



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

**Δ.Π.Μ.Σ. ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ,
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη και έλεγχος συστήματος κατευθυντικής κεραίας σε
ωκεανογραφικούς πλωτήρες μέτρησης δεδομένων**

Πέττας Διονύσιος Εμμανουήλ

Επιβλέπων: Δρ.Φασουλάς Ιωάννης

Ηράκλειο 2017



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ,
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Ανάπτυξη και έλεγχος συστήματος κατευθυντικής κεραίας σε
ωκεανογραφικούς πλωτήρες μέτρησης δεδομένων

Πέττας Διονύσιος Εμμανουήλ

A.M. 39

Επιβλέπων καθηγητής
Δρ. Φασουλάς Ιωάννης

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στις 15/11/2017

Εξεταστική Επιτροπή:

1. Φασουλάς Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης.....
(Υπογραφή)
2. Καββουσάνος Εμμανουήλ, Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης.....
(Υπογραφή)
3. Σφακιωτάκης Μιχαήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης.....
(Υπογραφή)

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν για την περάτωση της.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Φασουλά Ιωάννη για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου, την πολύτιμη βοήθεια του στην μαθηματική επίλυση του προβλήματος της στόχευσης και για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Κυρίως όμως για την υπομονή του, τις συμβουλές του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε δύσκολες στιγμές που παρουσιάστηκαν στην πορεία προς την ολοκλήρωσή της.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ερευνητή Α του ΕΛΚΕΘΕ Πετυχάκη Γεώργιο, ο οποίος χρηματοδότησε αυτήν την εργασία, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου στηρίζοντας με όλα αυτά τα χρόνια δείχνοντας κατανόηση και υπομονή σε όλες τις δύσκολες στιγμές.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σφακιωτάκη Μιχαήλ για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου, για τις καίριες παρατηρήσεις του, για τις πολύτιμες συμβουλές του καθώς και για την συνάρτηση αποστολής float αριθμών.

Στη συνέχεια από το ΕΛΚΕΘΕ θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Φραγκούλη Κωνσταντίνο, Ντούμα Εμμανουήλ, Μπάλλα Διονύσιο, Ποτήρη Εμμανουήλ, Πιπεράκη Γεώργιο καθώς και τον Professor Imants G. Priede για τις συζητήσεις, την βοήθεια, τις πληροφορίες και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Επιπλέον ευχαριστώ τον Δρ. Καλαμπόκη Αλκιβιάδη για την πολύτιμη βοήθεια του σε θέματα προγραμματισμού όπως το decoding των float αριθμών, την αντιστάθμιση κλίσης της παλιάς IMU και την ανάγνωση του GPS. Ευχαριστώ επίσης τους Ανδρουλάκη Δημήτριο και Μιχελινάκη Σπυρίδων για την βοήθεια τους στις εξωτερικές δοκιμές και στη λήψη βίντεο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την γυναίκα μου, την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υπομονή και την στήριξη τους καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Στο τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χριστοδούλου Κωσταντίνο αφενός γιατί ήταν ο εμπνευστής αυτής της ιδέας και αφετέρου γιατί με βοήθησε στα πρώτα μου βήματα αλλά και σε όλες τις δύσκολες στιγμές που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια υλοποίησης αυτής της εργασίας. Θα ήθελα λοιπόν να δώσω το όνομα C.O.S.T.A.S (Coastal Observatories with Stabilized Tracking Antenna System) στο πρωτότυπο σύστημα στόχευσης, προς τιμήν του καθώς από αυτόν ξεκίνησαν όλα.

Περίληψη

Λόγω της ταχείας τεχνολογικής ανάπτυξης, μια μεγάλη ποικιλία υφιστάμενων και νέων αισθητήρων μπορεί ενδεχομένως να φιλοξενηθεί σε έναν ωκεανογραφικό πλωτήρα. Για να αντιμετωπιστεί η εγκατάσταση πολλών αισθητήρων και η απόκτηση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αυξήθηκε η ανάγκη για μία νέα γενιά πλωτήρων με συνδέσεις μεγάλου εύρους ζώνης. Σε παράκτια παρατηρητήρια, που έχουν οπτική επαφή με τη ξηρά (LOS), όπως ο σταθμός POSEIDON HCB, μια κατευθυντική κεραία μεγάλης εμβέλειας μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, μειώνοντας παράλληλα το κόστος σε σύγκριση με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται η ανάπτυξη και ο έλεγχος ενός πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος σταθεροποίησης το οποίο μπορεί ενδεχομένως να φιλοξενηθεί σε έναν αγκυροβολημένο πλωτήρα. Το σύστημα αποτελείται από έναν μηχανισμό τριών περιστροφικών αρθρώσεων που σχηματίζουν μια κινηματική διάταξη ενός σφαιρικού καρπού ενώ μια κατευθυντική κεραία χρησιμοποιείται στο άκρο του. Με βάση την κινηματική ανάλυση, το σύστημα επιλύει το πρόβλημα της στόχευσης και σταθεροποίησης της κεραίας, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων, για την ευθυγράμμιση της κατευθυντικής κεραίας που είναι τοποθετημένη πάνω στον πλωτήρα με την κεραία που βρίσκεται στο χερσαίο σταθμό.

Ο μηχανολογικός σχεδιασμός και η συναρμολόγηση του πρωτοτύπου παρουσιάζονται λεπτομερώς μαζί με την αρχιτεκτονική έλεγχο, η οποία βασίζεται στο αντίστροφο κινηματικό μοντέλο του συστήματος και στους βρόχους ανάδρασης που περιλαμβάνει δεδομένα από μια αδρανειακή μονάδα (IMU) και ένα σύστημα εντοπισμού παγκόσμιας θέσης (GPS). Κάθε άρθρωση οδηγείται από ένα βηματικό κινητήρα, ενώ ο αλγόριθμος ελέγχου αντισταθμίζει τις επιδράσεις εξωτερικών διαταραχών που περιλαμβάνουν την παγκόσμια θέση του πλωτήρα, τον κυματισμό, δυνάμεις πλεύσης και ροπές κτλ. Τέλος, δίνονται πειραματικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση της πρακτικότητας και της αποτελεσματικότητας του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος σταθεροποίησης.

Abstract

Due to the rapid technological development, a large variety of existing and new sensors can potentially be hosted in an oceanographic buoy. To cope with the installation of many sensors and the acquisition of large amount of real-time data, the need for a new generation of buoys with high bandwidth connections has increased. In coastal observatories, with land-based contact (LOS), such as the POSEIDON HCB station, a long range directional antenna could offer higher data transfer speed, while reducing the cost as compared to mobile network.

In this work, we present the development and control of a prototype robotic stabilization system which can potentially be hosted in a moored buoy. The system consists of a three joint mechanism forming a kinematic configuration of a spherical manipulator while a directional antenna is used as its end effector. Based on kinematic analysis, the system solves the antenna's pointing and stabilization problem, during data transmission, for a particular alignment of a directional transmitter antenna placed on the buoy along with a land station receiver.

The mechanical design and assembly of the prototype are also presented in detail along with the control architecture which is based on the inverse kinematic model of the system and feedback loops that includes data from an Inertial Measurement Unit (IMU) and a Global Positioning System (GPS) sensor. Each joint is driven by a stepper motor while the control algorithm counteracts effects of external disturbances which include the global position of the buoy, sea waves, buoyant forces and moments e.t.c. Finally, experimental results are given to evaluate the practicability and effectiveness of the prototype robotic stabilization system.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Εισαγωγή.....	8
1.1	Βιβλιογραφική έρευνα.....	12
1.2	Στόχος – Συνεισφορά	14
1.3	Διάρθρωση της εργασίας	16
2.	Θεωρία κεραιών	17
2.1	Μετάδοση σήματος μεταξύ δύο σημείων (P2P)	19
2.2	Τοποθέτηση σταθερής κεραιάς	22
3.	Σχεδίαση και υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος στόχευσης	24
3.1	Απαιτήσεις και προδιαγραφές του ρομποτικού συστήματος στόχευσης	24
3.2	Αρχιτεκτονική ρομποτικού συστήματος στόχευσης.....	26
3.3	Μηχανολογική σχεδίαση ρομποτικού συστήματος στόχευσης.....	28
3.4	Τα μέρη του ρομποτικού συστήματος στόχευσης	33
3.4.1	Ελεγκτές	35
3.4.2	Επενεργητές	36
3.4.2.1	Βηματικοί κινητήρες	36
3.4.2.2	Οδηγοί βηματικών κινητήρων.....	39
3.4.3	Αισθητήρες.....	43
3.4.3.1	Αδρανειακή μονάδα (IMU)	44
3.4.3.2	Συσκευή εντοπισμού παγκόσμιας θέσης (GPS)	46
3.4.3.3	Διακόπτης – Αισθητήρας εγγύτητας (Proximity Switch or Sensor)	50
3.4.4	Δακτύλιοι ολίσθησης (Slip rings)	51
3.4.5	Επιλογή κεραιάς	54
3.4.6	Εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης.....	58
3.5	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικών συστημάτων	59
4.	Κινηματική ανάλυση - προσομοίωση.....	60
4.1	Ευθύ κινηματικό πρόβλημα	61
4.2	Υπολογισμός επιθυμητού πίνακα στροφής.....	66
4.3	Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα.....	70
4.4	Σφάλματα στόχευσης.....	72
4.4.1	Σφάλμα ευθυγράμμισης λόγω σταθερής κεραιάς.....	72
4.4.2	Ελάχιστο σφάλμα στόχευσης λόγω βήματος κινητήρα	73
4.5	Προσομοίωση κινηματικής ανάλυσης	74

5.	Προγραμματισμός ελεγκτών.....	79
5.1	Πρωτεύων ελεγκτής (Master)	80
5.1.1	Υπολογισμός απόστασης μεταξύ δύο σημείων	83
5.1.2	Βαθμονόμηση IMU	86
5.1.3	Αλγόριθμος αναγνώρισης νότου – πολλαπλών περιστροφών	90
5.2	Δευτερεύων ελεγκτής (Slave)	92
5.3	Διάγραμμα ροής πρωτεύων ελεγκτή	94
5.4	Διάγραμμα ροής δευτερεύων ελεγκτή.....	98
6.	Πειραματικά αποτελέσματα και αξιολόγηση συστήματος στόχευσης.....	100
6.1	Έλεγχος αδρανειακής μονάδας (IMU).....	101
6.1.1	Έλεγχος ορθής βαθμονόμησης.....	102
6.1.2	Διατήρηση προσανατολισμού και στις 360°	105
6.1.3	Αντιστάθμιση κλίσης πυξίδας (Compass Tilt Compensate).....	109
6.1.4	Παρεκτροπή πυξίδας (Compass drift)	110
6.1.5	Επιρροή της πυξίδας σε μεταβολή μαγνητικού πεδίου	111
6.1.6	Έλεγχος ακρίβειας στις κλίσεις (roll, pitch)	115
6.1.7	Απόδοση φίλτρου.....	116
6.2	Έλεγχος της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος	117
6.3	Έλεγχος αζιμουθιακής στόχευσης και απόστασης.....	119
6.4	Έλεγχος υψομετρικής στόχευσης.....	122
6.5	Έλεγχος διατήρησης στόχευσης.....	122
6.6	Έλεγχος αλγόριθμου Νότου - πολλαπλών περιστροφών.....	124
6.7	Έλεγχος ανανέωσης της θέσης.....	126
6.8	Έλεγχος επίδρασης της μεταβλητής link.....	127
6.9	Δοκιμή σε εξωτερικό περιβάλλον	128
7.	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη	134
8.	Βιβλιογραφία.....	136

Κεφάλαιο

1

Στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ωκεανογραφικοί πλωτήρες, η λειτουργία τους και τα μειονεκτήματα του τρόπου μετάδοσης των δεδομένων. Προτείνεται η P2P Wi-Fi διασύνδεση του σταθμού και παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε για υπάρχοντα - παρόμοια συστήματα. Έπειτα αναφέρεται ο στόχος και τα σκέλη της συγκεκριμένης εργασίας και δίδονται οι αρχικές προδιαγραφές του συστήματος. Ακολουθεί η συνεισφορά που αναμένεται από αυτή την εργασία ενώ στο τέλος αναφέρεται η διάρθρωση της εργασίας.

