κάποιο τρόπο να δημιουργηθεί) και τον τοπικό εντοπισμό θέσης (local position tracking), όπου η θέση του ρομπότ προσδιορίζεται βάσει της προηγούμενης γνωστής θέσης του και τα στοιχεία του προσανατολισμού, της ταχύτητας και της επιτάχυνσής του, δηλαδή μέσω τεχνικών dead reckoning (Ulrich & Nourbakhsh, 2000). Με τον όρο mapping περιγράφεται η διαδικασία της χαρτογράφησης του περιβάλλοντος χώρου όπου κινείται το ρομπότ, είτε αυτός είναι στατικός, δυναμικός, εσωτερικός ή εξωτερικός, με αξιοποίηση των δεδομένων των αισθητήρων.

Η ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων από ακουστικές και αδρανειακές μετρήσεις έχει μεγάλο εύρος, το οποίο εξαρτάται αφενός, σε μεγαλύτερο βαθμό, από την τεχνολογία και το κόστος των αισθητήρων και αφετέρου, σε μικρότερο βαθμό, από τις τεχνικές και τη μεθοδολογία που εφαρμόζεται. Τα αδρανειακά, για παράδειγμα, συστήματα έχει αποδειχθεί, ότι έχουν την τάση να φέρουν σφάλματα που, επενεργώντας συσσωρευτικά, δίνουν σημαντικές αποκλίσεις και για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η παρακολούθηση και ταυτόχρονη διόρθωσή τους κατά τη διάρκεια της πλοήγησης. Στις τεχνικές dead reckoning η συσσώρευση σφαλμάτων οφείλεται στο θόρυβο των παρατηρήσεων, σε συστηματικά σφάλματα των αισθητήρων, σε πιθανές ολισθήσεις (drift) ή ακόμα και σε σφάλμα του κινηματικού χρησιμοποιούμενου μοντέλου λόγω άστοχης αρχικοποίησής του. Για τη βελτιστοποίηση της επίλυσης του προβλήματος SLAM και στο υποβρύχιο περιβάλλον έδωσε λύσεις η Όραση Υπολογιστών εισάγοντας τον όρο Visual SLAM, που αφορά μία κατηγορία αλγορίθμων SLAM, σχετικών με την αξιοποίηση των εικονιστικών δεδομένων μίας ή περισσότερων καμερών του υποβρύχιου οχήματος. Η τυπική ροή της διαδικασίας VSLAM ξεκινά με την αρχικοποίηση των παραμέτρων και τη δημιουργία του πρώτου νέφους ομολογιών, συνεχίζει με την ανίχνευση της τρέχουσας θέσης της κάμερας, τη χαρτογράφηση με τη χρήση του επόμενου βασικού καρέ για προσθήκη νέων τρισδιάστατων σημείων και καταλήγει με την βελτιστοποίηση της χαρτογράφησης (σε τοπικό επίπεδο). Οι



ομοιότητες των αλγορίθμων VSLAM με εκείνους του προβλήματος SfM είναι εμφανείς, λόγω του ζητούμενου που είναι η ανακατασκευή του χώρου με παράλληλο προσδιορισμό των θέσεων της κάμερας κατά τις λήψεις, κάτι που βιβλιογραφικά, απαντάται συχνά ως μία πυραμιδική σχέση μεταξύ VSLAM και SfM, με το Visual SLAM για πολλούς να αποτελεί υποκατηγορία του SfM. Ωστόσο, αν και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν σαφείς ομοιότητες, ταυτόχρονα παρουσιάζουν και σαφείς διαφορές, όπως οι χρόνοι επίλυσης και η ακρίβεια. Στις εφαρμογές SLAM συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο είναι σημαντικότερες από τις απαιτήσεις σε ακρίβεια. Το ζητούμενο είναι η ανακατασκευή σε πραγματικό χρόνο και όχι κάποιο μετρητικό προϊόν, το οποίο στην περίπτωση των προβλημάτων SfM, θα προσδιοριστεί τελικά μετά από επαναληπτικές διαδικασίες, όπως η συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης. Στις εφαρμογές VSLAM η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται σε τοπικό επίπεδο, κατά το κλείσιμο βρόχων (loop closure) που αφορά τμήματα της διαδρομής που συναντά το όχημα παραπάνω από μία φορές κατά την πορεία του. Στο παρόν κεφάλαιο διατυπώνεται αρχικά το γεωμετρικό πρόβλημα του SLAM, ενώ στη συνέχεια καταγράφονται οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι SLAM κατά τη χαρτογράφηση του υποβρύχιου περιβάλλοντος με UUVs.

Η πρώτη εφαρμογή τεχνικών SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον καταγράφεται το 1997 όπου χρησιμοποιήθηκαν, στο πλαίσιο ερευνητικού έργου του αμερικανικού ναυτικού, δεδομένα από αισθητήρες GPS, INS, DVL και side scan sonar, τοποθετημένους σε όχημα AUV, για τη δοκιμαστική εφαρμογή τεχνικών EKF SLAM. Λίγο αργότερα, το Πανεπιστήμιο του Σίδνεϊ (Newman, 1999) επιχείρησε επιλύσεις SLAM, σε ελεγχόμενο περιβάλλον δεξαμενής, με τεχνητά ορόσημα (landmarks) και δεδομένα ακουστικών εικόνων από όργανο sonar τοποθετημένο σε AUV. Η εργασία τους στηρίχθηκε σε μία μέθοδο βάσει φίλτρων, την Geometrical Projection Filter (GPF), η οποία επικεντρώνεται στον υπολογισμό των σχετικών θέσεων μεταξύ των οροσήμεν και όχι στον εντοπισμό των οροσήμεν στις συντεταγμένες του συστήματος αναφοράς του μοντέλου (global coordinates). Στη συνέχεια, οι ίδιοι (Williams et al., 2001) επέκτειναν την έρευνά τους σε πραγματικές συνθήκες, υλοποιώντας πάλι τεχνητά ορόσημα επί του πυθμένα, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά την μέθοδο EKF. Την ίδια περίοδο, οι Tena et al. (2001) έστρεψαν το ενδιαφέρον τους στην εξαγωγή και περιγραφή οροσήμεν από ακουστικές εικόνες καθώς και το συσχετισμό τους με το όχημα και την πορεία του, υπολογίζοντας για κάθε ένα από αυτά τη σχετική θέση του κέντρου του ως προς το όχημα, το μέγεθός του και τη μη μεταβλητότητά του στο χρόνο. Κάθε νέος στόχος-ορόσημο που πληρούσε τα κριτήρια, χρησιμοποιούνταν για την ανανέωση του αρχικού υποθετικού χάρτη, μέσω εφαρμογής μεθόδου Multiple Hypothesis Tracking Filter (Reid, 1979). Το αξιοσημείωτο της μεθόδου των Tena et al. (2001) ήταν ότι ήταν λειτουργική ως μεθοδολογία SLAM για την ανίχνευση και τη συσχέτιση οροσήμεν-οχήματος μόνο από τα δεδομένα των ακουστικών εικόνων και χωρίς τη χρήση γνωστών σημείων ελέγχου ή δεδομένων πλοήγησης dead reckoning. Οι Leonard & Newman (2003) πρότειναν έναν αλγόριθμο SLAM, τον Constant Time SLAM (CTS), για τη δημιουργία τοπικών, επικαλυπτόμενων μεταξύ τους, χαρτών, κατά την πορεία ενός οχήματος, με παράλληλο υπολογισμό της βέλτιστης θέσης τους στο ενιαίο σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου. Η μέθοδος εξετάστηκε με δεδομένα σόναρ από όχημα AUV, αρχικά για την ανίχνευση οροσήμεν στον περιβάλλοντα χώρο και στη συνέχεια με συσχέτισή τους, με τα “αληθή”, όπως ορίστηκαν, δεδομένα του συστήματος πλοήγησης. Κάθε επιμέρους τοπικός χάρτης περιείχε τουλάχιστον ένα ορόσημο, τα ορόσημα γεωαναφέρθηκαν βάσει των δεδομένων πλοήγησης και όλα τα παραπάνω συνορθώθηκαν ενιαία, με σκοπό τη δημιουργία του συνολικού χάρτη του περιβάλλοντος χώρου, με τα τελικά αποτελέσματα να

αποδεικνύουν τη μέθοδο CTS αφενός αξιόπιστη και αφετέρου ανεξάρτητη του όγκου της προς χαρτογράφηση περιοχής και των συλλεγόμενων δεδομένων.

## 5.1 Γενική διατύπωση του προβλήματος SLAM

Το “άλυτο”, κατά τη γενική διατύπωσή του, πρόβλημα του SLAM, περιγράφει τη διαδικασία δημιουργίας ενός ακριβούς και λεπτομερούς χάρτη μέσα στον οποίο κινείται ένα όχημα, με τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της θέσης του οχήματος, χωρίς ωστόσο πρότερη γνώση ούτε της θέσης του οχήματος αλλά ούτε και του χάρτη· ένα πρόβλημα όμοιο με το εκλαϊκευμένο πρόβλημα του “αν η κότα έκανε το αυγό ή το αυγό την κότα”. Επί της ουσίας πρόκειται για ένα πιθανοτικό πρόβλημα, του οποίου τα δύο υποπροβλήματα χτίζονται σταδιακά, με αρχικές δεσμεύσεις, έστω και μη ακριβείς, για την εναλλάξ επίλυση του χάρτη και της θέσης. Βασικός κορμός του προβλήματος SLAM παραμένει η αβεβαιότητα. Αν και τόσο το περιβάλλον του οχήματος όσο και η τρέχουσα θέση του είναι άγνωστα, μέσα από μία σειρά πιθανολογικών παρατηρήσεων σχηματίζεται ένας χάρτης και ορίζεται μία θέση για την ακριβώς προηγούμενη στιγμή, τα οποία ανανεώνονται και επανασχεδιάζονται βάσει των παρατηρήσεων κάθε νέας χρονικής στιγμής. Η ζητούμενη πιθανότητα του SLAM περιγράφεται από τη σχέση:

$$P(x_k, m | Z_{0:k}, U_{0:k}, x_0)$$

όπου  $x_k$  η θέση του οχήματος,  $m$  ο χάρτης ή τα ορόσημα,  $z_{0:k}$  οι παρατηρήσεις και  $u_{0:k}$  τα στοιχεία της κίνησης του οχήματος. Στόχος είναι ο ταυτόχρονος προσδιορισμός του χάρτη και της θέσης του οχήματος με δεδομένα τις παρατηρήσεις και τις εντολές ελέγχου της κίνησης. Όλο το πρόβλημα αναλύεται βάσει δύο μοντέλων: του μοντέλου κίνησης και του μοντέλου παρατήρησης. Έστω  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  οι θέσεις ενός οχήματος, από το σημείο εκκίνησης  $x_1$  έως το σημείο  $x_k$  (Εικόνα 5.1). Για χρονική στιγμή  $k$  ορίζονται τα εξής:

- $x_k$  το διάνυσμα θέσης και προσανατολισμού του οχήματος (state vector)
- $u_k$  το διάνυσμα ελέγχου (control vector) του οχήματος, που εφαρμόζεται για χρονική στιγμή  $k - 1$  ώστε αυτό να κινηθεί στη θέση  $x_k$  τη στιγμή  $k$
- $m_i$  το διάνυσμα της θέσης του  $i$ -οστού οροσήμου, του οποίου η πραγματική θέση είναι ανεξάρτητη του χρόνου
- $z_{ik}$  το διάνυσμα παρατήρησης (observation vector) που λαμβάνουν οι αισθητήρες του οχήματος για τη θέση του  $i$ -οστού οροσήμου τη χρονική στιγμή  $k$
- $X_{0:k} = \{x_0, x_1, \dots, x_k\} = \{X_{0:k-1}, x_k\}$  οι θέσεις του οχήματος
- $u_{0:k} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\} = \{U_{0:k-1}, u_k\}$  οι παράμετροι ελέγχου της κίνησης
- $m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$  το σύνολο των οροσήμων
- $Z_{0:k} = \{z_1, z_2, \dots, z_k\} = \{Z_{0:k-1}, z_k\}$  το χρονικό των παρατηρήσεων ανά ορόσημο.

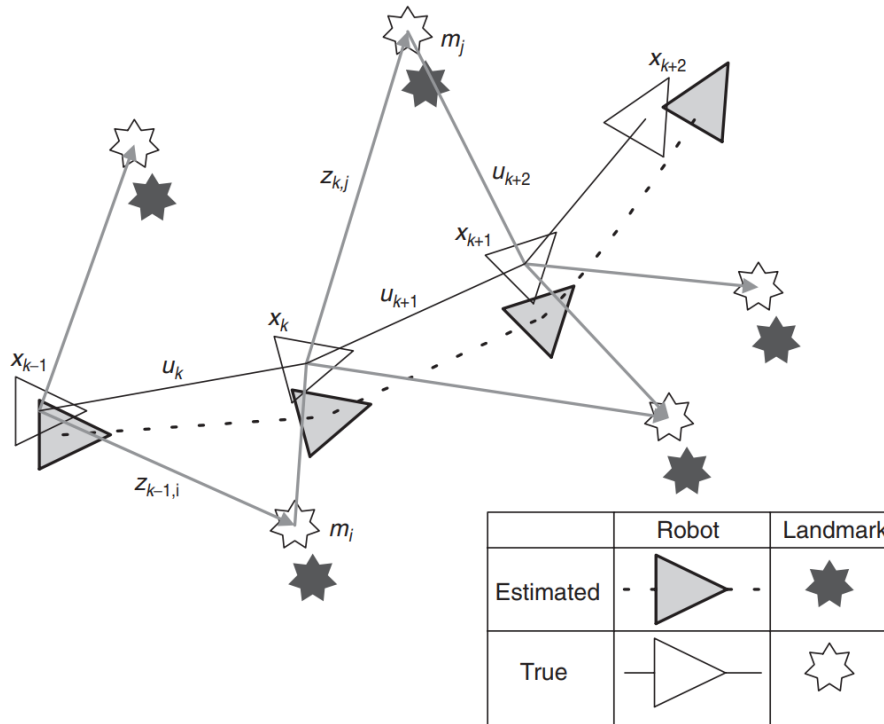
Το μοντέλο κίνησης του οχήματος υπολογίζει για κάθε νέα χρονική στιγμή τη νέα θέση του οχήματος και περιγράφεται ως μία διασπορά πιθανοτήτων στη μεταβολή της θέσης υπό μορφή:

$$P(x_k | X_{k-1}, U_k)$$

Το μοντέλο παρατήρησης περιγράφει την πιθανότητα καταγραφής μίας παρατήρησης  $z_k$  όταν οι θέσεις οχήματος και χαρακτηριστικών σημείων είναι γνωστές και περιγράφεται με τη μορφή

$$P(z_k | X_k, m)$$

Θεωρητικά, με την προϋπόθεση ότι οι θέσεις οχήματος και χαρακτηριστικών σημείων είναι γνωστές, οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι ανεξάρτητες του δεδομένου χάρτη και της τρέχουσας θέσης του οχήματος.



Εικόνα 5.1: Το πρόβλημα SLAM. Ταυτόχρονη εκτίμηση της θέσης του οχήματος με την χαρτογράφηση του περιβάλλοντος χώρου του. Οι πραγματικές θέσεις του οχήματος και ο χώρος δεν είναι γνωστά, ενώ οι παρατηρήσεις που καταγράφονται αφορούν τις πραγματικές θέσεις μεταξύ οχήματος και landmarks (Durrant-Whyte & Bailey, 2006).

Στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα όλες οι παρατηρήσεις καταγράφονται κυρίως από ακουστικούς και οπτικούς αισθητήρες. Η ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων είναι υπεύθυνη για την εξαγωγή σημείων οροσήμων, ενώ η τελική συνταύτιση προκύπτει από επαναληπτική διαδικασία συσχέτισης αληθών και πιθανών τιμών δεδομένων.

## 5.2 Κατηγοριοποίηση μεθοδολογιών SLAM

Για την Ρομποτική, η κατηγοριοποίηση των βασικών τεχνικών εφαρμογής SLAM σε ένα αυτόνομο ρομποτικό σύστημα αφορά δύο μέρη: στις μεθόδους πιθανοτήτων, που στηρίζονται σε βασικούς αλγόριθμους πρόβλεψης (φίλτρο Bayes, υπόθεση Markov, φίλτρο Kalman, φίλτρο Extended Kalman κ.ά.) και τις μεθόδους σάρωσης και αντιστοίχισης του χώρου (scan matching), κατά τις οποίες ο χώρος περιγράφεται με την αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από τα δεδομένα των αισθητήρων, μέσω μεθόδων όπως οι F2F (Feature to Feature), P2F (Point to Feature), P2P (Point to Point) και Com (Combined method).