1. Εισαγωγή

Το ποσοστό του θαλάσσιου περιβάλλοντος που έχει μελετηθεί είναι πολύ μικρό. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη βαρύτητα σε αυτόν τον τομέα. Έτσι έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα παρακολούθησης (Εικόνα 1-1) [1], τα οποία μπορούν να διαχωριστούν σε υποβρύχια (αυτόνομα και επανδρωμένα οχήματα, πλατφόρμες βυθού), επιφανείας (αγκυροβολημένα, παρασυρόμενα, εγκατεστημένα σε πλοία, επίγεια ραντάρ) και εναέρια (μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, δορυφόροι).

Στα συστήματα επιφανείας ανήκουν και οι αγκυροβολημένοι πλωτοί σταθμοί ή πλωτά παρατηρητήρια. Οι πλωτοί σταθμοί αγκυροβολημένοι σε καθορισμένες συντεταγμένες καταγράφουν συνεχώς παραμέτρους, σε διάφορα βάθη της θαλάσσιας

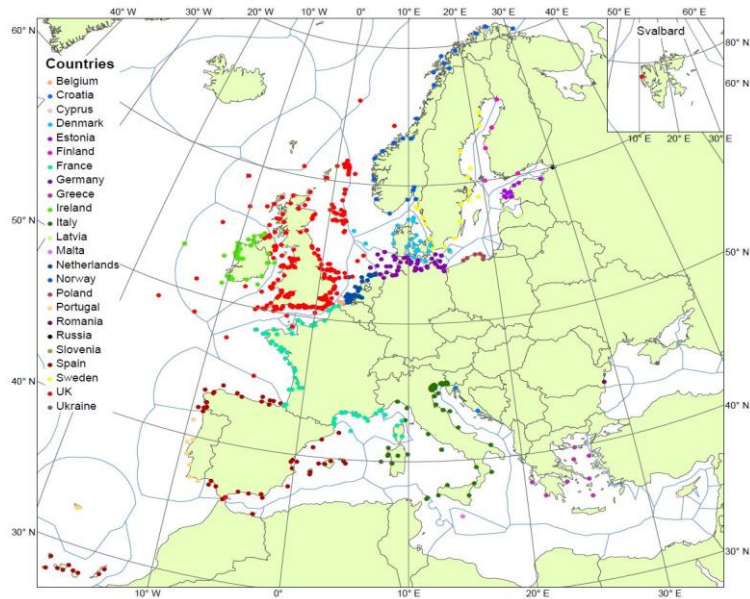
στήλης, στέλνοντας τα δεδομένα στο σταθμό βάσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το είδος και η ποσότητα των δεδομένων που στέλνονται στο σταθμό βάσης, καθώς και η συχνότητα μετάδοσης περιορίζεται κυρίως από την τεχνολογία μετάδοσης και το κόστος χρήσης της.



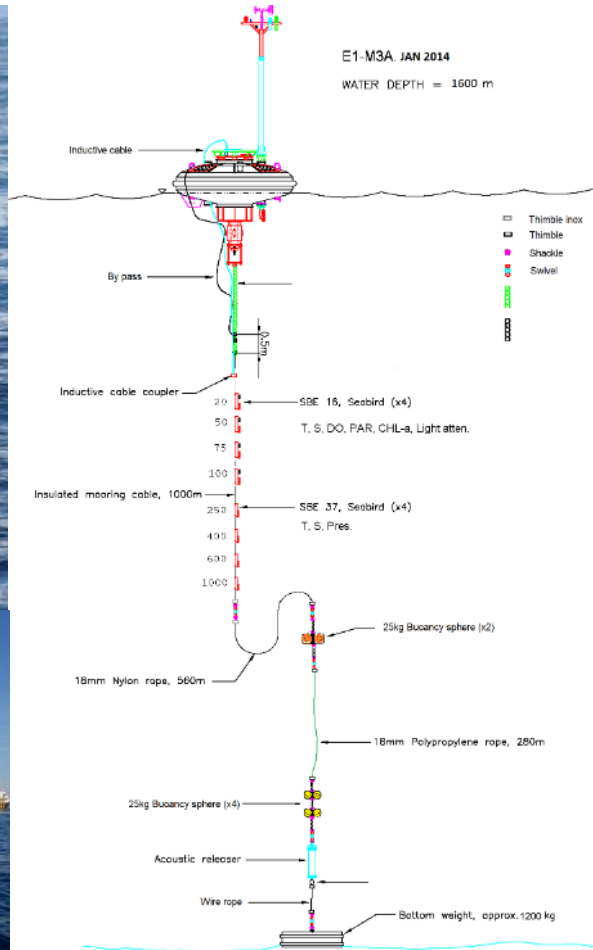
Εικόνα 1-1. Συστήματα παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος [1].

Τα ολοκληρωμένα συστήματα θαλάσσιων παρατηρητήριων (OOS – Ocean Observing System) [2], όπως το δίκτυο ΠΟΣΕΙΔΩΝ [3] του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε [4], αποτελούν σήμερα ένα από τα πιο πολύτιμα εργαλεία της επιχειρησιακής ωκεανογραφίας (Εικόνα 1-2). Η συνεχής συλλογή δεδομένων, μέσω συστημάτων διαφορετικών τεχνολογιών, έχει συμβάλει σημαντικά στην εξέλιξη των επιστημών της θάλασσας. Επιπλέον έχει βελτιώσει σημαντικά τις δυνατότητες πρόγνωσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος συμβάλλοντας στην ανάπτυξη οικονομικών δραστηριοτήτων, την πρόληψη καταστροφικών περιστατικών και τη διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής.

Οι πλωτοί σταθμοί μέτρησης που διαθέτει το δίκτυο ΠΟΣΕΙΔΩΝ είναι δύο τύπων: ανοιχτής θαλάσσης και παράκτιοι (Εικόνα 1-3). Οι σταθμοί αυτοί φέρουν όργανα και αισθητήρες που μετρούν και καταγράφουν μετεωρολογικές, χημικές, βιολογικές και άλλες παραμέτρους. Οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες, εκτός από την επιφάνεια και κατά μήκος του αγκυροβολίου, όπου επαγωγικά μεταφέρουν τις μετρήσεις τους στον πλωτήρα κι αυτός με την σειρά του στον επίγειο σταθμό βάσης.



Εικόνα 1-2. Συστήματα παράκτιων σταθμών στις Ευρωπαϊκές θάλασσες.



Εικόνα 1-3. Τύποι πλωτών παρατηρητήριων. Πάνω: Παράκτιο. Κάτω: Ανοιχτής θάλασσας, Δεξιά: Αγκυροβόλιο.

Η αποστολή των δεδομένων γίνεται με modem δικτύου κινητής τηλεφωνίας, όσον αφορά τους παράκτιους σταθμούς και δορυφορικά με ομοιοκατευθυντική κεραία (omnidirectional antenna) όσον αφορά τους σταθμούς ανοιχτής θάλασσας. Η μεταφορά δεδομένων με modem κινητής τηλεφωνίας έχει περιορισμό στην εμβέλεια αλλά και στη σχέση όγκου-ταχύτητας δεδομένων, ως προς το κόστος. Το κόστος αυτό γίνεται ακόμη μεγαλύτερο στις δορυφορικές συνδέσεις.

Σε περιπτώσεις παράκτιων πλωτών σταθμών θα μπορούσε να επιτευχθεί σύνδεση Wi-Fi του πλωτού σταθμού με το σταθμό βάσης με χρήση κατευθυντικής κεραίας, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος μεταφοράς δεδομένων στο ελάχιστο (Πίνακας 1-1). Κατευθυντική κεραία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πλωτούς σταθμούς (μέχρι 8 μίλια από τις ακτές) παρέχοντας σύνδεση Wi-Fi, έτσι ώστε να γίνει δυνατή η αποστολή μεγάλου όγκου δεδομένων με μεγάλες ταχύτητες και χωρίς ουσιαστικά κόστος χρήσης, αφού μεταφέρεται η επίγεια υπάρχουσα σύνδεση διαδικτύου στο πλωτό σταθμό. Οι Wi-Fi ζεύξεις μπορούν να είναι ιδανικές για μεταφορά εικόνων σε πραγματικό χρόνο, κάτι πολύ σημαντικό για την θαλάσσια βιολογία.

Πίνακας 1-1. Τύποι συνδέσεων για αποστολή των δεδομένων.

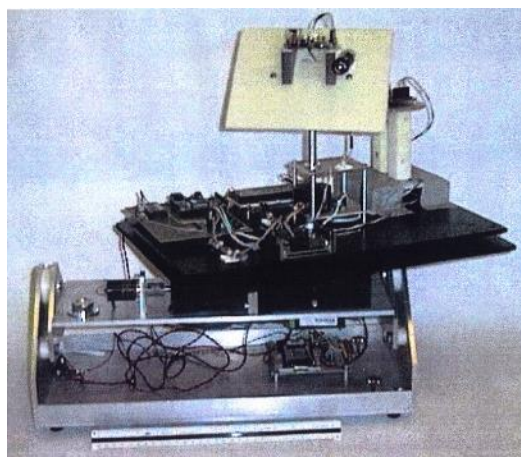
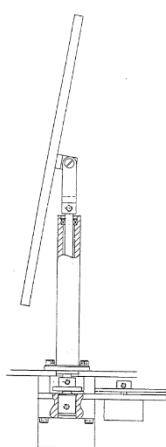
Τύπος σύνδεσης	Κόστος χρήσης	Εμβέλεια	Όγκος δεδομένων
Δορυφορική σύνδεση	Μεγάλο	Απεριόριστη	Αρκετά μικρός λόγω κόστους. Μόνο τα απολύτως απαραίτητα.
Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας	Μεσαίο	Περιορισμένη	Περιορισμένος λόγω ογκοχρέωσης.
Σταθερή μέσω κατευθυντικής κεραίας	Αμελητέο	Περιορισμένη	Απεριόριστος. Θεωρητικά Online video 24h.

Η επιτυχία μίας Wi-Fi σύνδεσης με κατευθυντική κεραία θα μπορούσε να αυξήσει αρκετά την συχνότητα αποστολής και τον όγκο των δεδομένων, με αμελητέο κόστος.

1.1 Βιβλιογραφική έρευνα

Κάνοντας μία βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με γυροσκοπικές σταθεροποιημένες πλατφόρμες βρέθηκε πληθώρα από αυτές να χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Δεν βρέθηκε όμως καμία σταθεροποιημένη πλατφόρμα για χρήση κατευθυντικής κεραίας Wi-Fi που να είναι δυνατό να τοποθετηθεί πάνω σε παράκτιο πλωτό παρατηρητήριο. Παρόλα αυτά βρέθηκαν αρκετές σταθεροποιημένες πλατφόρμες που φέρουν κατευθυντικές κεραίες για σύνδεση με δορυφόρο. Τα δύο συστήματα (δορυφορική και Wi-Fi) μεταξύ τους έχουν αρκετά κοινά στοιχεία αλλά ταυτόχρονα έχουν και ουσιώδεις διαφορές. Οι διαφορές εντοπίζονται στη γεωμετρία της πλατφόρμας καθώς οι γωνίες στόχευσης είναι τελείως διαφορετικές. Επίσης υπάρχει σημαντική διαφορά στο είδος και το μέγεθος της κεραίας που φέρουν.

Η πιο συγγενής με την παρούσα εργασία δημοσίευση που βρέθηκε, ήταν μία τεχνική αναφορά από το Woods Hole Oceanographic Institution [5] η οποία επικεντρωνόταν στην επίτευξη δορυφορικής σύνδεσης πλωτών σταθμών ανοιχτής θαλάσσης, χρησιμοποιώντας κατευθυντική κεραία τοποθετημένη πάνω σε μία περιστρεφόμενη, από βηματικό κινητήρα, βάση (Εικόνα 1-4). Η επιλογή της κεραίας είχε γίνει έτσι ώστε, να έχει μεγαλύτερη γωνία εκπομπής – λήψης από τις κλίσεις του σταθμού λόγω του κυματικού δυναμικού και με αυτόν τον τρόπο δεν απαιτούνταν δεύτερη κινούμενη άρθρωση.



Εικόνα 1-4. Directional Antenna for Ocean Buoys (WHOI, 1997).