Στις περιπτώσεις SLAM όπου βασικός αισθητήρας καταγραφής δεδομένων είναι μία οπτική μηχανή, είτε μόνη της (monocular) είτε εντός συστήματος καμερών (stereo, multi-view-stereo), η κατηγορία Visual SLAM (ταυτόχρονος “οπτικός” εντοπισμός θέσης και χαρτογράφηση), διακρίνεται σε δύο ειδών μεθοδολογίες: τις μεθόδους τις βασισμένες σε φίλτρα (filter-based) και τις μεθόδους τις βασισμένες σε βασικά καρέ (keyframe-based). Οι αλγόριθμοι filter-based στηρίζονται στην ενσωμάτωση παρατηρήσεων από πολλαπλούς αισθητήρες, χρησιμοποιώντας κατανομές πιθανοτήτων βάσει των χαρακτηριστικών σημείων και των θέσεων της κάμερας. Σε κάθε εικόνα εφαρμόζεται ένα φίλτρο για την εκτίμηση της τροχιάς του οχήματος και του

περιβάλλοντός του. Οι μέθοδοι αυτές ενώ είναι υπολογιστικά αντι-οικονομικές, κυρίως λόγω της ανάγκης γραμμικοποίησης των συναρτήσεων για κάθε εικόνα και χωρίς παράλληλη εξαγωγή σημαντικού όγκου νέας πληροφορίας, από την άλλη πλευρά, προσφέρουν τη δυνατότητα συνδυασμού δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες, με αποτέλεσμα την αύξηση των παρατηρήσεων και την ενιαία μοντελοποίησή τους. Από τις συνηθέστερες τεχνικές SLAM βάσει φίλτρων που χρησιμοποιούνται και στις υποβρύχιες εφαρμογές είναι η Extended Kalman Filter (EKF) και η Particle Filters (PF) που αναλύονται στη συνέχεια. Από την άλλη μεριά, οι μέθοδοι keyframe χρησιμοποιούν επιλεγμένες εικόνες για την εκτίμηση του χάρτη και της τροχιάς του οχήματος, με βασικά πλεονεκτήματα την οικονομία στο υπολογιστικό κόστος και τη δυνατότητα εφαρμογής ακριβέστερων μεθόδων συνόρθωσης.

Ένας άλλος διαχωρισμός του VSLAM επισημαίνει τις μεθόδους βάσει χαρακτηριστικών σημείων (feature-based) και τις άμεσες μεθόδους (direct-based). Ειδικότερα διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι πρώτες βασίζονται στους αλγόριθμους ανίχνευσης και περιγραφής χαρακτηριστικών σημείων, όπως ο SIFT, ο SURF κ.ά., ενώ οι δεύτερες προσπερνούν το βήμα της ανίχνευσης/ περιγραφής και εξετάζουν συνολικά την εικόνα σε επίπεδο pixel. Οι μέθοδοι του feature-based SLAM ακολουθούν δύο βασικά βήματα, αφενός την εφαρμογή των αλγορίθμων τύπου SIFT και SURF, για την εξαγωγή των ομολογιών ως παρατηρήσεων του συστήματος και αφετέρου τον υπολογισμό θέσης κάμερας και περιβάλλοντος χώρου βάσει των υπολογισμένων ομολογιών. Η άμεση λογική (direct), από την άλλη μεριά, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο coarse-to-fine (από το αδρό στο λεπτομερές) για να συσχετίσει εικόνες όχι βάσει χαρακτηριστικών αλλά βάσει της υφής της εικόνας (texture tracking), με αποτέλεσμα η χαρτογράφηση να προκύπτει σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός γραφήματος θέσης (pose graph) που δημιουργείται από τη διαδρομή του οχήματος στο χώρο. Συγκριτικά, οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε χαρακτηριστικά και παρατηρήσεις αποδεικνύονται ταχύτεροι, σταθερότεροι και δεν απαιτούν αρχικοποίηση παραμέτρων, σε αντίθεση με τους direct SLAM, που όμως αποδεικνύονται ακριβέστεροι λόγω της δυνατότητας αξιοποίησης δεδομένων από όλη την εικόνα. Στην ενότητα 4.1 περιγράφηκαν τρεις από τους δημοφιλέστερους αλγόριθμους ανίχνευσης και περιγραφής χαρακτηριστικών σημείων, ο SIFT, ο SURF και ο Harris. Σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου οι απαιτήσεις της ταχύτητας απόδοσης είναι ιδιαίτερα αυξημένες, εξίσου δημοφιλείς είναι και οι αλγόριθμοι FAST, BRIEF και ORB.

Κατά τον αλγόριθμο ανίχνευσης και εξαγωγής χαρακτηριστικών σημείων FAST (Features from Accelerated Segment Test; Rosten & Rummond, 2006), κάθε σημείο ενδιαφέροντος σε μία εικόνα εξετάζεται ως προς τη διαφορά της έντασης φωτεινότητάς του με 16 περιφερειακά pixels του. Για τη γρήγορη λειτουργία του αλγορίθμου, η σύγκριση της φωτεινότητας γίνεται πρώτα με τα τέσσερα ακραία (βορράς-νότος-ανατολή-δύση) pixels βάσει ενός καθορισμένου κατωφλίου, και αν τουλάχιστον τρία από τα τέσσερα αυτά pixels είναι φωτεινότερα ή σκοτεινότερα του κεντρικού, τότε το σημείο αποτελεί γωνία (corner). Ο FAST ανήκει στους ταχύτατους αλγόριθμους ανίχνευσης, για αυτό και επιλέγεται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ταυτόχρονα όμως είναι ευαίσθητος στον θόρυβο.

Ο αλγόριθμος BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features; Calonder et al., 2010) αναπτύχθηκε με σκοπό την περιγραφή των χαρακτηριστικών σημείων, μέσω της ταξινόμησης μικρών περιοχών των εικόνων (patches), από συγκρίσεις της έντασης της φωτεινότητας ανά ζεύγη pixels της γειτονικής περιοχής των σημείων ενδιαφέροντος. Χρησιμοποιεί δηλαδή δυαδικά

τεστ πάνω στη φωτεινότητα των pixels σε κάθε γειτονιά ενός σημείου ενδιαφέροντος και αποτελεί κυρίως περιγραφέα των σημείων, ενώ συνδυάζεται με τους βασικούς ανιχνευτές σημείων όπως οι SIFT, SURF, FAST και Harris.

Οι Rublee et al. (2011), με σκοπό να συνδυάσουν αποδοτική υπολογιστική ισχύ με ανθεκτικότητα σε θόρυβο, πρότειναν τον αλγόριθμο ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), ο οποίος αποτελεί τον συνδυασμό του αλγορίθμου FAST για την ανίχνευση των χαρακτηριστικών σημείων και του περιγραφέα BRIEF. Με εφαρμογή αρχικά του FAST εντοπίζεται ο αριθμός χαρακτηριστικών σημείων, τα οποία μετά από χρήση πυραμίδων κλίμακας εντοπίζονται σε διάφορα επίπεδα και με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ανθεκτικότητα στις διαφοροποιήσεις κλίμακας. Για να εξασφαλιστεί παράλληλα και η ανθεκτικότητα στις στροφές, υπολογίζεται το κέντρο βάρους της γειτονιάς γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος, με χρήση των τιμών φωτεινότητας των pixels. Η κατεύθυνση του διανύσματος μεταξύ του κέντρου βάρους και του σημείου ενδιαφέροντος, περιγράφει τον προσανατολισμό. Εντός του αλγορίθμου ORB, ο περιγραφέας BRIEF χρησιμοποιείται, στη συνέχεια, ως “κατευθυνόμενος” περιγραφέας (Rotated BRIEF), επιλέγοντας τα “καλά” σετ των δυαδικών τεστ, εκείνα δηλαδή που εμφανίζουν υψηλή διακύμανση (με μέσο όρο κοντά στο 0.5) και ελάχιστο βαθμό συσχέτισης, χρησιμοποιώντας παράλληλα τον προσανατολισμό των χαρακτηριστικών που υπολογίστηκαν προηγούμενα. Ο αλγόριθμος ORB, τέλος, παρουσιάζει αποτελέσματα αντάξια των SIFT και SURF, με σαφώς ταχύτερη απόδοση, κάτι που τον καθιστά ιδανικό σε περιπτώσεις εφαρμογών πραγματικού χρόνου και απαιτήσεων χαμηλής κατανάλωσης υπολογιστικής ισχύος. Η ανθεκτικότητα στο θόρυβο, επίσης, επιτρέπει την αντιστοίχιση περισσότερων χαρακτηριστικών σημείων. Το μειονέκτημά του, ωστόσο, εντοπίζεται στα επίπεδα ανθεκτικότητας στις διαφοροποιήσεις της κλίμακας, σε σχέση με τους SIFT και SURF.

Οι Hidalgo & Bräunl (2015), οι Yuan et al. (2017) και ο Hidalgo (2019) συγκεντρώνουν στις έρευνές τους, τις δημοφιλέστερες τεχνικές SLAM που εφαρμόστηκαν τα τελευταία χρόνια στο υποβρύχιο περιβάλλον με δεδομένα από αισθητήρες μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων. Επιχειρούν μία συνδυαστική καταγραφή των σύγχρονων μεθόδων SLAM, με βάση τα είδη των αισθητήρων και των συλλεγόμενων από αυτούς δεδομένων, τους SLAM αλγόριθμους, τις περιοχές εφαρμογής (με δομή ή άνευ), τις δυνατότητες τεχνικών κλεισίματος βρόχων και τους τελεστές ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων. Ως δημοφιλέστερες τεχνικές SLAM στον υποβρύχιο χώρο, επισημαίνουν τις Extended Kalman Filter SLAM, τη Fast SLAM, τη Graph SLAM και την ORB-SLAM2. Ακολουθώντας, γίνεται μία επιλογή βάσει των δημοφιλέστερων αλγορίθμων SLAM που απαντώνται σε υποβρύχιες εφαρμογές, οι οποίοι αναλύονται αρχικά σε θεωρητικό επίπεδο ως προς την αρχή λειτουργία τους, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται μέσα από το πρίσμα χαρακτηριστικών δημοσιεύσεων.

### 5.2.1 Extended Kalman Filter SLAM

Η δημοφιλέστερη τεχνική SLAM, που ανήκει στις μεθόδους βάσει φίλτρων και απαντάται σε πληθώρα εφαρμογών SLAM, χωρίς το υποβρύχιο περιβάλλον να αποτελεί εξαίρεση, είναι η Extended Kalman Filter (EKF), που βασίζεται στο φίλτρο Bayes. Τα φίλτρα Kalman στηρίζονται στην υπόθεση ότι αν η αρχική κατάσταση και ο θόρυβος μπορούν να περιγραφούν μέσω κατανομών Gauss, τότε η θέση του οχήματος και ο χάρτης του περιβάλλοντος χώρου περιγράφονται επίσης από κατανομές Gauss. Η αρχική έκδοση του φίλτρου Kalman στηρίζεται επίσης στο ότι αν οι παρατηρήσεις είναι γραμμικές συναρτήσεις μιας κατάστασης σε κάποιο

χρόνο  $k$ , τότε η κατάσταση στο χρόνο  $k+1$  είναι επίσης γραμμική συνάρτηση της προηγούμενης. Ωστόσο, στις περιπτώσεις των αυτόνομων οχημάτων, οι σχέσεις παρατηρήσεων και κινήσεων είναι μη γραμμικές, το ρόλο της γραμμικοποίησης των συναρτήσεων γύρω από την τελευταία μέση τιμή και τη διακύμανση αναλαμβάνει το φίλτρο EKF. Το EKF αναπαριστά την πιθανότητα μετάβασης της κατάστασης καθώς και την πιθανότητα μέτρησης με τις μη γραμμικές συναρτήσεις  $g$  και  $h$  που ενσωματώνονται στο μοντέλο κίνησης και το μοντέλο παρατήρησης αντίστοιχα:

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

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

όπου  $w_{k+1}$  και  $v_{k+1}$  ο επονομαζόμενος “λευκός θόρυβος”, δηλαδή ανεξάρτητα συμβάντα με μηδενική μέση τιμή και συμμεταβλητότητα. Για τη γραμμικοποίηση των μη γραμμικών συναρτήσεων, το EKF χρησιμοποιεί τις σειρές Taylor πρώτης τάξης και προκύπτει μία γραμμική προσέγγιση για τις  $g$  και  $h$  μέσω της τιμής και κλίσης τους. Η επιτυχία της γραμμικής προσέγγισης εξαρτάται από το βαθμό της αβεβαιότητας και το βαθμό της μη γραμμικότητας των αρχικών συναρτήσεων.

Η τεχνική EKF SLAM αποτελείται από δύο στάδια: αρχικά την πρόβλεψη (prediction), κατά την οποία η επόμενη θέση του οχήματος υπολογίζεται με βάση την τρέχουσα θέση του και την πληροφορία από τις μετρήσεις των αισθητήρων και το μοντέλο κίνησης, ώστε να αλλάξει θέση από τη χρονική στιγμή  $k$  στη χρονική στιγμή  $k+1$  και έπειτα, την ενημέρωση (update), κατά την οποία ενημερώνεται η τρέχουσα θέση του οχήματος στον χώρο και η αρχική υποθετική εκτίμηση μετατρέπεται σε επιθυμητή εκτίμηση.

Η EKF μέθοδος συνεπάγεται αυξημένο υπολογιστικό κόστος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλου όγκου δεδομένων εισόδου και λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, κυρίως λόγω της διαδικασίας γραμμικοποίησης των μη γραμμικών συναρτήσεων. Επίσης, ενώ παρατηρείται μειωμένη ακρίβεια λόγω των σωρευτικών σφαλμάτων (ιδιαίτερα κατά τις dead reckoning τεχνικές), το EKF αποτελεί καλό εργαλείο για το συνδυασμό δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες, λόγω της χρήσης στατιστικών μέτρων αβεβαιότητας για την ποσοτική αξιολόγηση του κάθε αισθητήρα και την απόδοση σχετικού βάρους κατά τη συνολική επίλυση.

### 5.2.2 Fast SLAM

Ο αλγόριθμος FastSLAM παρουσιάστηκε αρχικά από τους Montemerlo et al. (2002) και ανήκει στην κατηγορία των Particle Filters (Φίλτρα Σωματιδίων). Χρησιμοποιεί ένα φίλτρο σωματιδίων, το Rao-Blackwellized, το οποίο χρησιμοποιεί particles (σωματίδια) για να περιγράψει την κατάσταση χαρακτηριστικών, των οποίων ο ατομικός χάρτης θεωρείται ανεξάρτητος. Έτσι, το πρόβλημα της χαρτογράφησης αναλύεται σε επιμέρους υποπροβλήματα, ανά χαρακτηριστικό, ενώ για τον προσδιορισμό της θέσης τους χρησιμοποιούνται στη συνέχεια φίλτρα EKF. Τα φίλτρα σωματιδίων έχουν την ιδιότητα να περιγράψουν επαρκώς μη-γραμμικά μοντέλα κίνησης των οχημάτων ή μοντέλα τα οποία περιγράφονται με Γκαουσιανές κατανομές. Ο FastSLAM καθιστά δυνατό τον υπολογισμό ολόκληρης της τροχιάς του οχήματος, ενώ στην ίδια την τροχιά αποδίδονται ανεξάρτητες θέσεις χαρακτηριστικών. Στη βασική δομή του αλγορίθμου, για  $n$  αριθμό particles, κάθε particle αποτελείται από μία υπολογισμένη θέση του οχήματος  $x_t^k$  και μία ομάδα φίλτρων EKF με μέση τιμή  $\mu_{j,t}^k$  και συμμεταβλητότητα  $\Sigma_{j,t}^k$ . Τα βήματα του αλγορίθμου Fast SLAM, που επαναλαμβάνονται  $n$  φορές είναι:

- (i) Αρχικά, η ανάκτηση (retrieval), κατά την οποία η θέση του οχήματος  $x_{t-1}^k$  ανακτάται από την ομάδα των particles  $\mathcal{Y}_{t-1}^k$ ,
- (ii) η πρόβλεψη (prediction), κατά την οποία η θέση του οχήματος υπολογίζεται με βάση τη σχέση  $x_t^k \sim p(x_t | x_{t-1}^k, u_t)$ ,
- (iii) η ενημέρωση της μέτρησης (observation update), όπου για κάθε παρατήρηση  $z_t^i$  ενός χαρακτηριστικού, αντιστοιχίζεται ένα χαρακτηριστικό  $\theta_j$  του χάρτη και η παρατήρηση ενσωματώνεται στο EKF φίλτρο με παράλληλη ενημέρωση της μέσης τιμής  $\mu_{j,t}^k$  και της συμμεταβλητότητας  $\Sigma_{j,t}^k$ ,
- (iv) το βάρος (importance weight),  $w^k$ , που υπολογίζεται για κάθε νέο particle,
- (v) η επαναδειγματοληψία (resampling), βάσει των συντελεστών βάρους και, τέλος,
- (vi) η κατανομή του δείγματος των  $n$  particles, βάσει του πιθανοτικού μοντέλου κίνησης.

Ο αλγόριθμος FastSLAM έχει διάφορες παραλλαγές, είτε με βάση τις αντιστοιχίες μεταξύ  $z_t^i$  και  $\theta_j$ , όπως η υπόθεση γνωστών αντιστοιχιών, που είναι η πιο σπάνια μορφή του αλγορίθμου αλλά ταυτόχρονα η περισσότερο επεξηγηματική της λειτουργίας του και η υπόθεση των άγνωστων αντιστοιχιών που ενσωματώνει τεχνικές συσχέτισης δεδομένων, όπως οι μεγίστης πιθανότητας, είτε βάσει του τρόπου αναπαράστασης των χαρακτηριστικών, όπως η περίπτωση αναπαράστασης των landmarks ως ευθειών (Montemerlo et al., 2002; Αφιοντζή και Πορίτσα, 2011).

Οι Frouher et al. (2011), εκμεταλλεύομενοι αποκλειστικά δεδομένα από ένα μοντέλο πολυδευσμικού ηχοβολιστικού σαρωτή μηχανικής κίνησης (mechanically rotating scanning sonar), εφάρμοσαν τον αλγόριθμο FastSLAM για τον εντοπισμό της θέσης οχήματος AUV, σε δομημένο υποβρύχιο περιβάλλον, όπως οι κρηπιδότοιχοι λιμένων, απ' όπου είναι δυνατή η εξαγωγή ικανού αριθμού οροσήμεων, και να ξεταστεί το πιθανοτικό μοντέλο του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου, με κριτήριο σύγκρισης δορυφορικές παρατηρήσεις RTK επί του λιμένα, ο οποίος ήταν το πεδίο εφαρμογής, απέδωσαν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας στην εύρεση της θέσης του οχήματος AUV. Οι He et al. (2015) παρουσίασαν μία εξελιγμένη εκδοχή του αλγορίθμου, την UFastSLAM, που προέκυψε από το συνδυασμό του αλγορίθμου FastSLAM και του φίλτρου Unscented Kalman (UKF), με σκοπό την επίλυση του προβλήματος SLAM ενός υποβρύχιου οχήματος AUV. Βασική ιδιότητα και πλεονέκτημα της μεθόδου τους είναι τα υψηλά επίπεδα ακρίβειας προσδιορισμού της θέσης υποβρυχίως, με χρήση αισθητά μειωμένου αριθμού particles για την περιγραφή των μοντέλων κίνησης. Οι πειραματισμοί της μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες θαλάσσιου περιβάλλοντος περιελάμβαναν την αξιοποίηση δεδομένων από αισθητήρες κατεύθυνσης (επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο του AUV) και αισθητήρες μέτρησης απόστασης σόναρ. Τέλος, οι Wang & Liu (2017), με παρόμοιο στόχο με τους He et al. (2015), δηλαδή την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων particles κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου FastSLAM, ενσωμάτωσαν στη μεθοδολογία τους το φίλτρο EnKF (Ensemble Kalman Filter). Η έρευνά τους πραγματοποιήθηκε σε δύο πειραματικά στάδια, αρχικά σε υπολογιστικό περιβάλλον προσομοίωσης και στη συνέχεια σε υποβρύχιο περιβάλλον λιμένα, όπου με προγραμματισμένη αποστολή οχήματος AUV συλλέχθηκαν δεδομένα πλοήγησης και μέτρησης απόστασης από αισθητήρες GPS, DVL, σόναρ και πυξίδας. Ο αλγόριθμος FastSLAM, με ενσωματωμένο το φίλτρο EnKF, απέδωσε τελικά αισθητά ακριβέστερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την EKF-SLAM, που επίσης εφαρμόστηκε για τα ίδια δεδομένα.

### 5.2.3 Graph SLAM

Μία ακόμα προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος SLAM αποτελεί ο αλγόριθμος GraphSLAM (Lu & Milios, 1997), κατά τον οποίο η τροχιά ενός οχήματος και οι παρατηρήσεις περιγράφονται

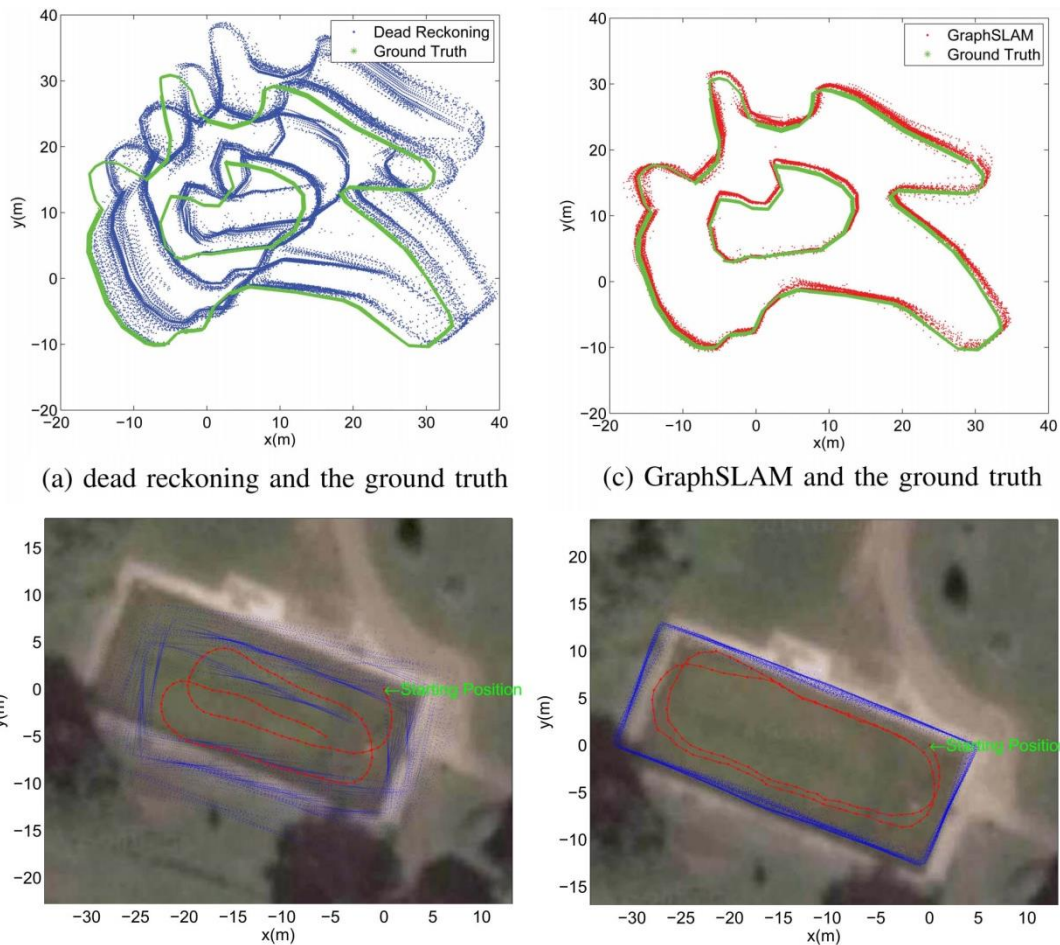
από έναν γράφο, που αποτελείται από κόμβους και ακμές και εισάγει κάποιες δεσμεύσεις στο σύστημα. Ένας γράφος περιέχει κόμβους που αντιπροσωπεύουν τις θέσεις  $x_0, \dots, x_t$  του οχήματος, ορόσημα του χάρτη  $m_0, \dots, m_t$ , ενώ ταυτόχρονα εισάγονται περιορισμοί μεταξύ των θέσεων  $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}$  του οχήματος και των οροσήμων  $m_0, \dots, m_t$ . Κατά τον αλγόριθμο GraphSLAM, εκτελείται μία επαναληπτική παλινδρόμηση μεταξύ δημιουργίας του γράφου (front-end) και βελτιστοποίησής του (back-end). Ο υπολογισμός της θέσης του οχήματος επιτυγχάνεται μέσω της βελτιστοποίησης της εκτιμώμενης θέσης των κόμβων, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων των περιορισμών. Ο αλγόριθμος επιλύει το μη-γραμμικό αυτό πρόβλημα, γραμμικοποιώντας τους περιορισμούς, μέσω της κατασκευής ενός αραιού Πίνακα Πληροφορίας (Information Matrix), του οποίου στοιχεία αποτελούν η κίνηση του οχήματος μέσα στο χάρτη και οι παρατηρήσεις των οροσήμων από διαφορετικές θέσεις. Με την κίνηση του οχήματος, ο Πίνακας Πληροφορίας μεγαλώνει σε μέγεθος και στοιχεία, ενώ ο αλγόριθμος πραγματοποιεί συνεχώς δοκιμαστικές αντιστοιχίσεις μεταξύ των υποψήφιων οροσήμων, για να ελέγξει την πιθανότητα ταύτισης. Αν το αποτέλεσμα μίας δοκιμαστικής αντιστοιχίσης ξεπερνά μία καθορισμένη τιμή, ο αλγόριθμος αναγνωρίζει τα δύο ορόσημα ως ένα. Στη βιβλιογραφία, ο αλγόριθμος Graph SLAM συχνά αναφέρεται συνδυαστικά με την τεχνική Smoothing and Mapping (SAM), κατά την οποία το διάγραμμα κατάστασης ενός οχήματος περιγράφει όλη την τροχιά του οχήματος, με αποτέλεσμα τα σφάλματα γραμμικοποίησης που περιέχονται στη θέση του οχήματος να μην λαμβάνονται υπόψη.

Οι Johannsson et al. (2010) κατά την έρευνά τους σχετικά με τρόπους επιθεώρησης υποβρύχιων δομών, όπως λιμάνια, πυλώνες, αγωγοί, πλατφόρμες πετρελαίου και πλοία, με χρήση υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων, όπως τα AUVs, εξέτασαν την εφαρμογή ενός αλγορίθμου GraphSLAM για την επίλυση του προβλήματος υπολογισμού της τροχιάς του AUV οχήματος σε πραγματικό χρόνο, με ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων ολίσθησης. Εκμεταλλευόμενοι δεδομένα από αισθητήρα DVL, γυροσκόπιο και οπτικό σόναρ, ανέπτυξαν μία μεθοδολογία με αφετηρία την πυκνή ανίχνευση χαρακτηριστικών σημείων (οροσήμων) από τις ακουστικές εικόνες του σόναρ, με σκοπό το κλείσιμο βρόχων με την εφαρμογή χαμηλοπερατών φίλτρων και τον υπολογισμό των κλίσεων των περιοχών των οροσήμων. Για την αντιστοιχίση των οροσήμων χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο NDT (Normal Distribution Transform), ως μία συνεχή δισδιάστατη πυκνότητα πιθανότητας, που μοντελοποιεί την πιθανότητα εντοπισμού ενός οροσήμου από τις δεδομένες παρατηρήσεις. Τέλος, με εφαρμογή αλγορίθμου Graph SLAM, με ορισμό των κόμβων και των περιορισμών του συστήματος, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της τροχιάς του AUV με ικανοποιητικά επίπεδα αξιοπιστίας.

Οι Chen et al. (2015) επέλεξαν τον αλγόριθμο GraphSLAM για την βελτιστοποίηση του σκέλους του υποβρύχιου εντοπισμού θέσης σε μία επίλυση SLAM, αξιοποιώντας δεδομένα από αισθητήρες ενσωματωμένους σε AUV όχημα, όπως ο ηχοβολιστικός σαρωτής μηχανικής κίνησης MSS (Mechanically Scanning Sonar), ο DVL και ο IMU. Η μέθοδος των ερευνητών έχει αφετηρία την κατασκευή του γράφου του συστήματος, που αποτελείται από τρία βασικά στάδια. Το πρώτο αφορά τη διαδικασία σάρωσης του περιβάλλοντος χώρου με τον σαρωτή MSS, κατά την οποία η κίνηση του οχήματος προσδιορίζεται με τεχνική dead reckoning, η οποία βασίζεται στο φίλτρο EKF και ακολουθεί τα τυπικά βήματα EKF της πρόβλεψης και της ενημέρωσης. Το δεύτερο στάδιο αφορά τη συσχέτιση των δεδομένων, η οποία επιτυγχάνεται με εφαρμογή αλγορίθμου που χρησιμοποιεί απόσταση Mahalanobis και συνταύτιση βάσει σχήματος, στις επιμέρους σαρώσεις, στις οποίες έχει αποδοθεί κοινό σύστημα αναφοράς από τα δεδομένα πλοήγησης. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται κλεισίματα βρόχων και ζεύγη διαδοχικών σαρώσεων-κόμβων, που ενσωματώνονται στις δεσμεύσεις του γράφου. Το τρίτο στάδιο, αυτό της τελικής κατασκευής του γράφου, αφορά τον υπολογισμό των δεσμεύσεων, που πραγματοποιείται με



εφαρμογή μίας εκδοχής του ICP αλγορίθμου, του spIC (sonar probabilistic Iterative Correspondence), που είναι αποτελεσματικός στη συσχέτιση δεδομένων σαρώσεων. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου spIC είναι η βελτιστοποίηση των θέσεων των σαρώσεων καθώς και ο υπολογισμός της συμμεταβλητότητας μεταξύ των αντιστοιχίσεων των σαρώσεων. Οι οριζόμενες δεσμεύσεις δημιουργούνται βάσει του ορισμού σάρωσης αναφοράς εντός ζευγών σαρώσεων και βάσει της συσχέτισης της τρέχουσας σάρωσης με τις υποψήφιες γειτονικές σαρώσεις, όπως αυτές υπολογίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Στις πειραματικές εφαρμογές τους, οι συγγραφείς απέδειξαν τα αυξημένα επίπεδα ακρίβειας που πέτυχαν, με την ενσωμάτωση του GraphSLAM στη μεθοδολογία τους. Στην Εικόνα 5.2 είναι εμφανής η διαφορά στον υπολογισμό της τροχιάς του οχήματος AUV πριν (αποτελέσματα αποκλειστικά από dead reckoning) και μετά από την επίλυση του αλγορίθμου SLAM μέσω της δημιουργίας γράφου.



Εικόνα 5.2: Αποτελέσματα μεθόδου πριν και μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου SLAM, σε πειραματικές εφαρμογές ελεγχόμενου περιβάλλοντος, όπου υπάρχει δυνατότητα ground-truthing. Αριστερά, ο υπολογισμός της τροχιάς του AUV με αξιοποίηση μόνο των δεδομένων πλοήγησης EKF-dead reckoning. Δεξιά, ο υπολογισμός της τροχιάς του AUV με παράλληλη εφαρμογή GraphSLAM (Chen et al., 2015).

#### 5.2.4 ORB-SLAM2

Η μέθοδος ORB-SLAM2 αποτελεί μία μονοεικονική (monocular) τεχνική SLAM, που οφείλει το όνομά της στον αλγόριθμο ORB (Rublee et al., 2011) και συνεπώς βασίζεται σε μέθοδο ανίχνευσης, περιγραφής και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών σημείων. Η μεθοδολογία ORB-

SLAM2 αποτελείται από 3 βασικά τμήματα που εκτελούνται ταυτόχρονα: τη διαδικασία παρακολούθησης (tracking), την τοπική χαρτογράφηση (local mapping) και τα κλεισίματα βρόχων (loop closing). Πρωταρχικό στάδιο της μεθοδολογίας αποτελεί η αρχικοποίηση του συστήματος, ώστε να υπολογιστούν η σχετική θέση μεταξύ δύο καρτέ και ένα αρχικό σύνολο 3D σημείων του περιβάλλοντος χώρου. Με την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων ORB στο πρώτο ζεύγος καρτέ ακολουθείται μία τυπική διαδικασία SfM (υπολογισμός πίνακα ομογραφίας  $H$ , υπολογισμός επιτολικού πίνακα  $F$ , εφαρμογή RANSAC για απαλοιφή των χονδροειδών σφαλμάτων, τριγωνισμός, τοπική συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης), απ' όπου αντλείται η σχετική θέση των δύο πρώτων καρτέ και του πρώτου τμήματος χάρτη. Με την επιτυχή ολοκλήρωση της αρχικοποίησης ξεκινά η διαδικασία της παρακολούθησης, όπου εξαγονται τα χαρακτηριστικά ORB σε κάθε καρτέ, μέσω του υπολογισμού πυραμίδων κλίμακας για κάθε καρτέ και του εντοπισμού χαρακτηριστικών γωνιών, με εφαρμογή αλγορίθμου FAST, σε κάθε πυραμίδα. Έπειτα, υπολογίζεται ο προσανατολισμός και οι περιγραφείς των σημείων FAST, με σκοπό την αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων. Αν η παρακολούθηση του προηγούμενου καρτέ ήταν επιτυχής, εκτιμώνται η τρέχουσα θέση και ο προσανατολισμός της κάμερας σε σχέση με το προηγούμενο καρτέ, μέσω νέων 3D-2D ομολογιών. Σε περίπτωση όπου η παρακολούθηση αποτύχει, το καρτέ λειτουργεί ως μοντέλο "οπτικών λέξεων" (τεχνική bag of visual words), ενώ αναζητούνται υποψήφια βασικά καρτέ βάσει δεδομένων του "λεξιλογίου", με σκοπό τον καθολικό επαναπροσδιορισμό της θέσης. Αν από την αναζήτηση των νέων ομολογιών 3D-2D, εντοπιστεί ικανός αριθμός με αποδεκτό σφάλμα επαναπροβολής, τότε η διαδικασία του επανενοτισμού θεωρείται επιτυχής.

Το σκέλος της τοπικής χαρτογράφησης (local mapping) ενός αλγορίθμου ORB-SLAM2 επεξεργάζεται τα νεοεισαχθέντα στο σύστημα καρτέ, των οποίων ανανεώνει και βελτιστοποιεί τις γειτονικές περιοχές. Συγκεκριμένα, η τοπική χαρτογράφηση αποτελείται από τέσσερα στάδια: (i) την εισαγωγή νέου καρτέ στο χάρτη, (ii) τον έλεγχο των 3D χαρακτηριστικών σημείων ORB για την αποδοχή τους ή όχι, με βάση το αν κάθε σημείο από αυτά είναι ορατό σε άνω του 25% από τα καρτέ στα οποία προβλέπεται να είναι ορατό, (iii) τη δημιουργία νέων σημείων του χάρτη, που προκύπτουν από τριγωνισμό των αποδεκτών 3D σημείων ORB και (iv) την τοπική συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης, για τη βελτιστοποίηση της θέσης του τρέχοντος καρτέ και των 3D σημείων του χάρτη που συνδέονται με το καρτέ αυτό και τα γειτονικά του. Για την επίλυση μη-γραμμικής βελτιστοποίησης συνηθίζεται η εφαρμογή της μεθόδου Levenberg-Marquardt.

Το σκέλος του κλεισίματος βρόχου (loop closing) εκτελείται καθ' όλη τη διάρκεια της εφαρμογής ORB-SLAM, με συνεχή παρατήρηση των δεδομένων για τον πιθανό εντοπισμό των βρόχων. Τα βήματα που ακολουθούνται κατά το κλείσιμο βρόχου είναι: (i) η ανίχνευση του υποψήφιου βρόχου μέσω ενός γράφου "αμοιβαίας ορατότητας" (co-visibility graph) και του bag of words του προκείμενου καρτέ, με το ελάχιστο υπολογιστικό κόστος, (ii) την επιβεβαίωση του εντοπισμένου βρόχου με υπολογισμό ενός μετασχηματισμού ομοιότητας από το σύστημα του τρέχοντος καρτέ στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας και τη σύγκρισή του με το καρτέ του υποψήφιου βρόχου και (iii) την τελική διόρθωση και το κλείσιμο του βρόχου, με απαλοιφή των διπλών όμοιων σημείων του χάρτη και βελτιστοποίηση μέσω μετασχηματισμών ομοιότητας, για τη διόρθωση του σφάλματος ολίσθησης.