Μία άλλη σχετική εφαρμογή που βρέθηκε είναι μία σταθεροποιημένη πλατφόρμα με δορυφορική κεραία για στρατιωτική χρήση που χρησιμοποιείται σε οχήματα και άρματα

μάχης. Πιο διαδεδομένες είναι οι σταθεροποιημένες πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται για την δορυφορική σύνδεση κυρίως των πλοίων (με αρκετές κατασκευάστριες εταιρίες όπως η iMAR, iXblue, Sea Tel κ.ά.) [6], [7]. Οι παραπάνω μηχανισμοί φαίνονται στις πέντε πρώτες φωτογραφίες της Εικόνα 1-5. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί, λόγω της χρήσης τους πάνω σε πλοία, δεν υπόκεινται σε περιορισμούς όπως το μέγεθος και η ενεργειακή κατανάλωση. Επίσης έχουν σημαντικό βάρος καθώς σχεδιάζονται για μεγάλο ωφέλιμο φορτίο (payload) και μεγάλες διαστάσεις κεραίας.



Εικόνα 1-5. Σταθεροποιημένες πλατφόρμες διαφόρων χρήσεων.

Στα πλοία χρησιμοποιούνται σταθεροποιημένες πλατφόρμες 3DOF που φέρουν το δορυφορικό δέκτη. Στη στεριά τα αντίστοιχα συστήματα χρησιμοποιούν 2DOF επειδή ο κατακόρυφος άξονας Z που καθορίζει την πόλωση της κεραίας, παραμένει σταθερός, σε αντίθεση με τον άξονα Z ενός σώματος που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας.

Σε κάποια στρατιωτικά πλοία χρησιμοποιείται σταθεροποιημένη πλατφόρμα 4DOF (PRRR). Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα μετατόπισης της κεραίας κατά τον εγκάρσιο άξονα του πλοίου. Σε ένα στρατιωτικό πλοίο δεν μπορεί να είναι εκτεθειμένος ένας

τέτοιος μηχανισμός γι' αυτό δεν τοποθετείτε πάντα στο ψηλότερο σημείο. Έτσι όμως σε κάποιες καταστάσεις - προσανατολισμούς μπορεί να δημιουργηθεί κάποια σκίαση με αποτέλεσμα να χαθεί η σύνδεση. Αυτός είναι κι ο λόγος ύπαρξης της 4^{ης} άρθρωσης.

Περισσότερο διαδεδομένες και με πολλές διαφορετικές χρήσεις είναι οι σταθεροποιημένες πλατφόρμες που φέρουν κάμερα (Εικόνα 1-5). Ενδεικτικά αναφέρονται: για χρήση σε drones, για χρήση σε οχήματα εδάφους, για κινηματογράφηση, για κάμερες ασφαλείας, εργαστηριακές κ.ά.

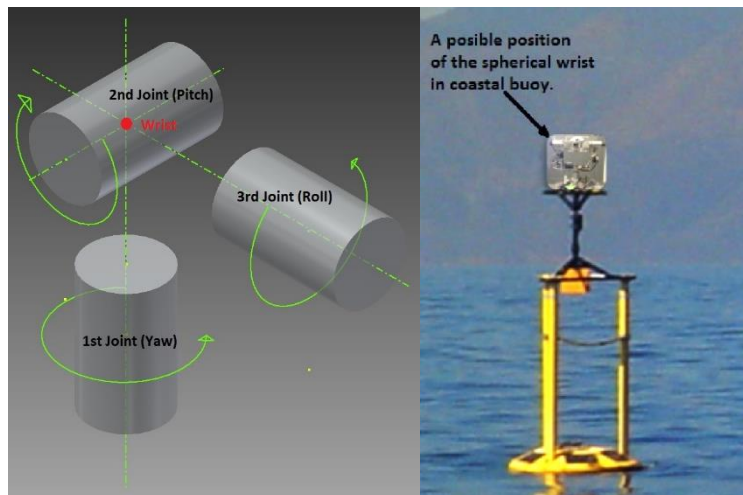
1.2 Στόχος – Συνεισφορά

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη και ο έλεγχος ενός πρωτότυπου αυτόνομου συστήματος με κατευθυντική κεραία Wi-Fi, για χρήση σε παράκτιους αγκυροβολημένους πλωτούς ωκεανογραφικούς μετρητικούς σταθμούς.

Συγκεκριμένα, αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση, η κατασκευή και ο έλεγχος ενός σφαιρικού καρπού, ο οποίος θα φέρει πάνω του την κατευθυντική κεραία Wi-Fi. Ο σφαιρικός καρπός αποτελείται από τρεις αρθρώσεις των οποίων οι άξονες τέμνονται σε ένα σημείο, το σημείο του καρπού «Wrist» (Εικόνα 1-6, αριστερά). Η κατευθυντική κεραία θα τοποθετηθεί πάνω σε αγκυροβολημένο πλωτό ωκεανογραφικό μετρητικό σταθμό (Εικόνα 1-6, δεξιά) και θα πρέπει να διατηρεί τον προσανατολισμό της, προς την σταθερή κεραία στην ξηρά, ελέγχοντας την κίνηση των αρθρώσεων του σφαιρικού καρπού ανάλογα με την κίνηση του σταθμού λόγω της επίδρασης του κυματικού δυναμικού.

Το πρωτότυπο που θα κατασκευαστεί θα χρησιμοποιεί κατάλληλα αισθητήρια και μικροελεγκτές για την οδήγηση των απαραίτητων επενεργητών. Έπειτα θα αξιολογηθεί σε εργαστηριακή κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αφορά την επίλυση της κινηματικής ανάλυσης καθώς και τη σχεδίαση και κατασκευή του μηχανικού και ηλεκτρικού μέρους του ρομποτικού συστήματος στόχευσης. Το δεύτερο σκέλος της εργασίας αφορά τον προγραμματισμό και τη μελέτη – ανάπτυξη των αλγορίθμων για την επίτευξη της ορθής στόχευσης και τη διατήρηση της καθώς και τις πειραματικές δοκιμές.



Εικόνα 1-6. Αριστερά: Οι τρεις αρθρώσεις του σφαιρικού καρπού. Δεξιά: Η θέση του μηχανισμού πάνω στον πλωτό σταθμό.

Οι αλγόριθμοι που θα αναπτυχθούν θα εφαρμοστούν στους μικροελεγκτές, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η εργαστηριακή δοκιμή όλου του συστήματος και η μελλοντική βελτιστοποίηση του.

Η επιτυχία Wi-Fi σύνδεσης του πλωτού σταθμού με το σταθμό βάσης, αναμένεται να ελαττώσει τους σημερινούς περιορισμούς μεταφοράς δεδομένων που αντιμετωπίζουν οι επιστήμονες των διάφορων χωρών που χρησιμοποιούν πλωτά παρατηρητήρια. Επίσης, δίδονται νέες δυνατότητες παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος όπως καταγραφή και αποστολή εικόνων ή/και βίντεο.

Η επιτυχής εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος σε πλωτό παρατηρητήριο θα αποτελούσε κάτι πρωτοποριακό για τα σημερινά δεδομένα στην ωκεανογραφία.

Επίσης με την ολοκλήρωση της εργασίας επιτυγχάνεται η απόκτηση τεχνογνωσίας πάνω σε σταθεροποιημένες πλατφόρμες. Έτσι θα είναι δυνατό με ελάχιστες μετατροπές το σύστημα αυτό να χρησιμοποιηθεί και για άλλες εφαρμογές όπως για παράδειγμα την τοποθέτηση μίας κάμερας ή κάποιου αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας.

Μελλοντικά, και αφού δημιουργηθεί ένα πυκνότερο δίκτυο πλωτών παρατηρητηρίων θα ήταν δυνατή η μεταξύ τους διασύνδεση με κατευθυντικές κεραιές. Με τη χρήση ενδιάμεσων πλωτών σταθμών, θα μπορούσε η σύνδεση Wi-Fi να φτάσει στην ανοιχτή θάλασσα όπου σήμερα χρησιμοποιούνται, σχεδόν αποκλειστικά, ακριβές δορυφορικές συνδέσεις.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι ιδιότητες των κεραιών και περιγράφεται ο τρόπος μετάδοσης του σήματος για επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων (P2P) καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τέτοιου τύπου συνδέσεων. Επίσης, αναφέρονται οι αιτίες που μπορεί να μειώσουν την ένταση του σήματος άρα και την εμβέλεια του και δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης εξυπηρέτησης μίας κατευθυντικής κεραιάς, ανάλογα με το ύψος τοποθέτησης της.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η σχεδίαση και η υλοποίηση του σφαιρικού καρπού. Αρχικά προσδιορίζονται οι απαιτήσεις και η αρχιτεκτονική του συστήματος. Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη μηχανολογική σχεδίαση του. Έπειτα γίνεται μία αναλυτική περιγραφή με τα μέρη που απαρτίζουν το σύστημα όπως η κεραία, οι βηματικοί κινητήρες, η αδρανειακή μονάδα (IMU) κ.ά. ενώ στο τέλος, δίδεται το σχηματικό διάγραμμα των ηλεκτρικών συστημάτων.

Η κινηματική ανάλυση και η προσομοίωση του συστήματος αναλύεται στο τέταρτο κεφάλαιο. Αρχικά επιλύεται το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, υπολογίζεται ο επιθυμητός πίνακας στροφής και επιλύεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Αναφέρονται τα σφάλματα στόχευσης και στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος της κινηματικής ανάλυσης με την βοήθεια του Matlab και τη δημιουργία κατάλληλου προγράμματος.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στον προγραμματισμό των ελεγκτών. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν, η βαθμονόμηση της IMU και τα διαγράμματα ροής των ελεγκτών του συστήματος.

Στο έκτο κεφάλαιο δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται η αξιολόγηση του συστήματος. Αρχικά γίνεται έλεγχος της αδρανειακής μονάδας (IMU) και στη συνέχεια ελέγχεται η σκόπευση και η ικανότητα διατήρησης της. Ακολουθεί ο έλεγχος σωστής λειτουργίας των αλγορίθμων και η εξωτερική δοκιμή του όλου συστήματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις και αναβαθμίσεις του όλου συστήματος.

Κεφάλαιο

2

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι ιδιότητες των κεραιών και περιγράφεται ο τρόπος μετάδοσης του σήματος για επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων (P2P) καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τέτοιου τύπου συνδέσεων. Επίσης, αναφέρονται οι αιτίες που μπορεί να μειώσουν την ένταση του σήματος άρα και την εμβέλεια του και δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης εξυπηρέτησης μίας κατευθυντικής κεραίας, ανάλογα με το ύψος τοποθέτησης της. Τέλος, προτείνεται το σημείο τοποθέτησης της σταθερής κεραίας στην ξηρά για την P2P σύνδεση του σταθερού παρατηρητηρίου HCB του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

2. Θεωρία κεραιών

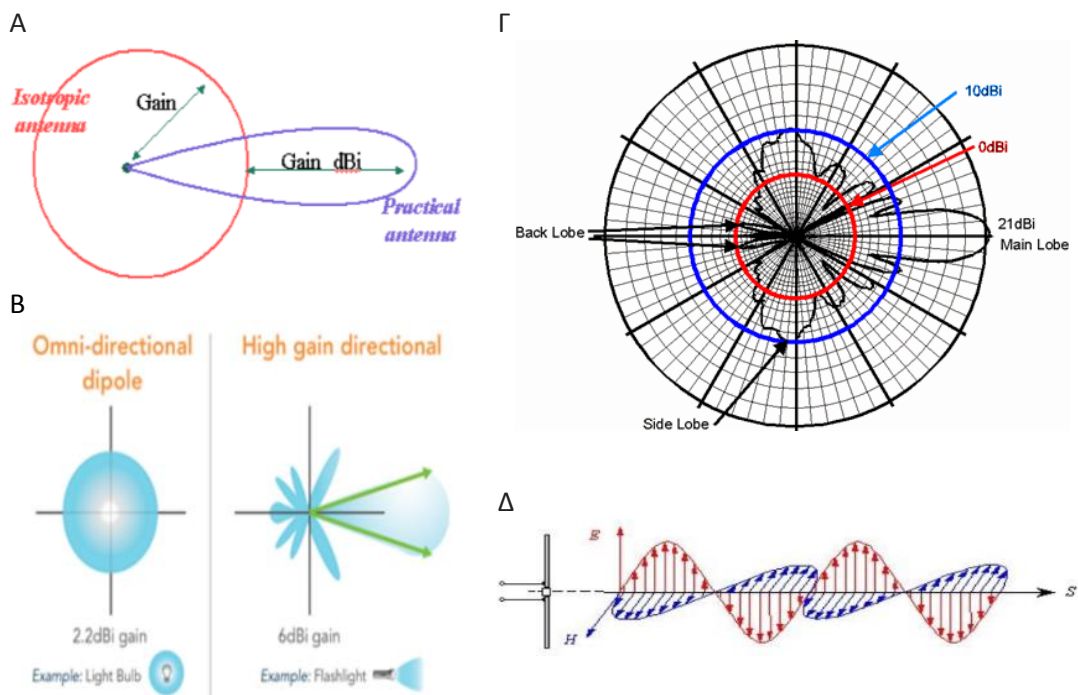
Μία κεραία έχει τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες οι οποίες είναι το κέρδος, η κατευθυντικότητα και η πόλωση.