Η μέθοδος ORB-SLAM2 είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στις υποβρύχιες εφαρμογές τα τελευταία χρόνια, ορισμένες εκ των οποίων (Li et al., 2016; Ferrera et al., 2018; Joshi et al., 2019; Hidalgo, 2019) αναλύονται στη συνέχεια.

### 5.3 Οπτική Οδομετρία

Στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές, το πρόβλημα του SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον επιλύεται με βασικό σκοπό τον προσδιορισμό της τροχιάς του υποβρύχιου οχήματος, ενώ σε λιγότερες αναφορές παρουσιάζονται αποτελέσματα τρισδιάστατης ανακατασκευής του χώρου στον οποίο κινείται το όχημα. Οι Scaramuzza & Fraundorfer (2011) διαχωρίζουν το πρόβλημα της Οπτικής Οδομετρίας (Visual Odometry) από το Visual SLAM, στηριζόμενοι ακριβώς σε αυτήν τη θέση του τελικού ζητούμενου, που για την VO είναι η τροχιά του οχήματος, ενώ για το VSLAM είναι η τροχιά σε συνδυασμό με την ανακατασκευή του χώρου. Στην πρώτη περίπτωση, της VO, αρχή λειτουργίας αποτελεί η ακρίβεια σε τοπικό επίπεδο, ήτοι η συνοχή μεταξύ διαδοχικών και γειτονικών εικόνων, ενώ στο VSLAM υιοθετείται η επόπτευση της ακρίβειας στο ενιαίο σύστημα εικόνων και τρισδιάστατου μοντέλου του χώρου, που επιτυγχάνεται από εφαρμογή αλγορίθμων που επιτρέπουν συννορθώσεις, όπως η μέθοδος της δέσμης, και κλεισίματα βρόχων.

Όπως και στο Visual SLAM, αντίστοιχα και στην Visual Odometry, η κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων γίνεται ανάλογα με τον τρόπο εξαγωγής και συσχέτισης της πληροφορίας των εικόνων. Συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός των τεχνικών αφορά μεθόδους βάσει χαρακτηριστικών σημείων (feature-based), άμεσες μεθόδους (direct-based) και ημι-άμεσες μεθόδους (semi-direct-based). Στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα, βασική κατηγορία της Ρομποτικής, απαντάται επίσης η κατηγορία της Οπτικής Αδρανειακής Οδομετρίας (VIO - Visual Inertial Odometry), που αφορά το συνδυασμό των εικονιστικών δεδομένων της κάμερας ή των καμερών του οχήματος με ένα αδρανειακό σύστημα (συνήθως τα δεδομένα ενός αισθητήρα IMU), που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των θέσεων της κάμερας, με παράλληλη εφαρμογή συννορθώσεων δέσμης. Η ενσωμάτωση των αδρανειακών μετρήσεων (γωνιακή ταχύτητα και γραμμική επιτάχυνση), σε ένα σύστημα οδομετρίας παρέχει, από τη μία πλευρά, τη δυνατότητα καλύτερης πρόβλεψης της κίνησης και τροχιάς του οχήματος και, από την άλλη, τη δυνατότητα ευρωστίας στο σύστημα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις περιοχών με αδυναμία λήψης ικανοποιητικών εικόνων, φαινόμενο πολύ συχνό στο υποβρύχιο περιβάλλον. Η επιλογή μεταξύ μεθόδων VO και VSLAM έχει ως βασικό κριτήριο αφενός το τελικό ζητούμενο και αφετέρου την ισορροπία μεταξύ επιθυμητής ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους. Ιδιαίτερα συχνά στις υποβρύχιες εφαρμογές, λόγω των ιδιαιτεροτήτων του πεδίου και των περιορισμένων διαθέσιμων χρόνων υποβρυχίως, η δυνατότητα εφαρμογής μιας μεθόδου σε πραγματικό χρόνο (συνηθέστερα για την παρακολούθηση της τροχιάς του υποβρύχιου οχήματος) κρίνεται σημαντικότερη από την εξασφάλιση υψηλών επιπέδων ακρίβειας στα αποτελέσματα.

Μεταξύ των δημοφιλέστερων αλγορίθμων Visual Odometry σε υποβρύχιες εφαρμογές (Ferrera et al., 2018; Jordán et al., 2019; Joshi et al., 2019), είναι η SVO (Semi-direct Visual Odometry) και η DSO (Direct Sparse Odometry). Ο αλγόριθμος SVO (Forster et al., 2014), όπως και η εκδοχή του SVO-2, στηρίζεται στις αντιστοιχίσεις χαρακτηριστικών σημείων στις εικόνες, μέσω του άμεσου προσδιορισμού της κίνησης της κάμερας και όχι απαραίτητα ως αποτέλεσμα της εξαγωγής και συσχέτισης των χαρακτηριστικών αυτών. Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει, με εφαρμογή άμεσων μεθόδων, μία εικασία για τη σχετική κίνηση της κάμερας όπως επίσης και τις αντιστοιχίες των χαρακτηριστικών σημείων, ενώ ολοκληρώνεται με τη βελτιστοποίηση του - μη γραμμικού - σφάλματος επαναπροβολής. Ο αλγόριθμος DSO (Engel et al., 2017) ανήκει στις άμεσες μεθόδους VO που υπολογίζουν τη θέση της κάμερας από τις τιμές της φωτεινότητας στην εικόνα, με την ιδιαιτερότητα ότι δεν χρησιμοποιεί όλα τα pixels της εικόνας αλλά μια αραιή επιλογή τους στην εικόνα. Μέσω της μεθόδου DSO πραγματοποιείται μια ραδιομετρική βαθμονόμηση, η οποία λαμβάνει υπόψη της παραμέτρους όπως η διόρθωση γάμμα, οι χρόνοι έκθεσης, η εξασθένιση

του φωτός κ.ά., ενώ μέσω της αραιής επιλογής pixels, είναι δυνατή η ενσωμάτωσή της σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

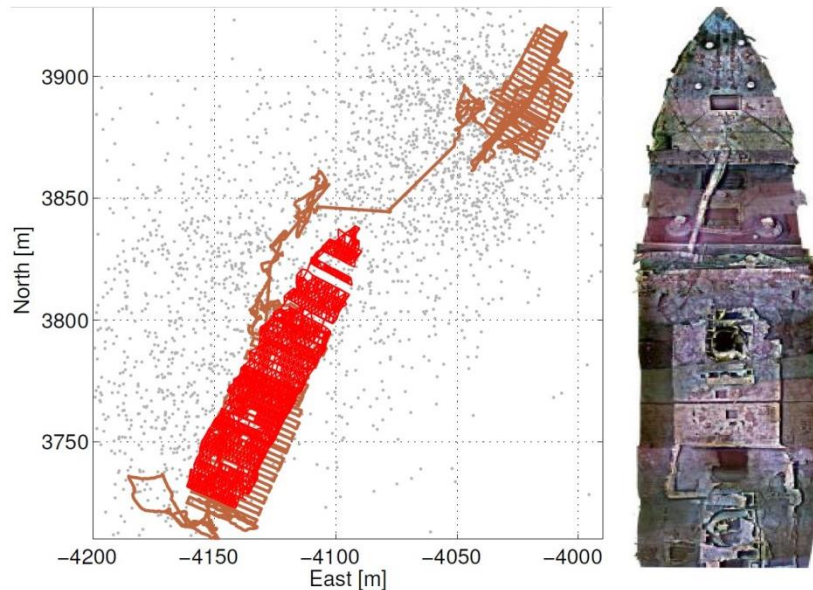
#### 5.4 Εφαρμογές Visual SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον

Τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (UUVs) είναι στελεχωμένα με εξειδικευμένα συστήματα αισθητήρων (αδρανειακοί, ακουστικοί, οπτικοί), ο συνδυασμός των οποίων αξιοποιείται κατά την επίλυση του προβλήματος SLAM, σε περιοχές αυξημένων απαιτήσεων και ιδιαιτεροτήτων, όπως μεγάλα βάθη ή δυσπρόσιτα σημεία, ως μοναδική λύση για την χαρτογράφηση και την τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου στον οποίο πλοηγείται ένα UUV σε πραγματικό χρόνο. Στην ενότητα 1.6 έχει γίνει εκτενής αναφορά στα όργανα και τους αισθητήρες που φέρονται στα υποβρύχια οχήματα για την πλοήγηση (GPS, DVL, αισθητήρες βάθους, IMU) και τη συλλογή γεωμετρικής (single beam sonars, multibeam echosounders, side scan sonars, sub-bottom profilers) και εικονιστικής πληροφορίας (κάμερες). Η σύνθεση της συλλεγόμενης πληροφορίας για μία επίλυση SLAM κατηγοριοποιεί τους αισθητήρες σε ιδιοδεκτικούς (proprioceptive), που αφορούν την πληροφορία για την εσωτερική κατάσταση του οχήματος (γυροσκοπία, επιταχυνσιόμετρα κ.ά.), και σε εξωτερικούς (exteroceptive), που αφορούν μετρήσεις εξωτερικών μεγεθών που σχετίζονται με το περιβάλλον (ηχοβολισμός, μετρήσεις απόστασης, θερμοκρασίας κ.ά.). Οι Ribas et al. (2010), ο VanMiddlesworth (2014) και οι Hidalgo & Bräunl (2015, 2019) παρατηρούν ότι η επιλογή των δεδομένων και των αντίστοιχων αισθητήρων με σκοπό τη χρήση τους σε τεχνικές χαρτογράφησης και προσδιορισμού θέσης SLAM εξαρτάται επίσης από το είδος της προς χαρτογράφηση περιοχής. Διαχωρίζουν τα σενάρια χαρτογράφησης βάσει “δομημένων” περιοχών, όπως πισίνες, ναυάγια, απότομες κλίσεις, υποβρύχιοι τοίχοι, λιμενικές εγκαταστάσεις, θεμέλια γεφυρών, πυλώνες και άλλες υποβρύχιες δομές, των οποίων η γεωμετρία αξιοποιείται για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων και περιοχών “μη δομημένων”, όπως οι ομαλές εκτάσεις πυθμένα, όπου τα χαρακτηριστικά σημεία (ορόσημα) είναι σπανιότερα. Η παρούσα εργασία, ωστόσο, επικεντρώνεται στις υποβρύχιες εφαρμογές Visual SLAM, τονίζοντας δηλαδή τεχνικές ταυτόχρονου εντοπισμού θέσης και χαρτογράφησης με δεδομένα από οπτικές μηχανές.

Οι πρώτες αναφορές για εφαρμογή Visual SLAM στο υποβρύχιο περιβάλλον, έρχονται από το πανεπιστήμιο της Χιρόνα (Garcia et al., 2002), που έθεσε σε εφαρμογή ένα σύστημα SLAM για δεδομένα εικόνας από κάμερα τοποθετημένη σε όχημα AUV. Η μέθοδος περιελάμβανε δύο σκέλη: το ένα αφορά τη δυνατότητα δημιουργίας ενός φωτομωσαϊκού, ως σύνθεσης διαδοχικών εικόνων της κάμερας, και το άλλο τη δυνατότητα ανίχνευσης και συσχέτισης επαναληπτικών οροσήμων (crossovers) και κατ’ επέκταση τα κλεισίματα βρόχων (loop closures), με χρήση μιας ειδικής κατηγορίας του φίλτρου Kalman, το ASKF (Augmented-State Kalman Filter), για την απαλοιφή των σωρευτικών σφαλμάτων της κίνησης του AUV και τη βελτιστοποίηση του φωτομωσαϊκού. Στο πανεπιστήμιο του Σίδνεϊ λίγο αργότερα (Williams & Mahon, 2004) χρησιμοποίησαν δεδομένα από μονοδεσμικά σόναρ (γεωμετρία) και κάμερα (εικόνα), συνδυαστικά, για τη χαρτογράφηση κοραλλιογενών περιοχών του Great Barrier Reef στην Αυστραλία. Από τα δεδομένα του σόναρ εξήγαγαν χαρακτηριστικά σημεία ως ορόσημα για τον αρχικό υποθετικό χάρτη, ενώ παράλληλα από τις εικόνες ανιχνεύτηκαν χαρακτηριστικά βάσει έντονων αντιθέσεων και κλίσεων. Τα δύο είδη χαρακτηριστικών σημείων συσχετίστηκαν και η τρισδιάστατη θέση τους ενσωματώθηκε σε μεθοδολογία EKF.

Οι Eustice et al. (2005), από το MIT και το Ωκεανογραφικό Ινστιτούτο Woods Hole, αξιοποίησαν δεδομένα 867 εικόνων από μία πορεία τριών περίπου km του ROV Hercules, καθώς και

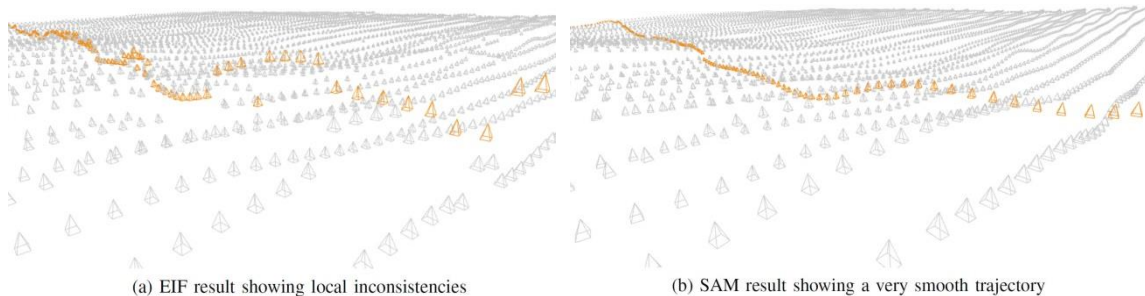
παρατηρήσεις από το αδριανειακό σύστημα του ROV, με σκοπό την εφαρμογή μεθόδου VSLAM για τη χαρτογράφηση και την τρισδιάστατη ανακατασκευή του ναυαγίου του Τιτανικού. Η μεθοδολογία τους στηρίχθηκε στην τεχνική Sparse Extended Information Filter (SEIF), αντί του EKF, κατά την οποία η αβεβαιότητα αναπαριστάται μέσω ενός πίνακα πληροφορίας (information matrix) αντί για τον πίνακα συμμεταβλητότητας. Βασική ιδιότητα αυτής της παραμετροποίησης είναι το ότι ο πίνακας πληροφορίας είναι αραιός όταν οι συσχετίσεις αφορούν γειτονικά χαρακτηριστικά και ως εκ τούτου δημιουργεί τοπικές δεσμεύσεις, πέραν της χρήσης μόνο των οροσήμων. Ο σκελετός του προτεινόμενου αλγορίθμου SLAM αποτελείται από 4 βασικά στάδια: (i) την εισαγωγή μίας νέας παρατήρησης (μίας νέας εικόνας στο σύστημα), (ii) το συσχετισμό της νέας εικόνας με το υπάρχον σύστημα, δηλαδή τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης της εικόνας (με επιμέρους βήματα την ανίχνευση χαρακτηριστικών μέσω Harris και SIFT, την εύρεση ομολογιών, την ελαχιστοτετραγωνική επίλυση για τον υπολογισμό του δεσμευμένου επιπολικού πίνακα  $E$  και τη βελτιστοποίηση της επίλυσης με μείωση των σφαλμάτων επαναπροβολής), (iii) τη χρήση της υπολογισμένης νέας σχετικής θέσης για τοπικές συνροθώσεις και (iv) την ενημέρωση του χάρτη και των ορίων συμμεταβλητότητας.



Εικόνα 5.3: Αριστερά: Παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρτογράφησης του ναυαγίου του Τιτανικού με εφαρμογή μεθοδολογίας EIF SLAM και συσχετισμό δεδομένων *dead-reckoning* του ROV (καφέ χρώμα), φωτογραφικών λήψεων (κόκκινο) και συστήματος εντοπισμού θέσης του ROV, USBL (γκρι χρώμα). Δεξιά: Φωτομωσαϊκό του ναυαγίου, όπως προέκυψε από ένα σύνολο 700 εικόνων, πριν από την εφαρμογή SLAM, και χρησιμοποιήθηκε ως υποθετικός χάρτης κατά την αρχικοποίηση του συστήματος (Eustice, 2005).

Αν και η τεχνική EIF είναι ευρέως διαδεδομένη, όντας πολύ αποτελεσματική σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, εντός και εκτός νερού, οι επιλύσεις συγκρατούν ως το τέλος τα σφάλματα που προκαλούνται από τη γραμμικοποίηση των συναρτήσεων των μοντέλων κίνησης και παρατήρησης, όπως αντίστοιχα και στις μεθόδους EKF. Την απαλοιφή των σφαλμάτων γραμμικοποίησης, σε υποβρύχια εφαρμογή SLAM διερεύνησαν οι Beall et al. (2011) μέσω της μεθόδου Smoothing and Mapping ή SAM (Dellaert & Kaess, 2006). Η βασική ιδιότητα, αλλά και πλεονέκτημα, της μεθόδου SAM είναι πως για την βελτιστοποίηση του συστήματος εκτελείται ενιαία συνόρθωση σε κάθε νέο καρτέ όλων των παρατηρήσεων, τόσο της τροχιάς του οχήματος όσο και των θέσεων των χαρακτηριστικών σημείων, ένα πρόβλημα όμοιο με εκείνο της συνόρθωσης με τη μέθοδο της δέσμης κατά την επίλυση SfM. Στο διάνυσμα της κατάστασης της

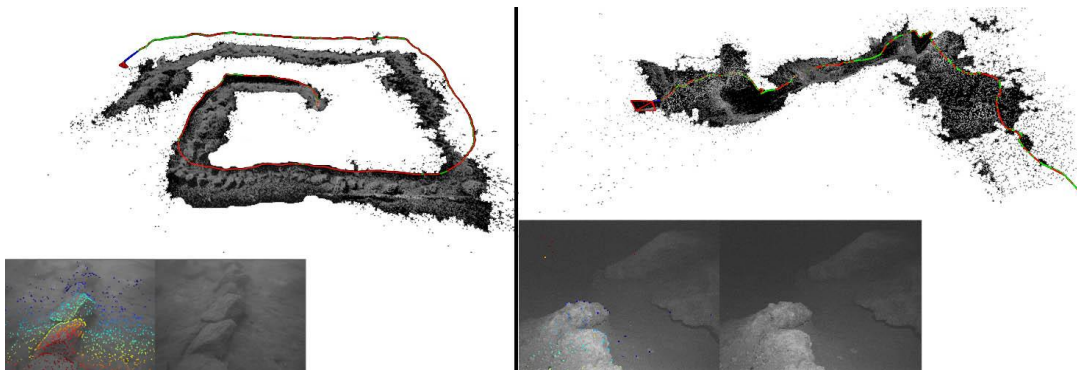
θέσης κάθε νέου καρέ διατηρείται ολόκληρη η τροχιά του οχήματος και με τον τρόπο αυτό τα σφάλματα γραμμικοποίησης δεν λαμβάνονται πλέον υπόψη. Για την έρευνα των Beall et al. (2011) στο πεδίο χρησιμοποιήθηκε το AUV Sirius, το οποίο αποτελείται από αισθητήρες πλοήγησης και καταγραφής γεωμετρικής πληροφορίας και εικόνας, μεταξύ των οποίων ένα σύστημα δύο καμερών στέρεο, multibeam sonar για τη συλλογή βυθομετρικών στοιχείων, αισθητήρα DVL για την πλοήγηση του AUV και δέκτη GPS για τη γεωαναφορά του AUV όταν αυτό βρίσκεται στην επιφάνεια. Η περιοχή ενδιαφέροντος (South Scott Reef), έκτασης 50x75 m<sup>2</sup>, καλύφθηκε από περίπου 20.000 εικόνες, ανάλυσης 1360x1024 pixels, με επικάλυψη 50% και απόσταση κάμερας - πυθμένα περί τα 2 m. Η πορεία του οχήματος προγραμματίστηκε έτσι ώστε το AUV να καλύψει σε λωρίδες, δύο κάθετων διευθύνσεων, την ορθογωνική περιοχή μελέτης και να εκτελέσει κλεισίματα βρόχων από συγκεκριμένες θέσεις. Περίπου το 17% των υποθετικών σεναρίων κλεισίματος βρόχου έγινε αποδεκτό και ενσωματώθηκε στον αλγόριθμο του EIF. Οι εικόνες υπέστησαν προεπεξεργασία για διορθώσεις λόγω απώλειας χρωμάτων και εξασθένησης του φωτός, και το σύνολο των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε και στις δύο μεθόδους για εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της τεχνικής EIF παρουσίασαν τοπικές ασυνέχειες και αδυναμίες, ενώ η τεχνική SAM απέδωσε σαφώς ομαλότερο αποτέλεσμα (Εικόνα 5.4), με τελικές τιμές του σφάλματος επαναπροβολής, 8.32 και 0.26, για τις μεθόδους EIF και SAM, αντίστοιχα. Τέλος, παρατηρήθηκε εμφανής μείωση του τελικού σφάλματος επαναπροβολής με ενσωμάτωση των στοιχείων των καμερών, μετά από βαθμονόμησή τους σε υποβρύχιες συνθήκες (δεν διευκρινίζεται η μέθοδος βαθμονόμησης).



Εικόνα 5.4: Σχετικές θέσεις τροχιάς κάμερας μετά από εφαρμογή Extended Information Filter (αριστερά) και εφαρμογή μεθόδου Smoothing and Mapping (δεξιά) (Beall et al., 2011).

Οι Rahman et al. (2019) ανέπτυξαν μεθοδολογία για τον ταυτόχρονο εντοπισμό θέσης υποβρύχιων οχημάτων και χαρτογράφηση του περιβάλλοντος χώρου, εκμεταλλευόμενοι τεσσάρων ειδών δεδομένα: ηχοβολιστικά, φωτογραφικά, αδρανειακά και βαθυμετρικά. Η μέθοδος SLAM που προτείνουν ονομάζεται SVIn2 (Sonar - Visual - Inertial) και είναι η τελευταία έκδοση της μεθοδολογίας SVIn των ιδίων, αποτελούμενη από 3 βασικά στάδια: (i) την ποιοτική προεπεξεργασία των εικόνων για την ενίσχυση της ανίχνευσης χαρακτηριστικών σημείων, (ii) την αρχικοποίηση του συστήματος με δύο στάδια συσχέτισμού της κλίμακας μεταξύ των δεδομένων και (iii) το κλείσιμο βρόχου και τον επανεντοπισμό του οχήματος. Στο πρώτο στάδιο προτείνουν την εφαρμογή της συνάρτησης CLANE για την ισοστάθμιση του ιστογράμματος και την ενίσχυση της αντίθεσης των εικόνων. Στο δεύτερο στάδιο, αυτό της αρχικοποίησης του συστήματος, εισάγουν δύο στάδια απόδοσης κλίμακας και συσχέτισμού των υπό κλίμακα πλέον δεδομένων, με σκοπό την εισαγωγή δεσμεύσεων στο σύστημα και τη βέλτιστη ροή της SLAM διαδικασίας στη συνέχεια. Βασική προϋπόθεση αρχικοποίησης του συστήματος είναι η ανίχνευση ικανού αριθμού χαρακτηριστικών σημείων (τουλάχιστον 15) και η αντιστοίχιση ομολογιών 2D-2D μεταξύ του πρώτου στερεοζεύγους εικόνων. Η πρώτη δέσμευση κλίμακας προέρχεται από τα βαθυμετρικά δεδομένα του αισθητήρα βάθους, που θεωρούνται αυτά με τη μεγαλύτερη

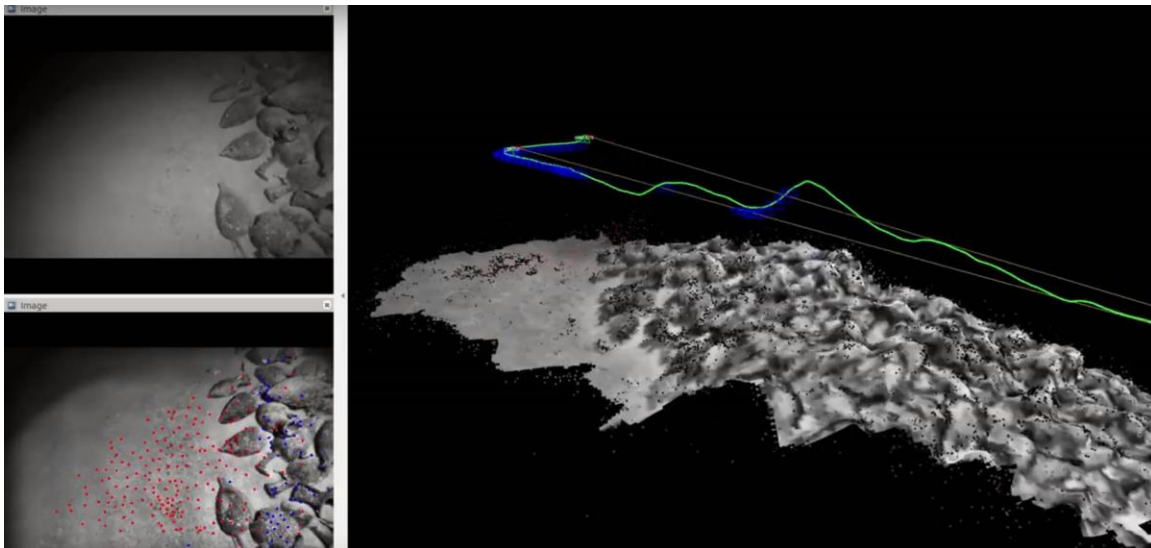
ακρίβεια και, αφορά το συντελεστή κλίμακας  $s_1$  που ενσωματώνεται στο μετασχηματισμό από το σύστημα της βαθυμετρίας στο σύστημα του πρώτου προσανατολισμένου στερεοζεύγους εικόνων. Ο δεύτερος μετασχηματισμός κλίμακας (συντελεστής κλίμακας  $s_2$ ) συνδέει τις υπό κλίμακα προσανατολισμένες εικόνες με τα αδρανειακά δεδομένα πλοήγησης του οχήματος. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία ταυτόχρονου εντοπισμού θέσης και χαρτογράφησης ξεκινά με τρεις σημαντικές δεσμεύσεις κλίμακας. Για το τρίτο στάδιο, αυτό του κλεισίματος βρόχου και επανενοτισμού θέσης, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν την τεχνική DBoW2 (Gálvez-López & Tardos, 2012), κατά την οποία για κάθε εικόνα δημιουργείται από τους περιγραφείς ένα “οπτικό λεξικό” (bag of words) που επιτρέπει την ταχύτερη ανίχνευση υποψήφιων βασικών εικόνων που περιέχουν τον βρόχο. Οι ομοιότητες 2D-2D μεταξύ των εικόνων και οι ομοιότητες 3D-2D μεταξύ του 3D χώρου και των εικόνων, φιλτράρονται από τον αλγόριθμο RANSAC και το κλείσιμο βρόχου θεωρείται επιτυχές με παράλληλη μείωση του σωρευτικού σφάλματος ολίσθησης. Τέλος, κατά το συνδυασμό και των τεσσάρων ειδών συλλεγόμενης πληροφορίας, προτείνεται διαδικασία βελτιστοποίησης της επίλυσης με ορισμό τεσσάρων βασικών ειδών σφαλμάτων που μεταφέρουν τα δεδομένα. Αυτά είναι: (i) το σφάλμα επαναπροβολής που αφορά τη διαφορά της παρατήρησης από την τελική εκτίμηση ενός ομόλογου σημείου, (ii) το σφάλμα του αδρανειακού συστήματος IMU που αποτελείται από τα επιμέρους σφάλματα επιτάχυνσης και κατεύθυνσης καθώς και από τα σφάλματα bias (σφάλματα που αλλάζουν συναρτήσει του χρόνου, όπως λόγω αλλαγής θερμοκρασίας), (iii) το σφάλμα της απόστασης από τις ηχοβολιστικές παρατηρήσεις, του οποίου τον προσδιορισμό προτείνουν σε συνδυασμό με την επίλυση SfM και (iv) το σφάλμα του αισθητήρα βάθους, που εντοπίζεται ως το αυτό με τη μικρότερη συνεισφορά και υπολογίζεται με κίνηση του οχήματος στον κατακόρυφο άξονα και σύγκριση παρατηρήσεων και πραγματικού βάθους. Η πειραματική εφαρμογή της μεθοδολογίας των συγγραφέων πραγματοποιήθηκε σε υποβρύχια περιβάλλοντα (Εικόνα 5.5), αντίξων συνθηκών (κακή ορατότητα, αιωρούμενα σωματίδια), κυρίως δομημένων (υποβρύχιο σπήλαιο, βυθισμένο λεωφορείο σε λίμνη), με το σύνολο των αισθητήρων να μεταφέρεται τόσο από δύτες όσο και από όχημα AUV. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε συγκριτικά με άλλα τρία όμοια (ως προς την προσέγγιση της αρχικοποίησης του συστήματος για συνδυασμό πολλαπλών ειδών δεδομένων) πακέτα τεχνικών SLAM, το OKVIS, το VINS-Mono και το MSCKF, ενώ τα αποτελέσματά τους εμφάνισαν τις χαμηλότερες τιμές σφάλματος (RMSE) στην προτεινόμενη μέθοδο SVIn2 και τη μέθοδο VINS-Mono.



Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα μεθόδου SVIn2 SLAM (Rahman et al., 2019).

Οι Ferrera et al. (2018), σε συνεργασία με τον γαλλικό οργανισμό ενάλιας αρχαιολογίας DRASSM, διερεύνησαν την επίλυση του προβλήματος του SLAM, συλλέγοντας επτά πακέτα δεδομένων από ROV, με το όνομα Aqualoc, τα οποία και έθεσαν στη δημόσια διάθεση της επιστημονικής έρευνας της Όρασης Υπολογιστών. Η συνεισφορά τους αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική,

αφού ένας από τους λόγους που η διερεύνηση προβλημάτων όπως το SLAM, το SfM ή η βαθμονόμηση κάμερας σε υποβρύχιες συνθήκες προχωρά με σχετικά αργούς ρυθμούς, είναι η έλλειψη δεδομένων. Οι αισθητήρες που φέρει το ROV της έρευνάς τους και χρησιμοποιούνται για τη λήψη δεδομένων με σκοπό την εφαρμογή αλγορίθμων Οπτικού SLAM και Οπτικής Οδομετρίας είναι αδρανειακός αισθητήρας IMU, αισθητήρας βάθους, ενσωματωμένος υπολογιστής για τον έλεγχο της εκτέλεσης εντολών και μονοχρωματική κάμερα, με φακό 3,5 mm, εντός θήκης θολωτής θύρας και ανάλυση 640x512. Στις περιοχές εργασίας ποιντίστηκαν κωδικοποιημένοι στόχοι του συστήματος AprilGrids, αφενός για τη βαθμονόμηση της κάμερας και αφετέρου για τη χρήση τους ως landmarks κατά την πλοήγηση του ROV. Πριν από τη βύθιση του ROV, η κάμερά του βαθμονομήθηκε σε περιβάλλον εκτός νερού, ώστε να υπολογιστούν αρχικές τιμές της εσωτερικής γεωμετρίας του συστήματος κάμερα - θήκη, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκ νέου βαθμονόμηση, εντός νερού. Η επεξεργασία των δεδομένων της βαθμονόμησης έγινε στο λογισμικό Kalibr (Rehder et al., 2016) και υπολογίστηκαν νέες εικόνες με απαλοιφή των διαστροφών του φακού. Από την επεξεργασία των νέων εικόνων εντός της βιβλιοθήκης SfM Colmap (Schonberger & Frahm, 2016) προέκυψε η πρώτη τρισδιάστατη ανακατασκευή με σκοπό τη χρήση της ως μοντέλου αναφοράς (ground truth). Η κλίμακα του μοντέλου αποκαταστάθηκε με ενσωμάτωση των βαθυμετρικών μετρήσεων από τον αισθητήρα βάθους. Συνολικά, μελετήθηκε η εφαρμογή τριών αλγορίθμων, του αλγορίθμου VSLAM ORB-SLAM2 και των αλγορίθμων VO SVO-2 (Semi-Direct Visual Odometry) και DSO (Direct Sparse Odometry). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος βάσει χαρακτηριστικών σημείων ORB-SLAM2 απέδωσε ικανοποιητικότερα από τις άμεσες μεθόδους οπτικής οδομετρίας SVO-2 και DSO. Συγκεκριμένα, ο ORB-SLAM2 λειτούργησε επαρκώς για τα 5 από τα 7 πακέτα δεδομένων, σε αντίθεση με τους SVO-2 και DSO που απέδωσαν για τα 4 από τα 7.



Εικόνα 5.6: Εφαρμογή VSLAM με χρήση του Aqualoc underwater dataset (Ferrera et al., 2019).

Τον αλγόριθμο ORB-SLAM2 επέλεξε επίσης ο Hidalgo (2019) να δοκιμάσει σε μία σειρά διαφορετικών πακέτων δεδομένων από ROV, τα οποία χαρακτηρίζονται από τα εξής διαφορετικά σενάρια: περιοχές με δομή (όπως πισίνες, κρηπιδώματα, ναυάγια, προβλήτες, σκάφη, αγωγοί) και περιοχές χωρίς δομή (ομοιογενείς εκτάσεις πυθμένα, ποτάμια, ύφαλοι), νυχτερινές και ημερήσιες λήψεις, διαφορετικά βάθη, φυσικός φωτισμός με ηλιοφάνεια και με νεφώσεις. Συνολικά, συλλέχθηκαν 46 διαφορετικά πακέτα δεδομένων από 9 διαφορετικές περιοχές. Η έρευνα στηρίχθηκε στη λειτουργία του αλγορίθμου VSLAM, με αποκλειστικά δεδομένα εικόνων,



ενώ δεν χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα αδρανειακές, βαθυμετρικές ή άλλες παρατηρήσεις. Έγινε αξιολόγηση του αλγορίθμου στα διαφορετικά σενάρια και υπό το πρίσμα χαρακτηριστικών προκλήσεων του υποβρύχιου περιβάλλοντος, όπως η ύπαρξη ή μη δομής, η θολότητα, η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων η ύπαρξη υποθαλάσσιων ρευμάτων, η απώλεια των χρωμάτων και οι υποβρύχιες φωτιστικές συνθήκες. Σχετικά με την ύπαρξη δομής ή υφής στο αντικείμενο, παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη ενός εκ των δύο (δομής ή υφής) είναι επαρκής για την εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων και τη λειτουργία του αλγορίθμου· η απουσία και των δύο καθιστά αδύνατη την εκτέλεσή του. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, προτείνεται ο συνδυασμός του ORB-SLAM2 με κάποιον αλγόριθμο πυκνότερης ανίχνευσης και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών σημείων, όπως ο DTAM ή ο DP-SLAM (Distributed Particle). Σε συνθήκες θολότητας ή αιωρούμενων σωματιδίων, ο αλγόριθμος λειτούργησε επαρκώς, αφού ακόμα και με την ανίχνευση σωματιδίων ως χαρακτηριστικών σημείων, η αντιστοίχισή τους σε στερεοζεύγη εικόνων ήταν αδύνατη. Ως προς την κίνηση που παρατηρείται εντός νερού (ρεύματα, κινούμενη θαλάσσια ζωή όπως ποσειδωνία ή και ψάρια), ο ORB-SLAM2 παρουσίασε αδυναμία κατά την αρχικοποίηση λόγω υπεράριθμων λανθασμένων αντιστοιχίσεων. Οι υποβρύχιες συνθήκες φωτισμού, τέλος, παρουσίασαν τη μεγαλύτερη επίδραση στον αλγόριθμο, με τις ημέρες έντονης ηλιοφάνειας να αποτελούν τροχοπέδη για την αρχικοποίηση του συστήματος, κυρίως σε ρηχά νερά, λόγω των ισχυρών αντανάκλασεων. Σε μεγαλύτερα βάθη, ακόμα και με έλλειψη των χρωμάτων, η εφαρμογή του ORB-SLAM2 ήταν επιτυχής, λόγω της ενιαίας ραδιομετρίας. Σε κάθε περίπτωση, για την ενίσχυση κάθε αλγορίθμου VSLAM προτείνεται η ενσωμάτωση πολλαπλών ειδών δεδομένων, μεταξύ των οποίων αδρανειακές και βυθομετρικές παρατηρήσεις.