Το κέρδος (Gain) είναι ο λόγος της ισχύος που μια κεραία παράγει, ως προς την ισχύ που παράγει μία ισοτροπική κεραία, αν η εισερχόμενη ισχύς είναι ίδια. Ισοτροπική είναι μία θεωρητική κεραία, η οποία εκπέμπει ακριβώς την ίδια ισχύ προς όλες τις κατευθύνσεις. Το κέρδος ορίζεται για συγκεκριμένη κατεύθυνση και μετριέται συνήθως σε dBi.

Η κατευθυντικότητα ορίζει το σχήμα του διαγράμματος ακτινοβολίας (Εικόνα 2-1, σχήμα Γ). Διακρίνονται δύο είδη κεραιών ως προς την κατευθυντικότητα οι οποίες είναι οι

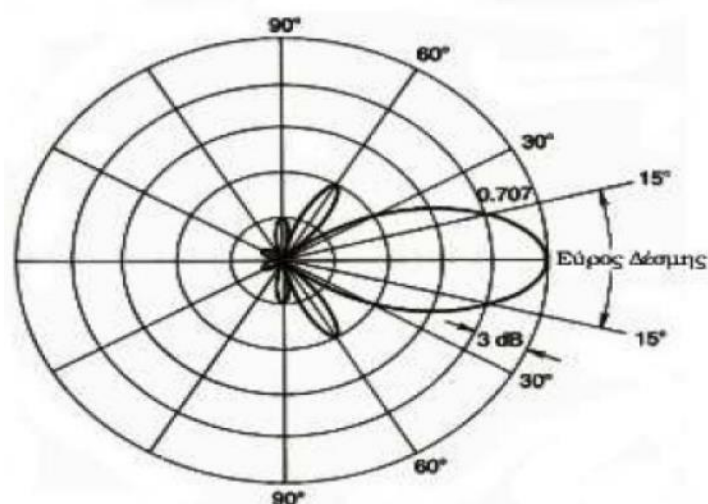
ομοιοκατευθυντικές (omnidirectional antenna) και οι κατευθυντικές κεραίες (directional antenna). Οι ομοιοκατευθυντικές σχεδιάζονται για να παρέχουν ένα διάγραμμα ακτινοβολίας 360° στο οριζόντιο επίπεδο και χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται κάλυψη σε όλες τις κατευθύνσεις. Η αύξηση του κέρδους σε μία ομοιοκατευθυντική κεραία θα οδηγήσει σε απώλεια κάλυψης σε ορισμένες περιοχές. Από την άλλη οι κατευθυντικές κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν μεγαλύτερες αποστάσεις σε ορισμένες κατευθύνσεις απομονώνοντας το ωφέλιμο σήμα από άλλα σήματα. Δεδομένου ότι το κέρδος μιας κατευθυντικής κεραίας αυξάνεται, η ολική περιοχή κάλυψης μειώνεται. Οπότε χρησιμοποιώντας κατευθυντική κεραία αυξάνεται η απόσταση κάλυψης αλλά μειώνεται η ολική περιοχή κάλυψης (Εικόνα 2-1, σχήματα Α και Β).

Η πόλωση (polarization) μίας κεραίας καθορίζεται από τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου (E-plane) των ραδιοκυμάτων (RF signal) σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια της γης, αναφέρεται ως κάθετα πολωμένη. Εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο, υπάρχει και το μαγνητικό πεδίο (H-plane) το οποίο είναι πάντα κάθετο στο ηλεκτρικό πεδίο (Εικόνα 2-1, σχήμα Δ). Στην περίπτωση χρήσης κατευθυντικής κεραίας στη θάλασσα είναι απαραίτητη η χρήση τρίτης άρθρωσης ώστε να διατηρείται η σωστή πόλωση της κεραίας.



Εικόνα 2-1. Α και Β: Σύγκριση κατευθυντικής και ομοιοκατευθυντικής κεραίας [8], [9]. Γ: Διάγραμμα ακτινοβολίας κατευθυντικής κεραίας [10]. Δ: Πόλωση της κεραίας και ο τρόπος μετάδοσης του σήματος.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό μίας κεραίας είναι το εύρος δέσμης (beamwidth) το οποίο είναι το διάστημα των γωνιών που ορίζονται μεταξύ των σημείων 3dB πάνω στον κύριο λοβό ακτινοβολίας με το σημείο της μέγιστης (Εικόνα 2-2). Το εύρος δέσμης της κεραίας του παρακάτω διαγράμματος ακτινοβολίας είναι $\pm 15^\circ$.



Εικόνα 2-2.Εύρος δέσμης κεραίας (beamwidth) [11].

2.1 Μετάδοση σήματος μεταξύ δύο σημείων (P2P)

Μια φθηνή λύση για επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων (point-to-point, Εικόνα 2-3) είναι με Wi-Fi μεγάλης απόστασης (Long-range Wi-Fi), σε σχέση με άλλα συστήματα επικοινωνίας όπως το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ή η δορυφορική σύνδεση. Τα Wi-Fi μεγάλης απόστασης έχουν ένα εύρος το οποίο περιορίζεται από την δύναμη της μετάδοσης, από τον τύπο της κεραίας, καθώς και από τη θέση και το περιβάλλον που χρησιμοποιούνται. Ένα τυπικό ασύρματο router εσωτερικής χρήσης point-to-multipoint έχει μία εμβέλεια περίπου 30 μέτρων. Χρησιμοποιώντας point-to-point Long-range Wi-Fi σύνδεση μέσω κατευθυντικών κεραιών μπορεί να φτιαχτεί ολόκληρο δίκτυο στο οποίο οι σταθμοί θα μπορούν να απέχουν αρκετά χιλιόμετρα μεταξύ τους [12].



Εικόνα 2-3. Point to Point communication.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της P2P (point-to-point) επικοινωνίας είναι ότι δεν απαιτεί κάποια νέα σύνδεση – συμβόλαιο – δέσμευση με κάποιο πάροχο τηλεπικοινωνιών. Άλλο μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι χρησιμοποιούν μικρότερες, απλούστερες και φθηνότερες κεραίες (κεραίες 2,4GHz σε σύγκριση με κεραίες 900 MHz) και απαιτούν λιγότερη προστασία από κεραυνούς. Επίσης διαθέτουν ελεύθερο λογισμικό όπως το OpenWrt, το AirMax κ.ά.

Ένα μειονέκτημα της μετάδοσης P2P (point-to-point) είναι ότι περιορίζεται σημαντικά η ένταση του σήματος από κακή οπτική επαφή ή ύπαρξη εμποδίων. Σε ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατό να υπάρξει έως και διακοπή της σύνδεσης.

Μία αιτία που μπορεί να μειώσει την ένταση του σήματος άρα και την εμβέλεια της σύνδεσης είναι η επιρροή του τοπίου. Σε μία πόλη τα κτίρια αποτελούν εμπόδιο στην μετάδοση του σήματος και οι μεταλλικές επιστρώσεις σε στέγες ή τοίχους μπορεί να προκαλούν ανακλάσεις σήματος ενώ το σκυρόδεμα απορροφά το σήμα, μειώνοντας την ένταση του. Σε υπεραστικές συνδέσεις προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν από δέντρα – δάση που εξασθενούν το σήμα ή λόφους που αποτελούν εμπόδιο στην μετάδοση του σήματος.

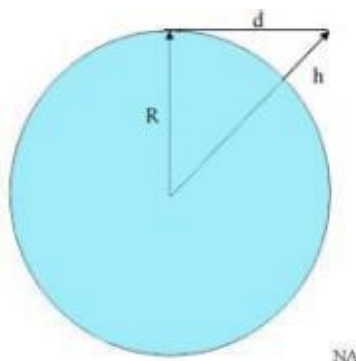
Μία άλλη αιτία που μπορεί να μειώσει την ένταση του σήματος άρα και την εμβέλεια της σύνδεσης είναι η παλιρροιακή εξασθένηση (Tidal fading). Όταν το σήμα περνάει πάνω από νερό (λίμνη – θάλασσα) δημιουργούνται ανακλάσεις με αποτέλεσμα την εξασθένηση του. Για την μείωση της εξασθένησης του σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιούνται στο Tegoia project [13].

Επίσης, μπορεί να μειωθεί η ένταση του σήματος άρα και η εμβέλεια της σύνδεσης από παρεμβολές που μπορεί να δημιουργηθούν από φούρνους μικροκυμάτων, οικιακά ασύρματα τηλέφωνα, ασύρματες φωτογραφικές μηχανές, ασύρματους εκκινητές αυτοκινήτων και πλήθος άλλων συσκευών που έχουν Bluetooth τα οποία εκπέμπουν στην περιοχή των 2.4Ghz με αποτέλεσμα την αύξηση του θορύβου και την εξασθένηση του σήματος.

Το χαρακτηριστικό που χρειάζεται για τη διάδοση του σήματος σε point-to-point Wi-Fi Long-Range συνδέσεις ονομάζεται «γραμμή ορατότητας» (Line Of Sight εν συντομία LOS) [14]. Ενώ το πλέον απομακρυσμένο σημείο του ορίζοντα αναφέρεται ως «ραδιοφωνικός ορίζοντας» (radio horizon). Στην πράξη, τα χαρακτηριστικά διάδοσης ποικίλλουν σημαντικά

ανάλογα με την ακριβή συχνότητα και την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος. Π.χ. η εκπομπή σε συχνότητες περίπου 100MHz, όπως του ραδιοφώνου, επηρεάζονται λιγότερο από την παρουσία κτιρίων και δασών.

Αν υποτεθεί ότι η γη είναι τέλεια σφαίρα, τότε μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η γραμμή ορατότητας στην επιφάνεια της θάλασσας μίας κεραίας που βρίσκεται σε συγκεκριμένο ύψος h , χρησιμοποιώντας το πυθαγόρειο θεώρημα (Εικόνα 2-4).



Εικόνα 2-4. Γραμμή ορατότητας από την επιφάνεια της γης.

Θέτοντας την ακτίνα της γης R και το ύψος που βρίσκεται η κεραία h τότε η γραμμή ορατότητας d θα είναι:

$$d^2 = (R + h)^2 - R^2 = 2 * R * h + h^2$$

Επειδή όμως το ύψος που θα τοποθετηθεί μια κεραία είναι σημαντικά μικρότερο από την ακτίνα της γης η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως:

$$d \approx \sqrt{2 * R * h}$$

όπου:

d = η γραμμή ορατότητας

R = η μέση ακτίνα της γης ≈ 6370 km

h = το ύψος τοποθέτησης της κεραίας

Μία προσεγγιστική σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γρήγορους υπολογισμούς βάζοντας το ύψος σε μέτρα και επιστρέφοντας τη γραμμή ορατότητας d σε χιλιόμετρα είναι:

$$d \approx 3.57 * \sqrt{h}$$

Η παραπάνω γεωμετρική ανάλυση δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ατμόσφαιρας στην μετάδοση του σήματος. Στην πραγματικότητα το σήμα δεν μεταδίδεται

σε απόλυτη ευθεία. Λόγω των διαθλαστικών επιδράσεων των ατμοσφαιρικών στρωμάτων η διαδρομή του σήματος είναι κάπως καμπύλη. Η σύσταση επίσης της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται χρονικά με αποτέλεσμα να αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της όπως το ποσοστό υγρασίας ή το φορτίο σκόνης. Επομένως η πραγματική εμβέλεια εξυπηρέτησης μίας κεραίας δεν θα ισούται με την γεωμετρική γραμμή ορατότητας που υπολογίστηκε από την προηγούμενη σχέση. Συνήθως για την επίδραση της ατμόσφαιρας χρησιμοποιείται ο συντελεστής k . Συμπεριλαμβάνοντας λοιπόν το συντελεστή k στην παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$d \approx \sqrt{2 * k * R * h}$$

Υπό κανονικές συνθήκες ο συντελεστής k εκλέγεται περίπου στα $4/3$ [15], ενώ σε ακραίες καιρικές συνθήκες μπορεί να πάρει τιμές και κάτω από τη μονάδα που σημαίνει την μείωση της εμβέλειας. Υπό κανονικές καιρικές συνθήκες ο παραπάνω προσεγγιστικός τύπος δίνοντας το ύψος σε μέτρα και λαμβάνοντας την απόσταση σε χιλιόμετρα γίνεται:

$$d \approx 4.12 * \sqrt{h}$$

Η μέγιστη απόσταση μεταφοράς του σήματος μεταξύ δύο κεραίων [16] που βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη μπορεί να υπολογιστεί ως:

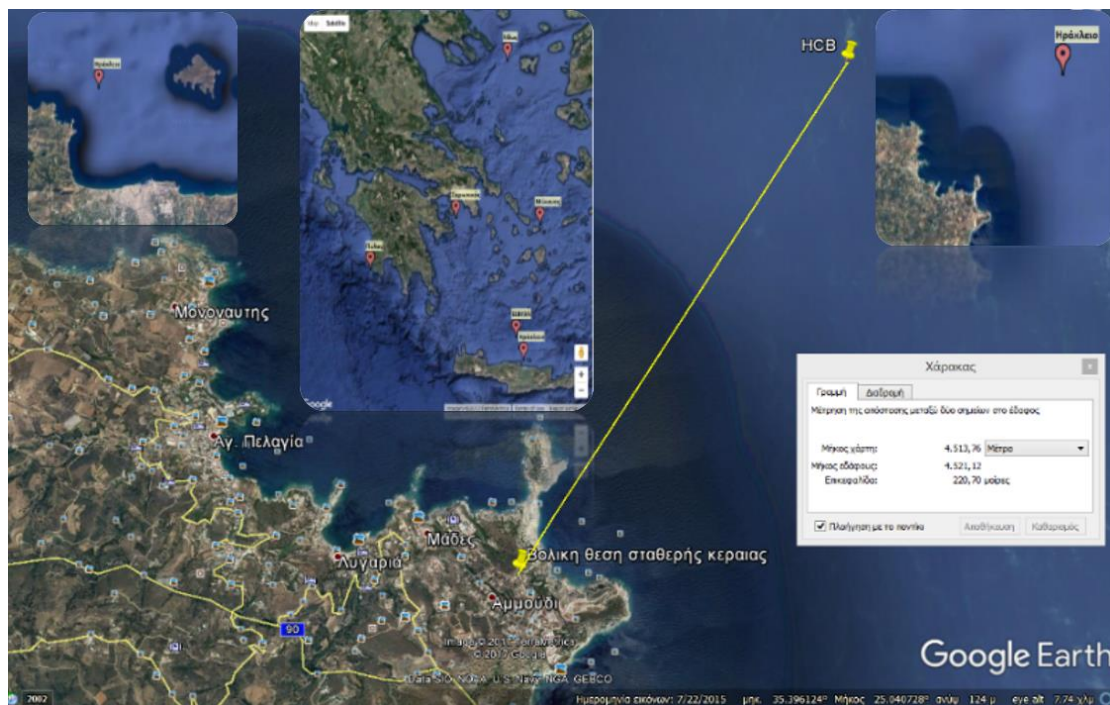
$$d_{max} \approx 3.57(\sqrt{k * h_1} + \sqrt{k * h_2})$$

2.2 Τοποθέτηση σταθερής κεραίας

Το πιο ψηλό και κοντινό σημείο που θα μπορούσε να τοποθετηθεί η σταθερή κεραία για να επικοινωνεί με το σταθερό παρατηρητήριο HCB του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ που βρίσκεται στον κόλπο του Ηρακλείου Κρήτης είναι στην περιοχή Αμμούδι που φαίνεται στην Εικόνα 2-5. Βρίσκεται σε υψόμετρο 125 μέτρων και απέχει 4.5 Km από τον πλωτό σταθμό χωρίς να παρεμβάλλονται εμπόδια.

Με δεδομένο ότι η κινητή κεραία θα τοποθετηθεί πάνω στο πλωτό παρατηρητήριο σε ύψος περίπου τριών μέτρων και εφαρμόζοντας την σχέση υπολογισμού της μέγιστης

απόστασης μεταξύ δύο κεραιών (κεφ. 2.1) επιλέγοντας συντελεστή $k = 1$ προκύπτει ότι η μέγιστη απόσταση μεταφοράς του σήματος μεταξύ των δύο κεραιών φτάνει τα 46 km.



Εικόνα 2-5. Οι σταθμοί του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ και ο προτεινόμενος σταθμός τοποθέτησης του σφαιρικού καρπού [3].

Εκτός από την περιοχή Αμμούδι (Εικόνα 2-5) η σταθερή κεραία θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο της ακτής έως και την περιοχή Μονοαυτής. Η απόσταση του πλωτού σταθμού από την ακτογραμμή δεν ξεπερνάει τα 5,5 km ενώ η εμβέλεια της κινητής κεραιάς είναι 10 km. Με την τοποθέτηση της σταθερής κεραιάς σε υψόμετρο τριών μέτρων η απόσταση εξυπηρέτησης φτάνει τα 12,3 km (με $k=1$).

Για την τελική επιλογή του σημείου τοποθέτησης της σταθερής κεραιάς το σημαντικότερο ρόλο θα παίξει η ύπαρξη σταθερής σύνδεσης διαδικτύου καθώς από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς την εύρεση κατάλληλου σημείου.

Κεφάλαιο

3

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η σχεδίαση και η υλοποίηση του σφαιρικού καρπού. Αρχικά προσδιορίζονται οι απαιτήσεις και η αρχιτεκτονική του συστήματος. Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη μηχανολογική σχεδίαση του. Έπειτα γίνεται μία αναλυτική περιγραφή με τα μέρη που απαρτίζουν το σύστημα όπως η κεραία, οι βηματικοί κινητήρες, η αδρανειακή μονάδα (IMU) κ.ά. ενώ στο τέλος, δίδεται το σχηματικό διάγραμμα των ηλεκτρικών συστημάτων.

3. Σχεδίαση και υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος στόχευσης

3.1 Απαιτήσεις και προδιαγραφές του ρομποτικού συστήματος στόχευσης

Το ρομποτικό σύστημα στόχευσης πρόκειται να τοποθετηθεί σε έναν παράκτιο αγκυροβολημένο πλωτήρα βάρους 710 kg διαμέτρου 1,76 m με ολικό ύψος 8,6 m (Εικόνα 1-6, δεξιά). Το ύψος του ιστού φτάνει στα 3,8 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας όπου και θα μπορούσε να τοποθετηθεί ο μηχανισμός με την κατασκευή κάποιας βάσης. Η τοποθέτηση του συστήματος στον πλωτήρα θα μελετηθεί και θα εκτελεστεί από την τεχνική ομάδα του συστήματος Poseidon.

Ο πλωτήρας μπορεί να περιστραφεί 360° γύρω από τον άξονα του ενώ η μέγιστη κλίση του λόγω του κυματισμού εκτιμάται ότι δεν μπορεί να ξεπεράσει τις 45° . Ένας μηχανισμός λοιπόν για να είναι σε θέση να διατηρεί την στόχευση μεταξύ των δύο κεραιών θα πρέπει να έχει τρεις αρθρώσεις (3 DOF) εκ των οποίων η πρώτη να είναι 360° ενώ οι άλλες δύο τουλάχιστον 90° .

Για να χαθεί ένα βαθμός ελευθερίας (gimbal lock) θα πρέπει η κλίση του πλωτού σταθμού να φτάσει στις 90° όπου και θα παραλληλιστούν η $1^{\text{η}}$ με την $3^{\text{η}}$ άρθρωση [17]. Αυτό όμως δεν πρόκειται να συμβεί καθώς η κλίση του σταθμού περιορίζεται από το αγκυροβόλιο.

Στο σφαιρικό καρπό θα χρησιμοποιηθούν βηματικοί κινητήρες αφενός γιατί υπάρχουν ήδη διαθέσιμοι και αφετέρου γιατί έχουν βολικά χαρακτηριστικά για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Μπορούν να διατηρήσουν μία θέση με πολύ καλή ακρίβεια καθώς και να μετακινηθούν αρκετά γρήγορα από μία θέση σε μία άλλη. Ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής τους καταναλώνουν λιγότερο ρεύμα το οποίο θα ήταν χρήσιμο το χειμώνα σε περιόδους κακοκαιρίας όπου είναι μειωμένη η απόδοση των φωτοβολταϊκών του πλωτήρα. Επίσης είναι αξιόπιστοι και προσδίδουν στο σύστημα μεγάλη ευελιξία καθώς μπορούν να οδηγηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους έχοντας εντελώς διαφορετικό αποτέλεσμα ο καθένας.

Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται ανά 3 ώρες και η διάρκεια της είναι λίγα λεπτά, όση απαιτείται για την μεταφορά των δεδομένων. Ο μηχανισμός λοιπόν θα λειτουργεί ανά 3 ώρες και συνολικά θα λειτουργεί από 1 έως 2 ώρες το 24ωρο. Την περισσότερη ώρα οι κινητήρες θα είναι απενεργοποιημένοι για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας. Όταν οι κινητήρες δεν θα λειτουργούν και δεδομένου ότι ο πλωτήρας βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας θα πρέπει να βρεθεί μία λύση με τις αρθρώσεις καθώς με τον κυματισμό θα κινούνται ανεξέλεγκτα. Η κίνηση αυτή περιορίζεται σε ένα μικρό βαθμό από τη σχέση μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των αρθρώσεων.

Μία λύση θα ήταν να ακινητοποιούνται τουλάχιστον οι δύο τελευταίες αρθρώσεις με κάποιον μηχανισμό όπως πχ ηλεκτρομαγνήτες αλλά μία τέτοια λύση αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Μία άλλη λύση θα ήταν να αφεθούν ελεύθερες να κινηθούν με την προϋπόθεση ότι έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα υλικά απόσβεσης των κρούσεων που θα υφίστανται οι αρθρώσεις. Λόγω όμως του ότι η συντήρηση του πλωτήρα γίνεται ανά 9 μήνες περίπου υπάρχει περίπτωση πχ. λόγω φθοράς των υλικών απόσβεσης, η λύση αυτή να είχε καταστροφικά αποτελέσματα για το μηχανισμό.

Τελικά για την επίλυση όλων των παραπάνω προβλημάτων, με δεδομένο ότι δεν είναι και τόσο περιοριστικοί παράγοντες το βάρος και ο όγκος του μηχανισμού καθώς και για

λόγους πολυχρηστικότητας (πχ. να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες εφαρμογές), αποφασίστηκε και οι τρεις αρθρώσεις να είναι 360°. Για αποφυγή της καταστροφής των καλωδίων από την περιστροφή των αρθρώσεων θα χρησιμοποιηθούν δακτύλιοι ολίσθησης (slip rings).

Ένα πρόβλημα που έχουν οι δύο τελευταίες από τις παραπάνω λύσεις είναι ότι εφόσον ο μηχανισμός θα παραμένει ελεύθερος να κινηθεί όταν θα καλείται να λειτουργήσει δεν θα του είναι γνωστή η θέση των αρθρώσεων. Αυτό όμως μπορεί να λυθεί εύκολα χρησιμοποιώντας αισθητήρες εγγύτητας. Έτσι κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του το πρώτο που θα πρέπει να κάνει ο μηχανισμός είναι η εύρεση των αρχικών του σημείων.

Η μετάδοση της κίνησης θα γίνεται με οδοντωτό ιμάντα και γρανάζια αφενός γιατί μπορεί να αυξηθεί η διατιθέμενη ροπή με την ταυτόχρονη μείωση της ελάχιστης ακρίβειας κίνησης και αφετέρου γιατί ο τζόγος (backlash) είναι μηδενικός όταν χρησιμοποιείται οδοντωτός ιμάντας καθώς βρίσκονται συνεχώς σε επαφή με τις τροχαλίες αρκετά από τα ελαστικά δόντια του ιμάντα.