## 6 Ανακεφαλαίωση & Ερευνητικό Ενδιαφέρον

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται ένα αρκετά ευρύ αντικείμενο, αυτό της τρισδιάστατης ανακατασκευής υποβρύχιων σκηνών, με την αξιοποίηση δεδομένων από αισθητήρες προσαρμοσμένους σε υποβρύχια οχήματα. Στόχος ήταν η κατά το δυνατόν ευρεία, αλλά όχι επιφανειακή, κάλυψη ζητημάτων που σχετίζονται με τις μεθόδους χαρτογράφησης και ανακατασκευής του υποβρύχιου περιβάλλοντος. Κάθε κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον και θα μπορούσε να αποτελέσει, αυτόνομα, θέμα για μελλοντική έρευνα.

Αρχικά, διερευνώνται τα είδη των υποβρύχιων οχημάτων, με εστίαση στα μη επανδρωμένα οχήματα ASV, AUV και ROV όσο και στα είδη των αισθητήρων που αυτά φέρουν για τη συλλογή δεδομένων πλοήγησης και γεωμετρικής και οπτικής πληροφορίας. Η πρώτη κατηγορία, αυτή των αυτόνομων οχημάτων επιφανείας, ASV, υπερέχει από άποψη δυνατοτήτων πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, αφού εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα ενσωμάτωσης δέκτη για λήψεις δορυφορικών παρατηρήσεων, αλλά ταυτόχρονα ενέχει βασικούς περιορισμούς, όπως το μικρό επιχειρησιακό βάθος, ειδικά όταν στόχος είναι μία φωτογραμμετρική ανακατασκευή, και η οριακά 2.5D χαρτογράφηση, αφού το όχημα κινείται σε ένα επίπεδο, αυτό της επιφάνειας της θάλασσας. Σε αντίθεση με τα ASV, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα AUV καθώς και τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα ROV αγγίζουν πλέον κάποιες χιλιάδες μέτρα επιχειρησιακού βάθους και παρέχουν δυνατότητες καταγραφής πληροφορίας σε εξαιρετικά δυσπρόσιτες περιοχές. Το δε οικονομικό κόστος των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων δεν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για περιπτώσεις τρισδιάστατης ανακατασκευής υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας, με περιπτώσεις AUV και ROV χαμηλού κόστους, στελεχωμένων με απλά συστήματα αισθητήρων, να αποδίδουν εντυπωσιακά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, ερευνήθηκε το πρόβλημα της ακριβούς εκτίμησης της θέσης ενός υποβρύχιου οχήματος σε σχέση με τις γεωγραφικές συντεταγμένες, σε περιβάλλοντα όπου το σύστημα δορυφορικού εντοπισμού είναι αδύνατο να εισχωρήσει. Το ζήτημα αυτό προσεγγίζεται μέσω της υποβρύχιας ακουστικής, με χρήση εσωτερικών αισθητήρων (βάθους, πορείας, περιστροφής, ταχύτητας του ήχου, επιτάχυνσης, μαγνητικού πεδίου) των υποβρύχιων οχημάτων και εξωτερικών, των πομποδεκτών, που τοποθετούνται είτε στο όχημα είτε στο σκάφος υποστήριξης είτε ποντίζονται στην περιοχή εργασίας. Αναλύθηκαν τέσσερις βασικές τεχνικές (LBL, SBL, USBL και GIB) ως προς την αρχή λειτουργίας τους, τα επίπεδα ακριβείας τους, την ευκολία εφαρμογής τους στο πεδίο, το κόστος και την πιθανή σύνδεσή τους με εφαρμογές χαρτογράφησης. Ως προς την ακρίβεια, μέσω της τεχνικής Long Baseline η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της τρισδιάστατης θέσης μπορεί να φτάσει έως και λίγα cm, λόγω της γεωμετρικής ευρωστίας της μεθόδου, των πλεοναζουσών παρατηρήσεων και της ανεξαρτησίας από την απόσταση. Ωστόσο, η τεχνική που απαντάται στις περισσότερες βιβλιογραφικές αναφορές για εφαρμογές χαρτογράφησης και τρισδιάστατης ανακατασκευής είναι η Ultra Short Baseline, λόγω του χαμηλού κόστους, της ταχύτητας και της ευελιξίας της στο πεδίο. Ωστόσο, αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι η εφαρμογή των τεχνικών αυτών περιορίζεται προς το παρόν στην πλοήγηση των οχημάτων και στην αρχικοποίηση της θέσης μιας χαρτογράφησης και όχι τόσο στην αξιοποίησή τους εντός μιας φωτογραμμετρικής, για παράδειγμα, επίλυσης.

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον της εργασίας όμως ήταν η μελέτη των μεθόδων τρισδιάστατης ανακατασκευής με την αξιοποίηση της συλλεγόμενης εικονιστικής πληροφορίας από τους αλγόριθμους της Όρασης Υπολογιστών. Στο τρίτο κεφάλαιο πλέον, αναλύεται το πώς οι συνθήκες του υποβρύχιου περιβάλλοντος επηρεάζουν το σχηματισμό της εικόνας τόσο ραδιομετρικά όσο και γεωμετρικά. Κρίνεται σημαντική η κατανόηση των κανόνων της οπτικής στη διαμόρφωση της υποβρύχιας εικόνας σε δύο άξονες: στα φαινόμενα που επηρεάζουν τη ραδιομετρική ποιότητα της εικόνας (απορρόφηση, σκέδαση, απώλεια χρωμάτων, διάχυση) και στο βασικό φαινόμενο της διάθλασης που επηρεάζει τη γεωμετρική ποιότητα της εικόνας, όταν το περιβάλλον σχηματισμού της τελευταίας θεωρείται πολυ-μεσικό (αέρας, υλικό θήκης στεγανοποίησης της κάμερας, νερό). Ως προς το πρώτο ζήτημα, της ραδιομετρικής διόρθωσης, καταγράφηκε ένας εντυπωσιακά μεγάλος αριθμός αναφορών που ασχολείται με τη μελέτη αλγορίθμων αποκατάστασης και ενίσχυσης υποβρύχιων εικόνων. Η δυνατότητα μοντελοποίησης φυσικών παραμέτρων όπως η απορρόφηση της ακτινοβολίας στο νερό απέδειξε ότι η υποβρύχια εικόνα μπορεί να διορθωθεί με επιτυχία αν είναι γνωστή η απόσταση κάμερας και επιπέδων της υποβρύχιας σκηνής. Σχετικά, πολλές πρόσφατες αναφορές μελετούν την ανάπτυξη αλγορίθμων αποκατάστασης της εικόνας, μέσα από τον υπολογισμό χαρτών βάθους που προκύπτουν από επιλύσεις SfM. Τέλος, η επιτυχία της ανάπτυξης νέων αλγορίθμων επεξεργασίας υποβρύχιας εικόνας αντικατοπτρίζεται στο στάδιο της ανίχνευσης και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών σημείων μεταξύ των εικόνων εντός μιας πολυεικονικής φωτογραμμετρικής διαδικασίας.

Μεγάλο βάρος δόθηκε, στη συνέχεια, στη μελέτη της γεωμετρίας του συστήματος “κάμερα-θήκη στεγανοποίησης-αντικείμενο στο νερό” και της διαθλαστικής διάδοσης της ακτίνας μεταξύ των διαφορετικών μέσων. Παλαιότερες αναφορές αντιμετώπιζαν την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού του συστήματος της κάμερας μόνο συναρτήσει της σταθεράς της μηχανής, δηλαδή της πιο ευμετάβλητης παραμέτρου, εξασφαλίζοντας τη διόρθωση από τη γνώση των δεικτών διάθλασης νερού και αέρα. Αργότερα, η έρευνα επικεντρώθηκε στη διερεύνηση του προβλήματος της κατάρνησης του μοντέλου της κάμερας σημειακής οπής, με ένταξη του συστήματος της υποβρύχιας κάμερας σε μία κατηγορία γενικευμένων μοντέλων καμερών (general cameras). Σημαντικός στην ανάλυση της γεωμετρίας της διαθλώμενης ακτίνας υπήρξε ο διαχωρισμός των θηκών στεγανοποίησης σε επίπεδες και θολωτές. Στην πρώτη κατηγορία, αυτή των επίπεδων θηκών, το φαινόμενο της διάθλασης παρουσιάζει την εντονότερή του μορφή, σε αντίθεση με τις θολωτές θήκες, οι οποίες κατασκευάστηκαν με αυτό το σκοπό, τη διόρθωση δηλαδή των γεωμετρικών προβλημάτων των πρώτων. Μεταξύ των κυριότερων προσεγγίσεων του γεωμετρικού προβλήματος των διαθλώμενων ακτίνων και της βαθμονόμησης του συστήματος της υποβρύχιας κάμερας είναι η υπόθεση ενός εικονικού προβολικού κέντρου με σκοπό την αποκατάσταση της συνθήκης συγγραμμικότητας (η συχνότερη προσέγγιση στην περίπτωση των επίπεδων θηκών), η μηχανολογική προσπάθεια ταύτισης του προβολικού κέντρου της κάμερας με το κέντρο της σφαίρας του θόλου και ο υπολογισμός ενός εναπομένοντος διανύσματος από την ταύτιση των δύο κέντρων (για τις θολωτές θήκες), ο προσδιορισμός των παραμέτρων που περιγράφουν τη γεωμετρία της θήκης με σκοπό τον προβολικό μετασχηματισμό ενός σημείου του τρισδιάστατου χώρου στο επίπεδο της εικόνας μέσα από ένα πολυώνυμο 12<sup>ου</sup> βαθμού και, τέλος, η υπόθεση μιας εικονικής κάμερας για κάθε παρατηρούμενο σημείο στο επίπεδο της εικόνας με μεταφορά του εικονικού κέντρου στο επίπεδο της θήκης, ώστε να περιγράφεται η ακτίνα μόνο εντός νερού και χωρίς διαθλάσεις. Οι περισσότερες αναφορές βαθμονόμησης περιγράφουν πειραματικές εφαρμογές αρχικά εκτός νερού και έπειτα in situ, ενώ τα αποτελέσματά τους εντάχθηκαν σε επιλύσεις SfM με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βελτιστοποίηση της συνόρθωσης και τη μείωση του σφάλματος επαναπροβολής.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, το πρόβλημα SfM σε υποβρύχιες λήψεις απαντάται συνήθως ως Refractive SfM για να τονίσει την επίδραση της διάθλασης στη γεωμετρία του συστήματος και να διαφοροποιήσει τους νόμους της επιπολικής γεωμετρίας, αντικαθιστώντας έτσι το κλασικό μοντέλο κεντρικής προβολής. Στην περίπτωση των υποβρύχιων λήψεων, το πρόβλημα του εσωτερικού προσανατολισμού ενός στερεοζεύγους χρήζει ιδιαίτερης μεταχείρισης, ενώ η κλασική επιπολική γεωμετρία επαναδιατυπώνεται σε πιο γενικευμένη μορφή, που προσεγγίζει τις επιπολικές ευθείες ως επιπολικές “καμπύλες”, με σκοπό να ακολουθήσει πιστότερα την πορεία του μετασχηματισμού ενός σημείου από τον τρισδιάστατο προβολικό χώρο στο προβολικό επίπεδο της εικόνας. Για το στάδιο της συνόρθωσης με τη μέθοδο της δέσμης και τη μείωση του σφάλματος επαναπροβολής, εξετάζεται το μοντέλο Gauss-Helmert έναντι του μοντέλου Gauss-Markov, κυρίως για το λόγο ότι επιτρέπει τη συνόρθωση παραμέτρων και παρατηρήσεων ενιαία, χωρίς να τα διαχωρίζει. Για το στάδιο της πυκνής συνταύτισης εξετάζονται μεθοδολογίες όπως η διαθλαστική σάρωση επιπέδων (Refractive Plane Sweep), κατά την οποία η αρχικοποίηση των τιμών βάθους επιτυγχάνεται με τον ορισμό τυχαίων υποθετικών επιπέδων μπροστά από το επίπεδο της εικόνας. Η μέθοδος αποδεικνύεται κατάλληλη για περιπτώσεις καμερών πολύπλοκης γεωμετρίας και για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, με βασικό πλεονέκτημα το χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο εξετάζεται ο συνδυασμός των αδρανειακών, ακουστικών ή οπτικών αισθητήρων των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων για την επίλυση του προβλήματος SLAM σε περιοχές αυξημένων απαιτήσεων και ιδιαιτεροτήτων, ως μοναδική λύση για την χαρτογράφηση και την τρισδιάστατη ανακατασκευή του χώρου σε πραγματικό χρόνο. Κατά τη βιβλιογραφική έρευνα εφαρμογών SLAM που αφορούν το υποβρύχιο περιβάλλον εντοπίστηκαν ως επί το πλείστον αναφορές που περιγράφουν την αξιοποίηση αδρανειακών και ηχοβολιστικών συστημάτων κυρίως για το πρόβλημα της εκτίμησης της τροχιάς του οχήματος (ό,τι ενδιαφέρει κυρίως την Οπτική Οδομετρία) και όχι τόσο την ανακατασκευή του χώρου όπου κινείται το όχημα. Ωστόσο, για τη σημαντική μείωση των σωρευτικών σφαλμάτων, που προέρχονται από το θόρυβο των παρατηρήσεων, τα σφάλματα των αισθητήρων ή την ολίσθηση, έδωσαν λύση οι αλγόριθμοι του Οπτικού SLAM, αφού η εκτίμηση της τροχιάς του οχήματος προκύπτει τελικά από την αξιοποίηση των εικόνων που συλλέγει το σύστημα καμερών του. Το ζητούμενο εν προκειμένω δεν είναι τόσο η ακρίβεια, όπως σε μία επίλυση SfM, αλλά η εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο και η οικονομία της υπολογιστικής ισχύος. Οι αλγόριθμοι Extended Kalman Filter, FastSLAM, GraphSLAM και ORB-SLAM2 αποδεικνύονται δημοφιλέστεροι βιβλιογραφικά και περιγράφονται εκτενώς με χαρακτηριστικές εφαρμογές τους σε δεδομένα υποβρύχιων οχημάτων. Αν και η χαρτογράφηση, η εκτίμηση της τροχιάς του οχήματος και η τρισδιάστατη ανακατασκευή επιτυγχάνονται επιτυχέστερα με εφαρμογή αλγορίθμων της Όρασης Υπολογιστών (SfM, VSLAM, VO) και συνεπώς αξιοποίηση κυρίως των δεδομένων εικόνας, το υποβρύχιο περιβάλλον έχει τέτοιες ιδιαιτερότητες (όπως η αυξημένη πιθανότητα ύπαρξης περιοχών κακής ραδιομετρίας με συνεπαγόμενη αδυναμία ανίχνευσης και αντιστοίχισης χαρακτηριστικών σημείων), που η χρήση των υπόλοιπων αισθητήρων του υποβρύχιου οχήματος (αδρανειακοί, ακουστικοί) κρίνεται γενικά απαραίτητη.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον που αντλείται από τη θεματολογία της εργασίας αυτής απλώνεται σε πολλά πεδία που καίτοι επικαλυπτόμενα, το καθένα διαθέτει ένα σημαντικό δυναμικό εύρος διερεύνησης. Το πιο ιδιαίτερο - και ίσως πολυπλοκότερο - πεδίο είναι αυτό της μελέτης της γεωμετρίας, όπως αυτή διαμορφώνεται υπό την επίδραση της διάθλασης, και αφορά τη διάδοση της ακτίνας, το σύστημα της υποβρύχιας κάμερας και το μοντέλο του σχετικού προσανατολισμού του στερεοζεύγους εικόνων. Η έντονη διαφοροποίηση των ως τώρα προτεινόμενων αλγορίθμων, όπως για τη βαθμονόμηση του συστήματος της κάμερας, τις μη-

γραμμικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης της συνόρθωσης, το μετασχηματισμό των τρισδιάστατων σημείων του χώρου στο προβολικό επίπεδο της εικόνας ή τον εκφυλισμό των επιπολικών ευθειών σε καμπύλες, αποδεικνύουν ότι οι περιπτώσεις “γενικών” καμερών και “γενικευμένης” επιπολικής γεωμετρίας αφήνουν ανοιχτές ιδέες προς πολλές κατευθύνσεις, κάτι που δεν συμβαίνει με το κατά τα άλλα αυστηρό μοντέλο της κεντρικής προβολής.

Η μελέτη του συγχρονισμού των δεδομένων από τους αισθητήρες πλοήγησης με τις καταγραφές βίντεο, επίσης, θα διευκόλυνε σημαντικά το ζήτημα της αποκατάστασης της κλίμακας (ειδικά για την περίπτωση των monocular καμερών) και της σύνδεσης με τις γεωγραφικές συντεταγμένες, ενώ παράλληλα θα ενίσχυε σημαντικά το υπολογιστικό κόστος κατά το πολύ συχνό ζητούμενο της επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Από τις εφαρμογές VSLAM που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε ότι αν και τα οχήματα ήταν στελεχωμένα με πολλαπλών ειδών αισθητήρες, η σύνδεση των δεδομένων τους αφορούσε κυρίως μόνο την αρχική κατάσταση θέσης του οχήματος και η πλήρης σύνδεση των δεδομένων γινόταν τις περισσότερες φορές σε επόμενο στάδιο και όχι στο πεδίο. Ο επιτυχής συγχρονισμός αδρανειακών, ακουστικών και οπτικών περιοχών θα ενισχύσει τις αδύναμες υποβρύχιες περιοχές (περιπτώσεις έλλειψης σήματος ή αδύναμης ραδιομετρίας).

Αντίστοιχο ενδιαφέρον διερεύνησης παρουσιάζουν οι τεχνικές πλοήγησης και προσδιορισμού υποβρύχιας θέσης που αναλύθηκαν στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της εργασίας, ως προς τα επίπεδα ακρίβειάς τους, οι οποίες θα μπορούσαν να ελεγχθούν εντός μιας επίλυσης SfM. Εξ ορισμού οι τεχνικές USBL, παρότι πιο δημοφιλείς, είναι αδύναμες να υποστηρίξουν μία επίλυση SfM κλίμακας close-range. Ωστόσο οι LBL, από την άλλη μεριά, θα μπορούσαν να εξεταστούν ως προς οποιαδήποτε επίλυση, ανεξαρτήτως κλίμακας, δεδομένων των δυνατοτήτων τους.

Τέλος, η ενθάρρυνση της επιστημονικής κοινότητας της Όρασης Υπολογιστών να ασχοληθεί περαιτέρω με τα πεδία της χαρτογράφησης και τρισδιάστατης ανακατασκευής υποβρύχιων σκηνών θα προκύψει από τη δημιουργία και διάθεση βιβλιοθηκών ανοιχτών δεδομένων από διαφορετικά σενάρια εφαρμογών, μέσω φορέων που έχουν πρόσβαση σε τεχνολογίες υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων και υποβρύχιες έρευνες.

## Βιβλιογραφία

- Agdestein, E.N., 2018. Visual Estimation of Motion for ROVs-Increasing Accuracy for ROV Navigation (Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology).
- Agrawal, A., Ramalingam, S., Taguchi, Y., Chari, V., 2012. A theory of multi-layer at refractive geometry. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Agouridis, C., 2011. The Late Bronze Age Shipwreck off the Islet of Modi (Poros). *Skyllis*, 11(2), pp.25-34.
- Åhlén, J., Sundgren, D. and Bengtsson, E., 2007. Application of underwater hyperspectral data for color correction purposes. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 17(1), pp.170-173.
- Akkaynak, D. and Treibitz, T., 2019. Sea-Thru: A Method for Removing Water From Underwater Images. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 1682-1691).
- Alcocer, A., Oliveira, P. and Pascoal, A., 2006. Underwater acoustic positioning systems based on buoys with GPS. In: *Proc. of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics*, Vol. 8, pp. 1-8.
- Ancuti, C., Ancuti, C.O., Haber, T. and Bekaert, P., 2012. Enhancing underwater images and videos by fusion. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 81-88.
- Andono, P.N., Purnama, I. and Hariadi, M., 2013. UNDERWATER IMAGE ENHANCEMENT USING ADAPTIVE FILTERING FOR ENHANCED SIFT-BASED IMAGE MATCHING. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 52(3).
- A.PO.MA.B., Academy of Positioning Marine and Bathymetry, Scientific Manifest 2, Available at: [www.hydrointernational.com/download/whitepaper\\_uploadfile\\_9.pdf](http://www.hydrointernational.com/download/whitepaper_uploadfile_9.pdf) (accessed December 12, 2012).
- Arnold-Bos, A., Malkasse, J.P. and Kervern, G., 2005. A preprocessing framework for automatic underwater images denoising. *Proc. European Conference on Propagation and Systems*, Brest, France.
- Bailey, T. and Durrant-Whyte, H., 2006. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), pp.108-117.
- Bay, H., Tuytelaars, T. and Van Gool, L., 2006. SURF: Speeded up robust features. In: *European Conference on Computer Vision*, Springer, pp. 404-417.
- Beall, C., Dellaert, F., Mahon, I. and Williams, S.B., 2011. Bundle adjustment in large-scale 3D reconstructions based on underwater robotic surveys. In: *OCEANS 2011 IEEE-Spain*, pp. 1-6.
- Behance, 2014. iextract | Titanic on Behance. Available at: [www.behance.net/gallery/ixtract-Titanic/3422941](http://www.behance.net/gallery/ixtract-Titanic/3422941)
- Bellingham, J.G., 2009. Platforms: autonomous underwater vehicles. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*, URL: 10.1016/B978-012374473-9.00730-X.
- Bertram, V., 2008. Unmanned surface vehicles - a survey. *Skibsteknisk Selskab*, Copenhagen, Denmark, 1, pp.1-14.
- Bianco, G., Gallo, A., Bruno, F. and Muzzupappa, M., 2011. A comparison between active and passive techniques for underwater 3D applications. *International Archives of the*

*Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-5/W16, pp.357-363.

Blasinski, H. and Farrell, J., 2016. A three parameter underwater image formation model. *Electronic Imaging*, 2016(18), pp.1-8.

Blidberg, D.R., 2001. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

Bräuer-Burchardt, C., Kühmstedt, P. and Notni, G., 2015. Combination of air-and water-calibration for a fringe projection based underwater 3D-Scanner. In: *Proc. International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, Springer, pp. 49-60.

Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Pizarro, O. and Williams, S.B., 2016. True color correction of autonomous underwater vehicle imagery. *Journal of Field Robotics*, 33(6), pp.853-874.

Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C. and Fua, P., 2010. Brief: Binary robust independent elementary features. In: *European Conference on Computer Vision*, Springer, pp. 778-792.

Camilli, R., Mallios, A., Sakellariou, D., Bingham, B., Eustice, R. and Goudreau, J., 2016. Real-time in-situ chemical and localization sensors integration in human occupied submersible for studying hydrothermal vents. *Proc. Hellenic Symposium of Oceanography and Fishery*.

Canciani, M., Gambogi, P., Romano, F.G., Cannata, G. and Drap, P., 2003. Low cost digital photogrammetry for underwater archaeological site survey and artifact isertion. The case study of the Dolia wreck in Secche della Meloria-Livorno-Italia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV, Part 5/W12, pp. 95-100.

Carlevaris-Bianco, N., Mohan, A. and Eustice, R.M., 2010. Initial results in underwater single image dehazing. In *OCEANS 2010 MTS/IEEE - SEATTLE*.

Carlson, D.F., Fürsterling, A., Vesterled, L., Skovby, M., Pedersen, S.S., Melvad, C. and Rysgaard, S., 2019. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. *HardwareX*, 5, e00059.

Carreras, M., Gori, A., Mallios, A., Palomeras, N., Linares, C., Gili, J.M., Ribas Romagos, D., Hurtós, N., Magí, L. and Ridao, P., 2016. Seabed monitoring with Girona 500 AUV working as HROV. In: *Instrumentation Viewpoint*, No. 19, pp. 65-66.

Chadebecq, F., Vasconcelos, F., Lacher, R., Maneas, E., Desjardins, A., Ourselin, S., Vercauteren, T. and Stoyanov, D., 2019. Refractive Two-View Reconstruction for Underwater 3D Vision. *International Journal of Computer Vision*, pp.1-17.

Chambah, M., Semani, D., Renouf, A., Courtellemont, P. and Rizzi, A., 2003. Underwater color constancy: enhancement of automatic live fish recognition. In: *Color Imaging IX: Processing, Hardcopy, and Applications*, Proc. SPIE. Vol. 5293, pp. 157-168.

Chang, Y.J. and Chen, T., 2015. Multi-view 3D reconstruction for scenes under the refractive plane with known vertical direction. In: *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 351-358.

Chen, L., Wang, S., Hu, H., Gu, D. and Liao, L., 2015. Improving localization accuracy for an underwater robot with a slow-sampling sonar through graph optimization. *IEEE Sensors Journal*, 15(9), pp.5024-5035.

Cho, Y. and Kim, A., 2017, May. Visibility enhancement for underwater visual SLAM based on underwater light scattering model. In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 710-717). IEEE.

Christ, R.D. and Wernli Sr, R.L., 2013. *The ROV Manual: a User Guide for Remotely Operated Vehicles*. Butterworth-Heinemann.

Da Silva, D.C. (ed.), 2012. *Special Applications of Photogrammetry*. BoD—Books on Demand.

Dellaert, F. and Kaess, M., 2006. Square Root SAM: Simultaneous localization and mapping via square root information smoothing. *The International Journal of Robotics Research*, 25(12), pp.1181-1203.

Diamanti, E. and Vlachaki, F., 2015. 3D Recording of underwater antiquities in the south euboean gulf. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5/W5, p.93-98.

Diamanti, E., Spondylis, E., Vlachaki, F. and Kolyva, E., 2017. Surveying the underwater archaeological site of Cape Glaros at Pagasetikos Gulf. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W3, pp. 243–250.

Drap, P., Merad, D., Hijazi, B., Gaoua, L., Nawaf, M., Saccone, M., Chemisky, B., Seinturier, J., Sourisseau, J.C., Gambin, T. and Castro, F., 2015. Underwater photogrammetry and object modeling: a case study of Xlendi Wreck in Malta. *Sensors*, 15(12), pp.30351-30384.

Drap, P., Seinturier, J., Hijazi, B., Merad, D., Boi, J.M., Chemisky, B., Seguin, E. and Long, L., 2015. The ROV 3D Project: Deep-sea underwater survey using photogrammetry: Applications for underwater archaeology. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 8(4), no.21.

Durrant-Whyte, H. and Bailey, T., 2006. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), pp. 99-110.

Engel, J., Koltun, V. and Cremers, D., 2017. Direct sparse odometry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(3), pp.611-625.

Erič, M., Berginc, G., Kovačič, R., Pugelj, M. and Solina, F., 2016. Successful use of temporary underwater 3D documenting methodology: Early Roman barge from Ljubljana river, Slovenia. *Proc. 5<sup>th</sup> International Congress on Underwater Archaeology*, pp. 259-274.

Eustice, R., Singh, H., Leonard, J.J., Walter, M.R. and Ballard, R., 2005. Visually navigating the RMS Titanic with SLAM information filters. In: *Robotics: Science and Systems*, pp. 57-64.

Ferrera, M., Moras, J., Trouvé-Peloux, P., Creuze, V. and Dégez, D., 2018. The aqualoc dataset: Towards real-time underwater localization from a visual-inertial-pressure acquisition system. arXiv preprint, arXiv:1809.07076.

Foley, B.P., Dellaporta, K., Sakellariou, D., Bingham, B.S., Camilli, R., Eustice, R.M., Evagelistis, D., Ferrini, V.L., Katsaros, K., Kourkoumelis, D. and Mallios, A., 2009. The 2005 Chios ancient shipwreck survey: new methods for underwater archaeology. *Hesperia*, pp.269-305.

Forouher, D., Hartmann, J., Litza, M. and Maehle, E., 2011. Sonar-based FastSLAM in an underwater environment using walls as features. In: *15<sup>th</sup> IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 588-593.

Forster, C., Pizzoli, M. and Scaramuzza, D., 2014, May. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 15-22.



- Fryer, J.G. and Fraser, C.S., 1986. On the calibration of underwater cameras. *The Photogrammetric Record*, 12(67), pp. 73-85.
- Furukawa, Y. and Ponce, J., 2009. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), pp.1362-1376.
- Galdran, A., Pardo, D., Picón, A. and Alvarez-Gila, A., 2015. Automatic red-channel underwater image restoration. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 26, pp.132-145.
- Gallup, D., Frahm, J.M., Mordohai, P., Yang, Q. and Pollefeys, M., 2007. Real-time plane-sweeping stereo with multiple sweeping directions. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1-8.
- Gálvez-López, D. and Tardos, J.D., 2012. Bags of binary words for fast place recognition in image sequences. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5), pp. 1188-1197.
- García, R., Puig, J., Ridao, P. and Cufi, X., 2002, May. Augmented state Kalman filtering for AUV navigation. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 4010-4015).
- Gedge, J., Gong, M. and Yang, Y.H., 2011. Refractive epipolar geometry for underwater stereo matching. In: *Proc. Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, pp. 146-152.
- Geraga, M., Papatheodorou, G., Agouridis, C., Kaberi, H., Iatrou, M., Christodoulou, D., Fakiris, E., Prevenios, M., Kordella, S. and Ferentinos, G., 2017. Palaeoenvironmental implications of a marine geoarchaeological survey conducted in the SW Argosaronic gulf, Greece. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, pp.805-818.
- Harris, C.G. and Stephens, M., 1988, August. A combined corner and edge detector. In *Alvey vision conference* (Vol. 15, No. 50, pp. 10-5244).
- Hartley, R. and Zisserman, A., 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Harvey, E., Cappo, M., Shortis, M., Robson, S., Buchanan, J. and Speare, P., 2003. The accuracy and precision of underwater measurements of length and maximum body depth of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) with a stereo-video camera system. *Fisheries Research*, 63(3), pp. 315-326.
- Harvey, E. and Shortis, M., 1995. A system for stereo-video measurement of sub-tidal organisms. *Marine Technology Society Journal*, 29(4), pp. 10-22.
- He, K., Sun, J. and Tang, X., 2010. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(12), pp. 2341-2353.
- He, B., Ying, L., Zhang, S., Feng, X., Yan, T., Nian, R. and Shen, Y., 2015. Autonomous navigation based on unscented-FastSLAM using particle swarm optimization for autonomous underwater vehicles. *Measurement*, 71, pp.89-101.
- Heikkila, J., 2000. Geometric camera calibration using circular control points. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10), pp. 1066-1077.
- Hernández, J., Istenič, K., Gracias, N., Palomeras, N., Campos, R., Vidal, E., Garcia, R. and Carreras, M., 2016. Autonomous underwater navigation and optical mapping in unknown natural environments. *Sensors*, 16(8), 1174.

- Hidalgo, F.H., 2019. *Simultaneous Localization and Mapping in Underwater Robots*. Ph.D.Thesis, The University of Western Australia.
- Hidalgo, F. and Bräunl, T., 2015. Review of underwater SLAM techniques. In: *Proc. 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, pp. 306-311, IEEE.
- Hirschmuller, H., 2007. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), pp. 328-341.
- Hitam, M.S., Awalludin, E.A., Yussof, W.N.J.H.W. and Bachok, Z., 2013, January. Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement. In: *Proc. IEEE International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT)*, pp. 1-5.
- Höhle, J., 1971. Reconstruction of the underwater object. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 37(9), pp. 948-954.
- Hou, W., Gray, D.J., Weidemann, A.D. and Arnone, R.A., 2008. Comparison and validation of point spread models for imaging in natural waters. *Optics Express*, 16(13), pp. 9958-9965.
- Huo, G., Wu, Z., Li, J. and Li, S., 2018. Underwater target detection and 3D reconstruction system based on binocular vision. *Sensors*, 18(10), 3570.
- Iqbal, K., Salam, R.A., Osman, A. and Talib, A.Z., 2007. Underwater Image Enhancement Using an Integrated Colour Model. *IAENG International Journal of Computer Science*, 34(2).
- Jaffe, J.S., 1990. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15(2), pp. 101-111.
- Jagalingam, P., Akshaya, B.J. and Hegde, A.V., 2015. Bathymetry mapping using Landsat 8 satellite imagery. *Procedia Engineering*, 116, pp. 560-566.
- Johannsson, H., Kaess, M., Englot, B., Hover, F. and Leonard, J., 2010, October. Imaging sonar-aided navigation for autonomous underwater harbor surveillance. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4396-4403.
- Johnson-Roberson, M., Pizarro, O., Williams, S.B. and Mahon, I., 2010. Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys. *Journal of Field Robotics*, 27(1), pp. 21-51.
- Jordán, M.A., Trabes, E. and Delrieux, C., 2019. A Robust Approach for Monocular Visual Odometry in Underwater Environments. In: *Proc. XX Simposio Argentino de Inteligencia Artificial (ASAI 2019)-JAIIO 48*, Salta, Argentina.
- Jordt, A., 2013. *Underwater 3D Reconstruction Based On Physical Models for Refraction and Underwater Light Propagation*. Ph.D. Thesis, Christian-Albrechts Universität Kiel, Germany).
- Jordt, A., Köser, K. and Koch, R., 2016. Refractive 3D reconstruction on underwater images. *Methods in Oceanography*, 15, pp. 90-113.
- Jordt-Sedlazeck, A. and Koch, R., 2012, October. Refractive calibration of underwater cameras. In: *Proc. European Conference on Computer Vision*, Springer, pp. 846-859.
- Joshi, B., Rahman, S., Kalaitzakis, M., Cain, B., Johnson, J., Xanthidis, M., Karapetyan, N., Hernandez, A., Li, A.Q., Vitzilaios, N. and Rekleitis, I., 2019. Experimental comparison of open source visual-inertial-based state estimation algorithms in the underwater domain. *arXiv preprint arXiv:1904.02215*.