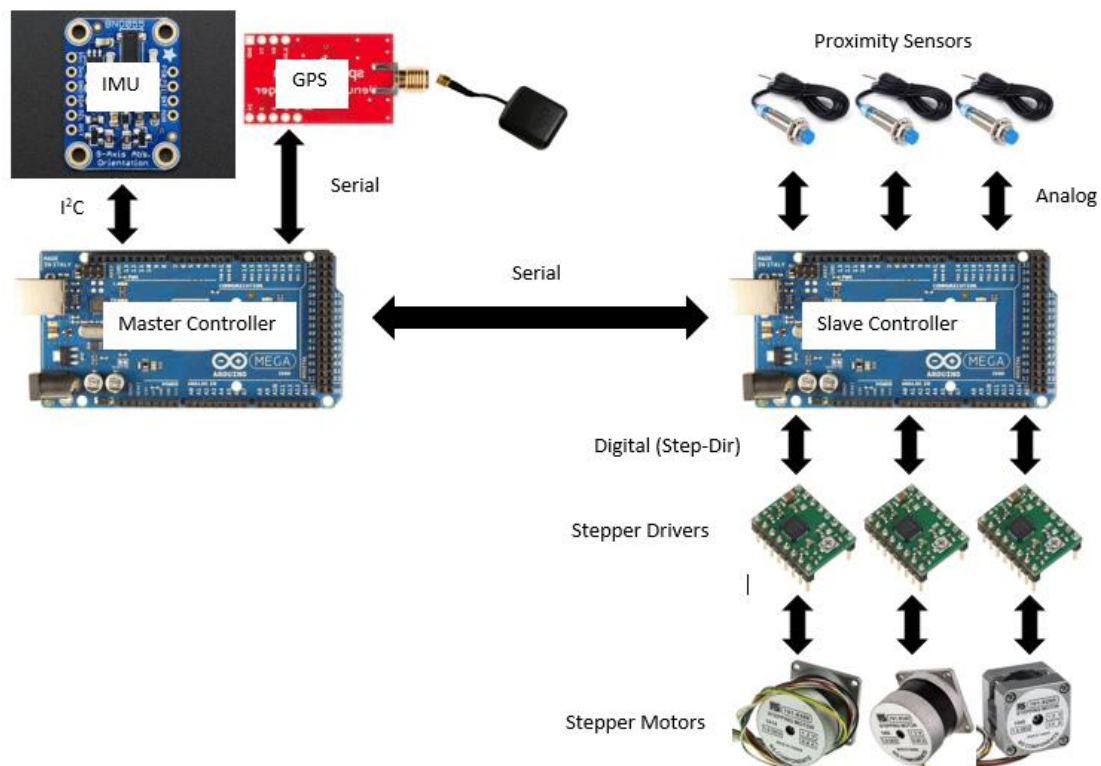
Για τον περιορισμό της κίνησης των αρθρώσεων κατά τη διάρκεια της μη λειτουργίας του συστήματος με την ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας απόκρισης κατά τη λειτουργία των κινητήρων θα πρέπει να τοποθετηθεί το κέντρο μάζας του μηχανισμού όσο το δυνατόν πιο κοντά και χαμηλά στον κεντρικό του άξονα. Με αυτόν τον τρόπο ακόμα και όταν ο πλωτήρας θα βρίσκεται υπό κλίση θα απαιτείται μικρότερη ροπή από τους κινητήρες για την περιστροφή της κάθε άρθρωσης αφού το φορτίο θα παραμένει σχεδόν σταθερό. Έτσι θα μπορούν να γίνουν ευκολότερα αλλαγές στην κατεύθυνση κίνησης των αρθρώσεων που σημαίνει ότι μειώνεται η πιθανότητα να χαθούν βήματα από ένα κινητήρα. Βέβαια μεγάλο ρόλο σε αυτό παίζει το βάρος του μηχανισμού αλλά η βελτιστοποίηση του θα γίνει σε δεύτερο στάδιο.

3.2 Αρχιτεκτονική ρομποτικού συστήματος στόχευσης

Η αρχιτεκτονική που επιλέχθηκε (Εικόνα 3-1) χρησιμοποιεί δύο ελεγκτές (Arduino Mega). Ο πρώτος ελεγκτής (Master) διαβάζει την πληροφορία της γεωγραφικής θέσης του σταθμού από το GPS χρησιμοποιώντας TTL (Transistor – Transistor Logic) σειριακή

επικοινωνία. Επίσης, διαβάζει τον προσανατολισμό (yaw, pitch, roll) του σταθμού από την IMU χρησιμοποιώντας I²C πρωτόκολλο επικοινωνίας. Στη συνέχεια επιλύει την κινηματική ανάλυση του μηχανισμού υπολογίζοντας τις τρεις επιθυμητές γωνίες των αρθρώσεων ώστε να επιτευχθεί η ορθή στόχευση. Τέλος οι τρεις επιθυμητές γωνίες αποστέλλονται από τον κύριο ελεγκτή (Master) με TTL (Transistor – Transistor Logic) σειριακή επικοινωνία στον δεύτερο ελεγκτή (Slave).

Ο δεύτερος ελεγκτής (Slave) χρησιμοποιείται για την οδήγηση των βηματικών κινητήρων με βάση την πληροφορία που παίρνει από τον πρώτο ελεγκτή (Master). Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων πραγματοποιείται από τους οδηγούς βηματικών κινητήρων A4988 της Pololu δίνοντας τους ένα ψηφιακό σήμα για την επιθυμητή κατεύθυνση περιστροφής (DIR) και ένα ψηφιακό σήμα για την εκτέλεση ενός βήματος – μικροβήματος (STEP). Με τον δεύτερο ελεγκτή γίνεται η αρχική τοποθέτηση των αρθρώσεων του σφαιρικού καρπού στο μηδενικό – αρχικό τους σημείο με βάση την πληροφορία που εξάγεται από τους αισθητήρες εγγύτητας.



Εικόνα 3-1. Η αρχιτεκτονική του συστήματος.

Ένας από τους βασικότερους λόγους που οδήγησαν σε αυτήν την αρχιτεκτονική είναι ότι χρησιμοποιεί τον ελάχιστο αριθμό καλωδίων στο κεντρικό δακτύλιο ολίσθησης (slip ring). Για τη μονόδρομη επικοινωνία μεταξύ των δύο ελεγκτών χρειάζεται μόνο ένα καλώδιο ενώ

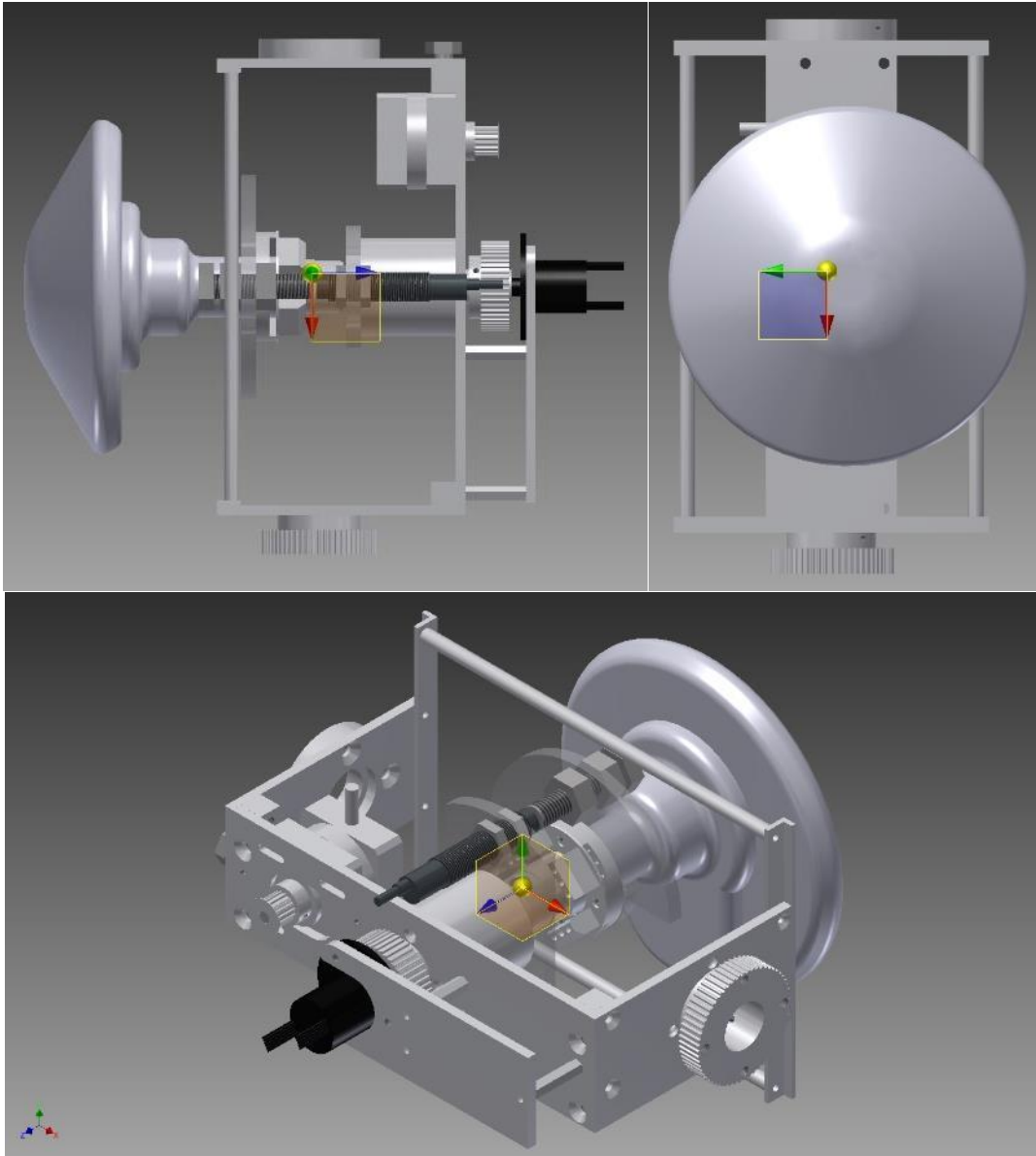
για την αμφίδρομη επικοινωνία χρειάζεται δύο. Με αυτήν την αρχιτεκτονική ο Master ελεγκτής αναλαμβάνει τους αισθητήρες που βρίσκονται στην βάση του συστήματος στόχευσης ενώ ο Slave ελεγκτής αναλαμβάνει τους αισθητήρες και τους επενεργητές που βρίσκονται στο περιστρεφόμενο μέρος του συστήματος στόχευσης. Η επιλογή των Arduino Mega, με το πλήθος των ακροδεκτών που διαθέτουν, δίδει μεγάλη ευελιξία τόσο κατά την ανάπτυξη όσο και στην μελλοντική βελτιστοποίηση του ρομποτικού συστήματος στόχευσης.

3.3 Μηχανολογική σχεδίαση ρομποτικού συστήματος στόχευσης

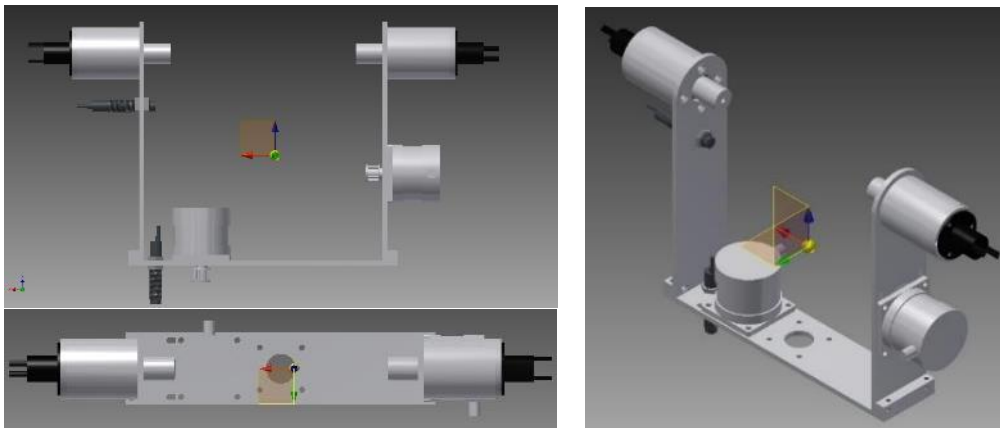
Αφού λήφθηκε υπόψη το κεφ. 3.1 και επιλέχθηκαν τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν, ξεκίνησε η μηχανολογική σχεδίαση του μηχανισμού, που έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Autodesk Inventor Professional 2015.

Η σχεδίαση και η κατασκευή ξεκίνησε από την τρίτη άρθρωση, στη συνέχεια ακολούθησε η σχεδίαση και κατασκευή της δεύτερης και έπειτα της πρώτης άρθρωσης. Ο λόγος ήταν για την διατήρηση του κέντρου μάζας όσο το δυνατόν πάνω στον κεντρικό άξονα του μηχανισμού καθώς ήταν δύσκολο να ληφθούν υπόψη όλες αυτές οι παράμετροι εξ αρχής. Η τρίτη άρθρωση και το κέντρο μάζας της φαίνεται στην Εικόνα 3-2 ενώ η δεύτερη και η πρώτη άρθρωση φαίνονται στην Εικόνα 3-3.

Τα έτοιμα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν όπως κινητήρες, κεραία κτλ σχεδιάστηκαν έτσι ώστε το βάρος και οι διαστάσεις τους να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Για να είναι αυτό εφικτό ακολούθησαν αρκετές δοκιμές δηλώνοντας κάθε φορά διαφορετικό υλικό στο λογισμικό σχεδίασης έως ότου βρεθεί το κατάλληλο.



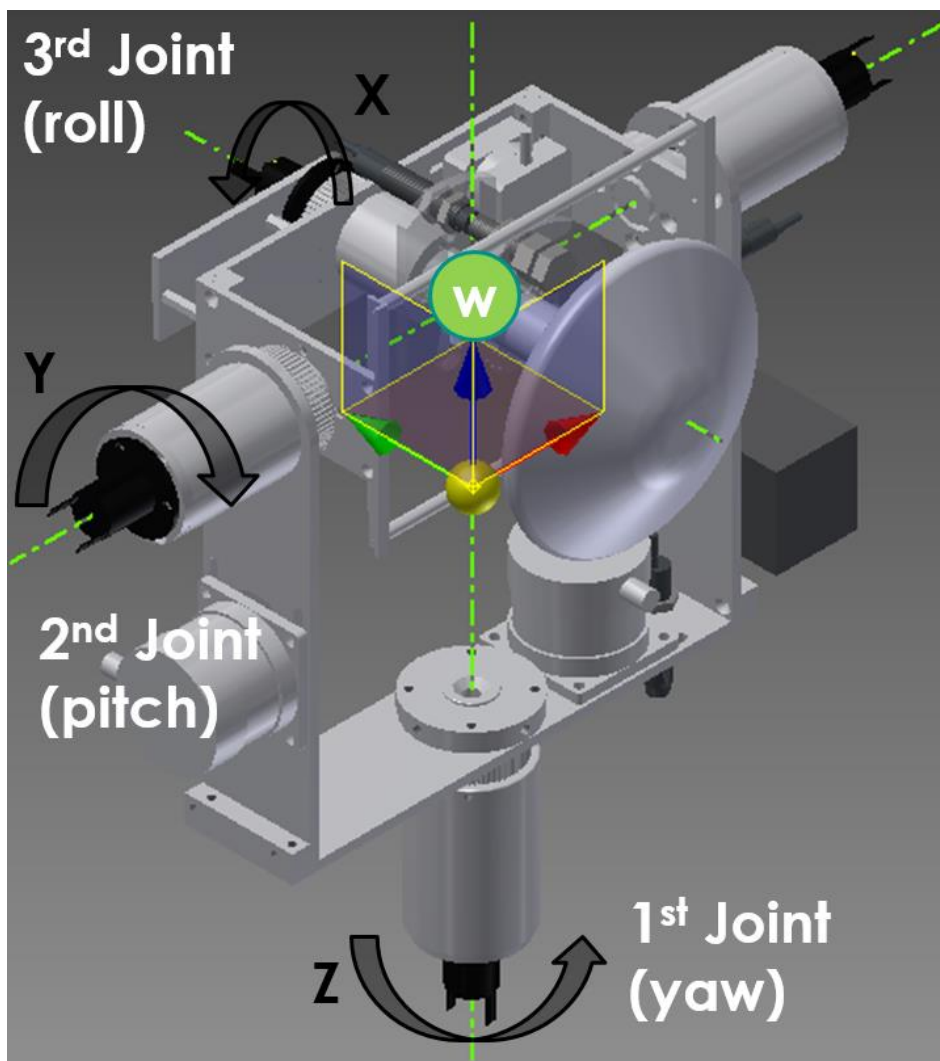
Εικόνα 3-2. Η τρίτη άρθρωση του μηχανισμού και το κέντρο μάζας της.



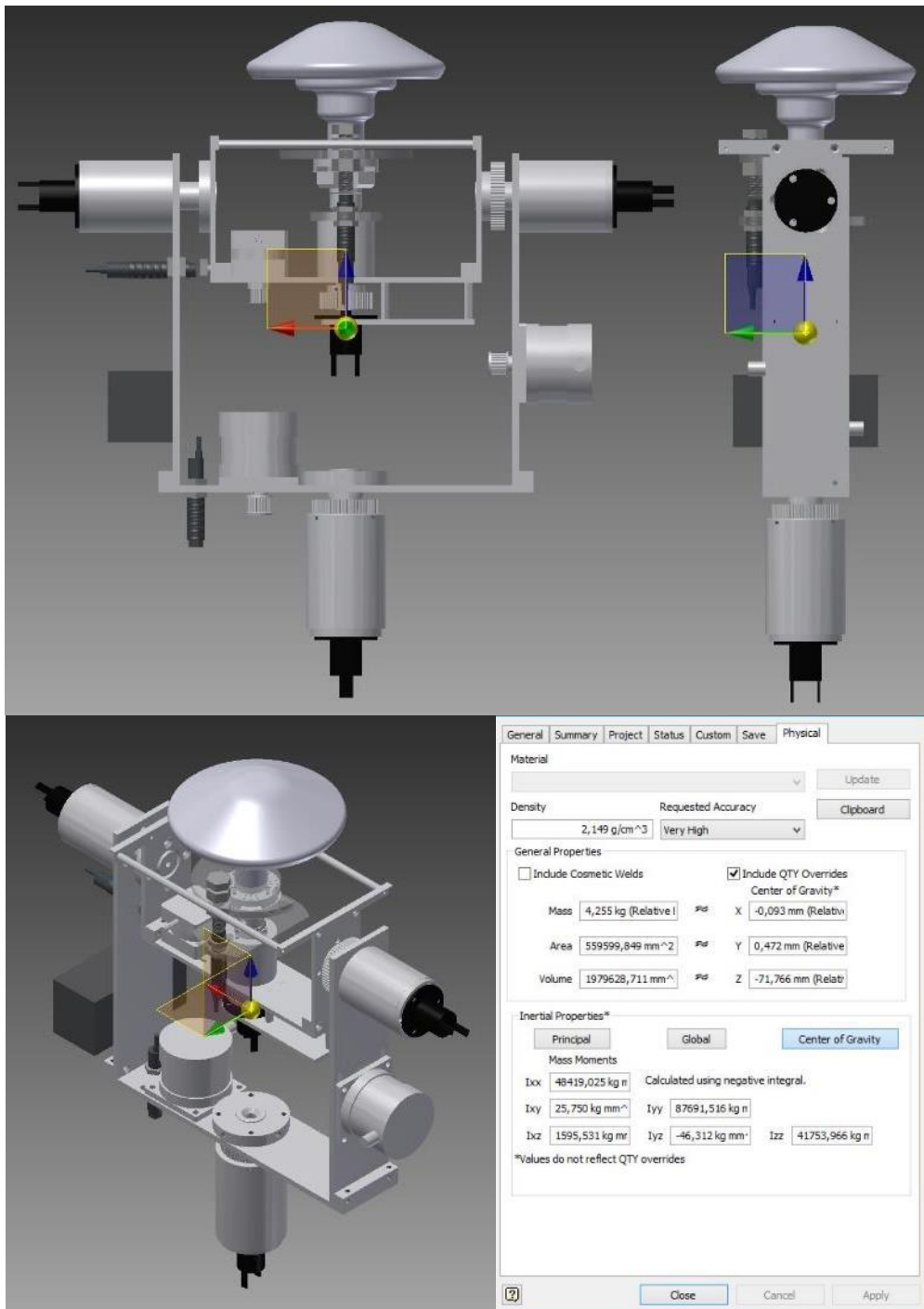
Εικόνα 3-3. Η πρώτη και δεύτερη άρθρωση του μηχανισμού και το κέντρο μάζας.

Το θεωρητικό κέντρο μάζας όλου του μηχανισμού φαίνεται στις Εικόνα 3-4 και Εικόνα 3-5, το οποίο διέφερε ελάχιστα από την πραγματικότητα. Αφού συνδέθηκαν όλες οι καλωδιώσεις, τοποθετήθηκαν όλα τα εξαρτήματα και ο μηχανισμός ήταν λειτουργικός, έγινε ζυγοστάθμιση της πρώτης άρθρωσης τοποθετώντας κατάλληλα βάρη σε συγκεκριμένα σημεία με σκοπό τη μεταφορά του κέντρου μάζας όσο το δυνατόν πιο κοντά στον άξονα περιστροφής της πρώτης άρθρωσης.

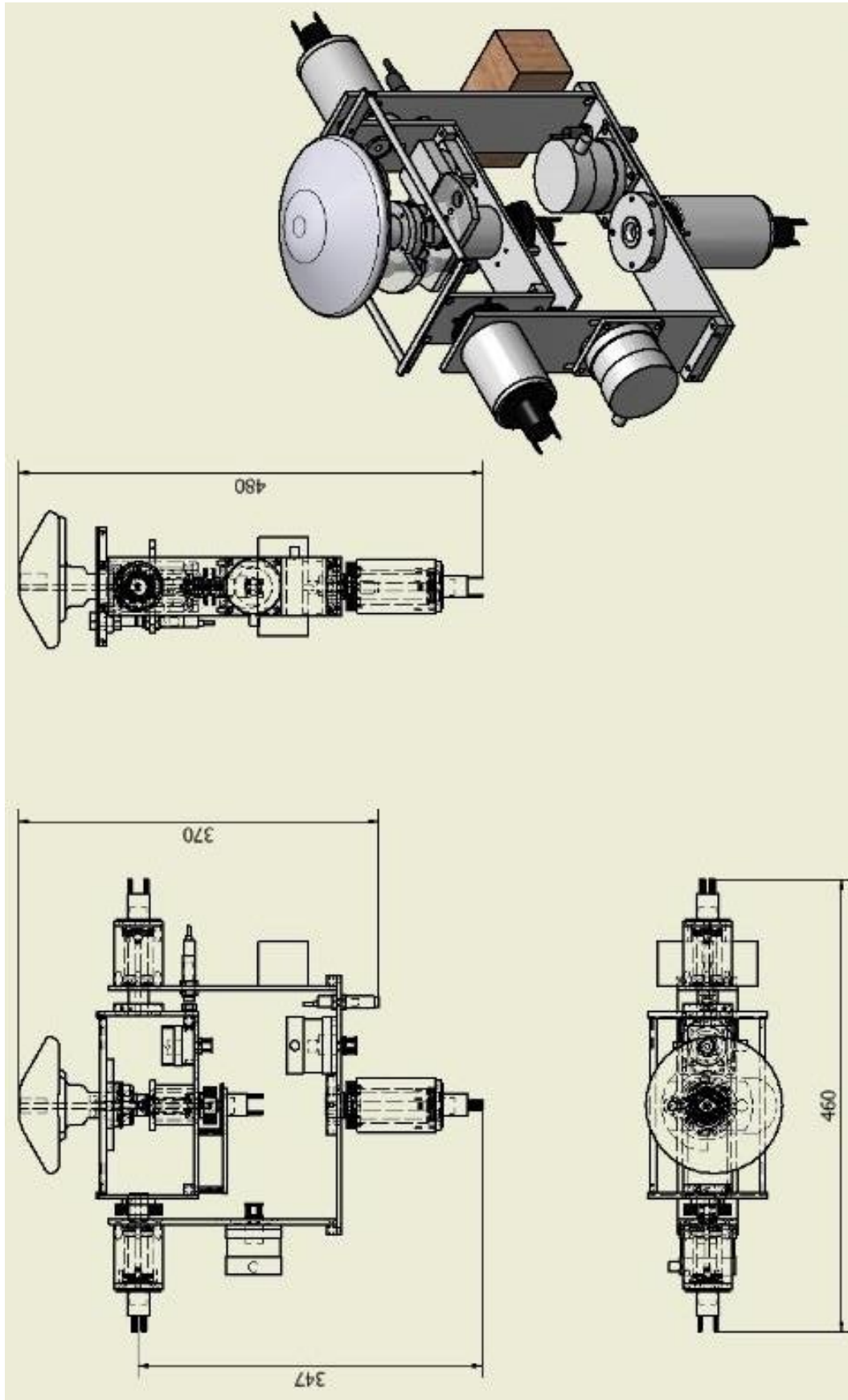
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πρωτοτύπου είναι κυρίως το αλουμίνιο, το plexiglass και το ertacetal. Έτσι σύμφωνα με το λογισμικό Inventor όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-5 κάτω αριστερά, το βάρος του μηχανισμού είναι στα 4,255 Kg. Ζυγίζοντας τον βρέθηκε 4,62 Kg αλλά ήταν λογικό καθώς είχαν προστεθεί καλώδια, πλακέτες διακλαδώσεων και βίδες που δεν είχαν σχεδιαστεί στο Inventor. Οι κύριες διαστάσεις του μηχανισμού φαίνονται στην Εικόνα 3-6.