- Kimball, P., Bailey, J., Das, S., Geyer, R., Harrison, T., Kunz, C., Manganini, K., Mankoff, K., Samuelson, K., Sayre-McCord, T. and Straneo, F., 2014, October. The whoi jetyak: An autonomous surface vehicle for oceanographic research in shallow or dangerous waters. In: *Proc. IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*.
- Koutsouflakis G.B., 2017, Three Shipwrecks of the Medieval Era in the Commercial Port of Rhodes. In: K. Birtacha, P. Triantaphyllidis & K. Sarantidis (eds), *Το Αρχαιολογικό Έργο στα Νησιά του Αιγαίου* (Inter. Congress, Rhodes 27/11-1/12/2013), Vol. C, pp. 477-500.
- Kunz, C. and Singh, H., 2008, September. Hemispherical refraction and camera calibration in underwater vision. In: *Proc. OCEANS 2008*.
- Kwasnitschka, T., Köser, K., Sticklus, J., Rothenbeck, M., Weiß, T., Wenzlaff, E., Schoening, T., Triebe, L., Steinführer, A., Devey, C. and Greinert, J., 2016. DeepSurveyCam—A deep ocean optical mapping system. *Sensors*, 16(2), 164.
- Lagudi, A., Bianco, G., Muzzupappa, M. and Bruno, F., 2016. An alignment method for the integration of underwater 3D data captured by a stereovision system and an acoustic camera. *Sensors*, 16(4), 536.
- Lavest, J.M., Rives, G. and Lapresté, J.T., 2003. Dry camera calibration for underwater applications. *Machine Vision and Applications*, 13(5-6), pp.245-253.
- Leedekerken, J.C., Fallon, M.F. and Leonard, J.J., 2010. Mapping complex marine environments with autonomous surface craft. In: Khatib O., Kumar V., Sukhatme G. (eds), *Experimental Robotics*. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 79.
- Leonard, J. and Newman, P., 2003. Consistent, convergent, and constant-time SLAM. In: *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp. 1143-1150.
- Li, A.Q., Coskun, A., Doherty, S.M., Ghasemlou, S., Jagtap, A.S., Modasshir, M., Rahman, S., Singh, A., Xanthidis, M., O’Kane, J.M. and Rekleitis, I., 2016. Experimental comparison of open source vision-based state estimation algorithms. In: *Proc. International Symposium on Experimental Robotics*, Springer, pp. 775-786.
- Li, C., Guo, J. and Guo, C., 2018. Emerging from water: Underwater image color correction based on weakly supervised color transfer. *IEEE Signal Processing Letters*, 25(3), pp. 323-327.
- Li, H., Hartley, R. and Kim, J.H., 2008. A linear approach to motion estimation using generalized camera models. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Li, R., Li, H., Zou, W., Smith, R.G. and Curran, T.A., 1997. Quantitative photogrammetric analysis of digital underwater video imagery. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(2), pp. 364-375.
- Li, J., Skinner, K.A., Eustice, R.M. and Johnson-Roberson, M., 2017. WaterGAN: Unsupervised generative network to enable real-time color correction of monocular underwater images. *IEEE Robotics and Automation letters*, 3(1), pp.387-394.
- Linke, P. and Lackschewitz, K., 2016. Autonomous Underwater Vehicle „ABYSS “. *Journal of large-scale research facilities JLSRF*, 2, p.79.
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X. and Yuan, C., 2016. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, pp.71-93.
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), pp. 91-110.

- Lu, F. and Milios, E., 1997. Globally consistent range scan alignment for environment mapping. *Autonomous Robots*, 4(4), pp. 333-349.
- Lucas, B.D. and Kanade, T., 1981. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. 7<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 2, pp. 674-679.
- Łuczyński, T., Pflingsthor, M. and Birk, A., 2017. The pinax-model for accurate and efficient refraction correction of underwater cameras in flat-pane housings. *Ocean Engineering*, 133, pp. 9-22.
- Mallios, A., Ridao, P., Ribas, D. and Hernández, E., 2014. Scan matching SLAM in underwater environments. *Autonomous Robots*, 36(3), pp. 181-198.
- Manley, J.E., 2008. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *Proc. OCEANS 2008*.
- Maas, H.G., 1992. *Digitale Photogrammetrie in der Dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Ph.D.Thesis, ETH Zurich.
- Mahiddine, A., Seinturier, J., Boï, J.M., Drap, P. and Merad, D., 2012. Performances analysis of underwater image preprocessing techniques on the repeatability of sift and surf descriptors. In *Proc. 20th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*.
- McGlamery, B.L., 1975. Computer Analysis and Simulation of Underwater Camera System Performance. Report SIO ref., 75, University of California, San Dergo, USA.
- Menna, F., Nocerino, E., Nawaf, M.M., Seinturier, J., Torresani, A., Drap, P., Remondino, F. and Chemisky, B., 2019, June. Towards real-time underwater photogrammetry for subsea metrology applications. In: *Proc. OCEANS 2019-Marseille*.
- Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. and Wegbreit, B., 2002. FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In: *Proc. AAAI National Conference on Artificial Intelligence*.
- Newman, P., 1999. *On the Structure and Solution of the Simultaneous Localisation and Map Building Problem*. Ph.D Thesis, The University of Sydney, Australia.
- Nornes, S.M., 2018. *Guidance and Control of Marine Robotics for Ocean Mapping and Monitoring*. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Nornes, S.M., Ludvigsen, M., Ødegard, Ø. and Sørensen, A.J., 2015. Underwater photogrammetric mapping of an intact standing steel wreck with ROV. *IFAC-PapersOnLine*, 48(2), pp.206-211.
- Palomeras, N., El-Fakdi, A., Carreras, M. and Ridao, P., 2012. COLA2: A control architecture for AUVs. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(4), pp.695-716.
- Papadopoulos, G., Kurniawati, H., Shariff, A.S.B.M., Wong, L.J. and Patrikalakis, N.M., 2014. Experiments on surface reconstruction for partially submerged marine structures. *Journal of Field Robotics*, 31(2), pp.225-244.
- Perez, J., Attanasio, A.C., Nechyporenko, N. and Sanz, P.J., 2017, June. A deep learning approach for underwater image enhancement. In: *Proc. International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*, Springer, pp. 183-192.

- Pizarro, O., Eustice, R.M. and Singh, H., 2003. Relative Pose Estimation for Instrumented, Calibrated Imaging Platforms. In DICTA (pp. 601-612). In: Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), Sydney, Australia, pp. 601-612.
- Pless, R., 2003. Using many cameras as one. In: *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2.
- Prabhakar, C.J. and Kumar, P.P., 2012. LBP-SURF descriptor with color invariant and texture based features for underwater images. In: *Proc. of the 8<sup>th</sup> Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing*.
- Prats, M., Ribas, D., Palomeras, N., García, J.C., Nannen, V., Wirth, S., Fernández, J.J., Beltrán, J.P., Campos, R., Ridao, P. and Sanz, P.J., 2012. Reconfigurable AUV for intervention missions: a case study on underwater object recovery. *Intelligent Service Robotics*, 5(1), pp. 19-31.
- Rahman, T., Anderson, J., Winger, P. and Krouglicof, N., 2013. Calibration of an underwater stereoscopic vision system. In: *Proc. -2003 OCEANS-San Diego*.
- Rahman, T. and Krouglicof, N., 2011. An efficient camera calibration technique offering robustness and accuracy over a wide range of lens distortion. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(2), pp.626-637.
- Rahman, S., Li, A.Q. and Rekleitis, I., 2019. SVIn2: An underwater SLAM system using sonar, visual, inertial, and depth sensor. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1861-1868.
- Rehder, J., Nikolic, J., Schneider, T., Hinzmann, T. and Siegwart, R., 2016. Extending kalibr: Calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4304-4311.
- Reid, D., 1979. An algorithm for tracking multiple targets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(6), pp.843-854.
- Ribas Romagós, D., 2008. *Underwater SLAM for Structured Environments Using and Imaging Sonar*. Ph.D. Thesis, Universitat de Girona, Spain.
- Ribas, D., Ridao, P. and Neira, J., 2010. *Underwater SLAM for Structured environments using an Imaging Sonar*, Springer.
- Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., Sanz, P.J. and Oliver, G., 2015. Intervention AUVs: the next challenge. *Annual Reviews in Control*, 40, pp.227-241
- Roman, C. and Singh, H., 2005. Improved vehicle based multibeam bathymetry using sub-maps and SLAM. In: *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3662-3669.
- Rosten, E. and Drummond, T., 2006. Machine learning for high-speed corner detection. In: *European Conference on Computer Vision*, pp. 430-443.
- Roy S. and Cox I. J., 1998. A maximum-ow formulation of the n-camera stereo correspondence problem. *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 492-499.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K. and Bradski, G., 2011. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In: *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 2564-2571.

- Ruderman, D.L., Cronin, T.W. and Chiao, C.C., 1998. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding. *Journal of the Optical Society of America - A*, 15(8), pp.2036-2045.
- Salvi, J., Petillo, Y., Thomas, S. and Aulinas, J., 2008. Visual slam for underwater vehicles using video velocity log and natural landmarks. In: *Proc. OCEANS 2008*.
- Scaramuzza, D. and Fraundorfer, F., 2011. Visual odometry [tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 18(4), pp. 80-92.
- Schechner, Y.Y. and Karpel, N., 2005. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3), pp. 570-587.
- Schettini, R. and Corchs, S., 2010. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010(1), 746052.
- Schonberger, J.L. and Frahm, J.M., 2016. Structure-from-motion revisited. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4104-4113.
- Sedlazeck, A., Koser, K. and Koch, R., 2009. 3D reconstruction based on underwater video from ROV Kiel 6000 considering underwater imaging conditions. In: *Proc. OCEANS 2009-EUROPE*.
- She, M., Song, Y., Mohrmann, J. and Köser, K., 2019. Adjustment and Calibration of Dome Port Camera Systems for Underwater Vision. In: *German Conference on Pattern Recognition*, Springer, pp. 79-92.
- Shortis, M., 2015. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors*, 15(12), pp. 30810-30826.
- Sivčev, S., Rossi, M., Coleman, J., Dooly, G., Omerdić, E. and Toal, D., 2018. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs. *Control Engineering Practice*, 74, pp.153-167.
- Silveira, L., Guth, F., Drews-Jr, P., Ballester, P., Machado, M., Codevilla, F., Duarte-Filho, N. and Botelho, S., 2015. An open-source bio-inspired solution to underwater SLAM. *IFAC-PapersOnLine*, 48(2), pp. 212-217.
- Singh, H., Roman, C., Pizarro, O. and Eustice, R., 2007. Advances in high resolution imaging from underwater vehicles. In: *Robotics Research*, Springer, pp. 430-448.
- Snyder, J., 2010. Doppler Velocity Log (DVL) navigation for observation-class ROVs. In: *Proc. OCEANS 2010 MTS/IEEE - SEATTLE*.
- Steele, J.H., Thorpe, S.A. and Turekian, K.K. (eds.), 2009. *Elements of Physical Oceanography: a Derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press.
- Swainathan, R., Grossberg, M.D. and Nayar, S.K., 2003. A perspective on distortions. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. vol. 2.
- Szeliski, R., 2010. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Szlachetko, B. and Lower, M., 2016. Smart Underwater Positioning System and Simultaneous Communication. In: *International Conference on Computational Collective Intelligence*, Springer, pp. 158-167.

- Telem, G. and Filin, S., 2010. Photogrammetric modeling of underwater environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(5), pp. 433-444.
- Tena, I., Petillot, Y., Lane, D.M. and Salson, C., 2001. Feature extraction and data association for AUV concurrent mapping and localisation. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2785-2790.
- Torres-Méndez, L.A. and Dudek, G., 2005, November. Color correction of underwater images for aquatic robot inspection. In: *Proc. International Workshop on Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*, Springer, pp. 60-73.
- Treibitz, T. and Schechner, Y.Y., 2008. Active polarization descattering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(3), pp. 385-399.
- Treibitz, T., Schechner, Y., Kunz, C. and Singh, H., 2011. Flat refractive geometry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34(1), pp. 51-65.
- Trucco, E. and Olmos-Antillon, A.T., 2006. Self-tuning underwater image restoration. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(2), pp. 511-519.
- Ulrich, I. and Nourbakhsh, I., 2000, April. Appearance-based place recognition for topological localization. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1023-1029.
- VanMiddlesworth, M.M.A., 2014. Toward autonomous underwater mapping in partially structured 3D environments. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Vasilijevic, A., Buxton, B., Sharvit, J., Stilinovic, N., Nad, D., Miskovic, N., Planer, D., Hale, J. and Vukic, Z., 2015. An ASV for coastal underwater archaeology: The Pladypos survey of Caesarea Maritima, Israel. In: *Proc. OCEANS 2015-Genova*.
- Vila, A.P., 2018. 3D Underwater SLAM using Sonar and Laser Sensors, Ph.D. Thesis, Universitat de Girona, Spain.
- Vlachaki F., Agouridis C., Diamanti E., Farazis G., 2017. Towards spatio-temporal 3D visualizations of an underwater archaeological excavation. The case of the Late Bronze Age Shipwreck of Modi. *Under the Mediterranean Conference*, Nicosia, Cyprus.
- Wang, J. and Liu, Z., 2016. Improved FastSLAM based on EnKF proposal distribution for AUV. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology (ICCIA)*. Atlantis Press.
- Wehkamp, M. and Fischer, P., 2014. A practical guide to the use of consumer-level digital still cameras for precise stereogrammetric in situ assessments in aquatic environments. *Underwater Technology*, 32(2), pp. 111-128.
- Wells, W.H., 1973. Theory of small angle scattering. In *Optics of the Sea*, vol. 61.
- Williams, S. and Mahon, I., 2004. Simultaneous localisation and mapping on the great barrier reef. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1771-1776.
- Williams, S.B., Newman, P., Rosenblatt, J., Dissanayake, G. and Durrant-Whyte, H., 2001. Autonomous underwater navigation and control. *Robotica*, 19(5), pp. 481-496.
- Yang, M., Hu, J., Li, C., Rohde, G., Du, Y. and Hu, K., 2019. An in-depth survey of underwater image enhancement and restoration. *IEEE Access*, 7, pp. 123638-123657.

Yau, T., Gong, M. and Yang, Y.H., 2013. Underwater camera calibration using wavelength triangulation. In: *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2499-2506.

Yuan, X., Martínez-Ortega, J.F., Fernández, J.A.S. and Eckert, M., 2017. AEKF-SLAM: a new algorithm for robotic underwater navigation. *Sensors*, 17(5), 1174.

Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), pp. 1330-1334.

Αφιοντζή, Ε. and Πορίτσα, Σ., 2011. Υλοποίηση Landmark Based SLAM με Χρήση Kalman και Particle Filters. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΑΠΘ.

Καλησπεράκης, Η., 2010. Η Επιτολική Γεωμετρία στον Προβολικό και τον Ευκλείδειο Χώρο. Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ/ΕΜΠ.

Κανακάκης, Ε., 2007. Ανάπτυξη Υβριδικής Αρχιτεκτονικής Πλοήγησης Αυτόνομων Υποβρύχιων Οχημάτων με Ασαφή Λογική και Γενετικούς Αλγόριθμους. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Καρκάλου, Έ., 2016. Προγραμματισμός και Αξιολόγηση Μεθόδων Υπο-σύνολης Συνταύτισης Εικόνων (Semi-global matching). Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ/ΕΜΠ.

Κυπαρίσση, Σ.Α., 2011. Συνένωση Νεφών Σημείων από Ομολογίες Εικόνων. Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ/ΕΜΠ.

Μάλλιος Α., 2006, Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος ναυσιπλοΐας για την υποστήριξη υποβρύχιων οχημάτων. Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συμποσίου Ωκεανογραφίας & Αλιείας, σσ.575 - 578.

Μάλλιος, Α., 2016. Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος ναυσιπλοΐας για την υποστήριξη υποβρύχιων οχημάτων.

Μπουρμά, Π.Δ., 2010. Σχεδίαση Αυτόνομου Υποβρύχιου Καταγραφικού Οχήματος Οδηγούμενου με Μεταβολή Πλευστότητας. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ.

Ντόλιας, Μ.Α., 2019. Σχεδιασμός ενός Υποβρύχιου Οχήματος (ROV), για την Εξερεύνηση και Καταγραφή ενός Υποθαλάσσιου Περιβάλλοντος. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Πατιάς, Π., 1991. *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*. Εκδόσεις Ζήτη.

Σκούρας, Η., 2018. Τεχνολογίες Εντοπισμού Θέσης σε Εσωτερικούς και Εξωτερικούς Χώρους με απουσία GNSS και Εφαρμογές τους. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά.

## Ιστότοποι

[www.behance.net](http://www.behance.net)

[www.comex.fr](http://www.comex.fr)

[www.evologics.de](http://www.evologics.de)

[www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)

[www.nortekgroup.com](http://www.nortekgroup.com)

[www.oceaneering.com](http://www.oceaneering.com)



[www.groplan.eu](http://www.groplan.eu)

[www.hcmr.gr](http://www.hcmr.gr)

[www.ienae.gr](http://www.ienae.gr)

[www.kongsberg.com](http://www.kongsberg.com)

[www.korseai.com](http://www.korseai.com)

[www.lab4dive.gr](http://www.lab4dive.gr)

[www.marinetechologynews.com](http://www.marinetechologynews.com)

[www.ozean-der-zukunft.de](http://www.ozean-der-zukunft.de)

[www.qps.nl/qinsy](http://www.qps.nl/qinsy)

[www.rovexchange.com](http://www.rovexchange.com)

[www.ufr-team.com](http://www.ufr-team.com)

[www.unmannedsystemstechnology.com](http://www.unmannedsystemstechnology.com)

[www.vrt.fi](http://www.vrt.fi)

[www.whoi.edu](http://www.whoi.edu)

“It’s not down on any map; true places never are” once  
Herman Melville stated and that’s how all theories on  
mapping the underwater world collapsed in a single moment.