Εικόνα 3-4. Οι άξονες του σφαιρικού καρπού και το κέντρο μάζας στην συνήθη θέση λειτουργίας του.



Εικόνα 3-5. Συναρμολογημένος ο σφαιρικός καρπός στην αρχική του θέση.



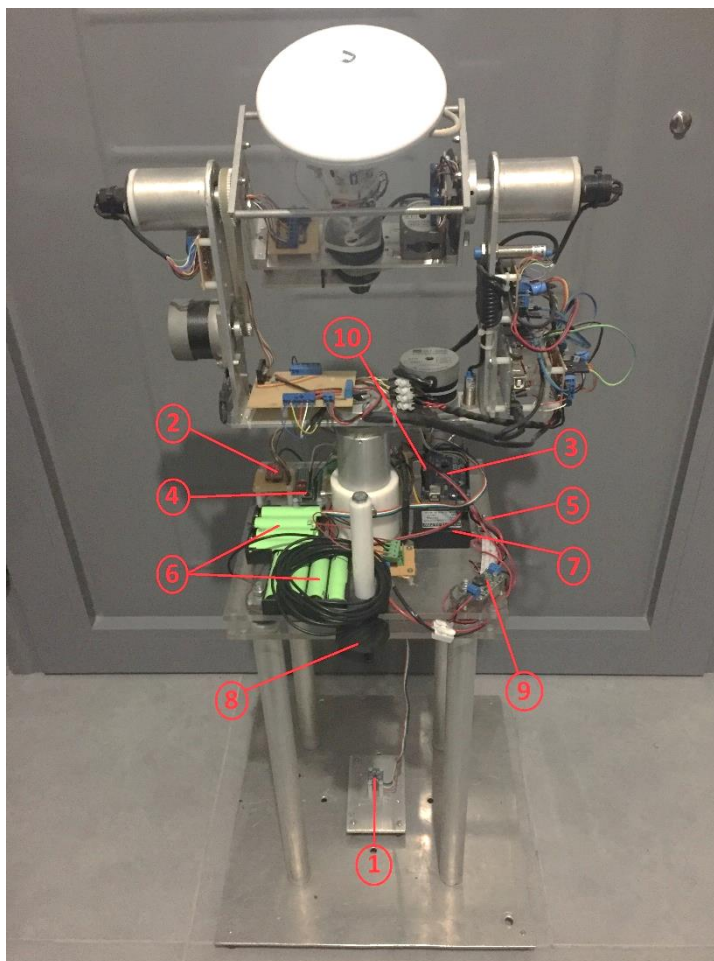
Εικόνα 3-6. Οι κύριες διαστάσεις του σφαιρικού καρπού.

3.4 Τα μέρη του ρομποτικού συστήματος στόχευσης

Τα κυριότερα από τα έτοιμα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η θέση τους πάνω στην κατασκευή φαίνονται στις Εικόνα 3-7 και Εικόνα 3-8.

Στην Εικόνα 3-8 διακρίνονται τα εξαρτήματα που βρίσκονται πάνω στο σφαιρικό καρπό ενώ στην Εικόνα 3-7 διακρίνονται τα εξαρτήματα που βρίσκονται στην βάση του σφαιρικού καρπού.

1. IMU
2. GPS
3. Master Controller
4. Button/Switches
5. Power switch
6. 2 Battery packs
7. Step up 12 to 24V.
XW-12-24 72W
8. GPS Antenna
9. Step up/down 12V.
Pololu S18V20F12
10. Indicator LED

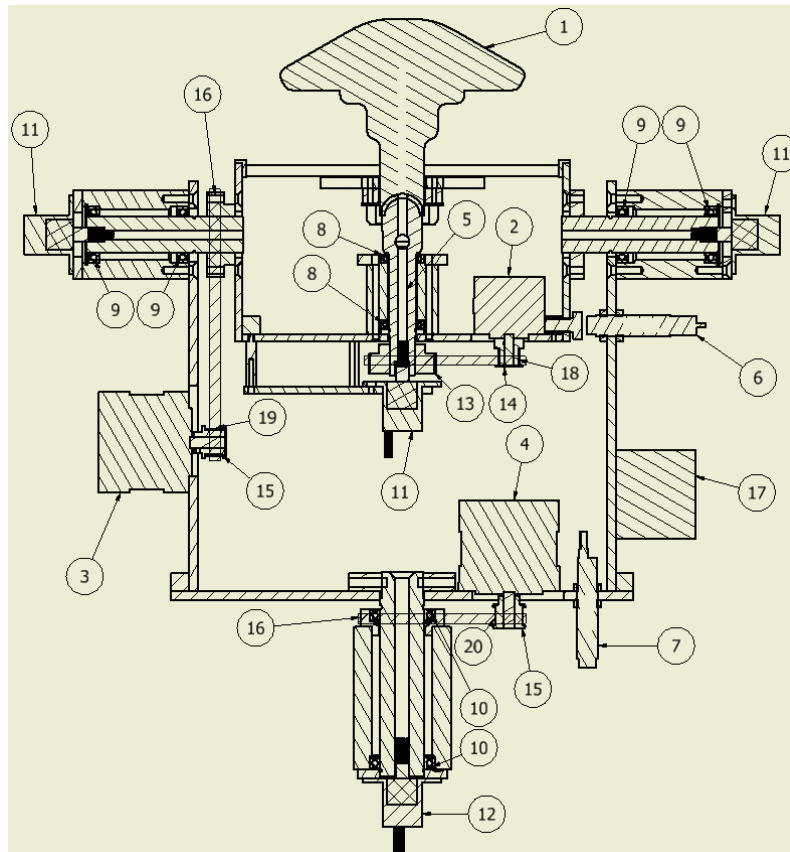


Εικόνα 3-7. Τα μέρη του συστήματος που βρίσκονται στην βάση του σφαιρικού καρπού.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, για την κατασκευή του πλαισίου του σφαιρικού καρπού και της βάσης του, είναι το αλουμίνιο κατά κύριο λόγο και το plexiglass. Ο σκελετός του σφαιρικού καρπού καθώς και η βάση του σχεδιάστηκαν και έπειτα κατασκευάστηκαν σε συμβατικές εργαλειομηχανές (τόρνο, φρέζα) στο μηχανουργείο του ΕΛΚΕΘΕ.

Εκτός από τα παραπάνω εξαρτήματα χρησιμοποιήθηκε επίσης πληθώρα διάφορων μηχανολογικών (κοχλίες – περικόχλια, αντικραδασμικές βάσεις, ασφάλειες άξονα κ.ά.) και

ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων (καλώδια, κλέμες, διακόπτες, ακροδέκτες σύνδεσης, διάτρητες πλακέτες κ.ά.) για την στήριξη ή την ηλεκτρική διασύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων του συστήματος στόχευσης.



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Directional Antenna Wi-Fi	NBE-5M-16
2	1	Stepper Motor 3rd Joint	RS 191-8299
3	1	Stepper Motor 2nd Joint	RS 191-8340
4	1	Stepper Motor 1st Joint	RS 191-8356
5	1	Proximity Sensor 3rd Joint	LJ12A3-4-Z/BY
6	1	Proximity Sensor 2nd Joint	LJ12A3-4-Z/BY
7	1	Proximity Sensor 1st Joint	LJ12A3-4-Z/BY
8	2	Bearings 3rd Joint	61802-2RS1
9	4	Bearings 2nd Joint	61804-2RS1
10	2	Bearings 1st Joint	61805-2RS1
11	3	Slip rings for 3rd & 2nd Joints	12 cables AWG28
12	1	Slip ring for 1st Joint	12 cables AWG16
13	1	Timing Pulley 3rd Joint	48 teeth
14	1	Timing Pulley 3rd Joint	16 teeth
15	2	Timing Pulley 2nd & 1st Joints	15 teeth
16	2	Timing Pulley 2nd & 1st Joints	60 teeth
17	1	Slave Controller & Stepper drivers	3 drivers A4988
18	1	Timing Belt 3rd Joint	200mm length
19	1	Timing Belt 2nd Joint	330mm length
20	1	Timing Belt 1st Joint	230mm length

Εικόνα 3-8. Τα μέρη του συστήματος που βρίσκονται πάνω στο σφαιρικό καρπό.

3.4.1 Ελεγκτές

Για το πρωτότυπο ρομποτικό σύστημα στόχευσης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν 2 ίδιοι μικροελεγκτές Arduino Mega 2560 (Εικόνα 3-9). Ο πρώτος ελεγκτής διαβάζει τους αισθητήρες (GPS & IMU) και επιλύοντας το κινηματικό πρόβλημα βρίσκει τις κατάλληλες θέσεις των αρθρώσεων για την ορθή στόχευση. Ο δεύτερος ελεγκτής (Slave) είναι υπεύθυνος για την κίνηση των τριών βηματικών κινητήρων καθώς και για την εύρεση της αρχικής θέσης του μηχανισμού διαβάζοντας τους αισθητήρες εγγύτητας (proximity sensors).



Εικόνα 3-9. Arduino Mega 2560.

Κριτήριο για την επιλογή του Arduino ήταν ότι υποστηρίζεται από μία πολύ μεγάλη κοινότητα στο διαδίκτυο η οποία έχει δημιουργήσει μία μεγάλη μεγέθους online γνωστική βάση. Επίσης το software του Arduino διανέμεται δωρεάν στο διαδίκτυο και είναι ανοιχτού κώδικα (open source). Ένα άλλο κριτήριο ήταν το χαμηλό του κόστος και η άμεση διαθεσιμότητα που έχει σε πλήθος καταστημάτων.

Κάποια από τα κριτήρια για την επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή (Arduino Mega 2560) ήταν οι 4 μονάδες σειριακής επικοινωνίας που διαθέτει, οι 54 ψηφιακοί ακροδέκτες, η μνήμη EEPROM, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που υποστηρίζει (I²C, SPI) κ.ά.

Επιλέγοντας τον συγκεκριμένο μικροελεγκτή δίδεται ευελιξία ως προς την μελλοντική εξέλιξη – βελτίωση του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος. Η ευελιξία αυτή είναι επίσης απαραίτητο στοιχείο και κατά την ανάπτυξη ενός συστήματος. Παραδείγματος χάρη για να επιτευχθεί μία μελλοντική αύξηση της ταχύτητας κίνησης των αρθρώσεων, θα μπορούσε να αλλάξει εύκολα η αρχιτεκτονική του συστήματος, χρησιμοποιώντας έναν Arduino MEGA 2560 ως Master και 3 μικρότερους Arduino (pro-mini) ως Slave (έναν ελεγκτή για κάθε κινητήρα).

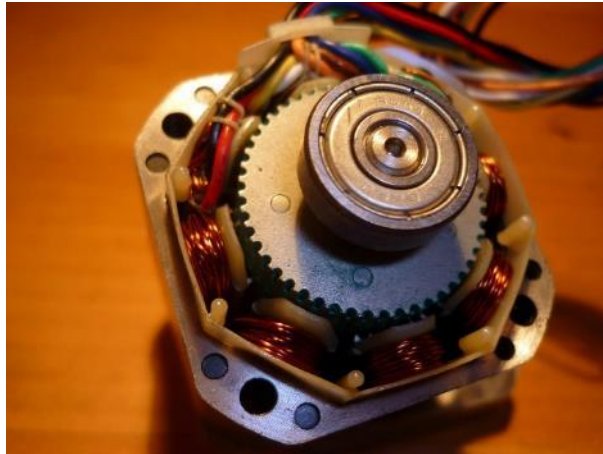
3.4.2 Επενεργητές

3.4.2.1 Βηματικοί κινητήρες

Ένας βηματικός κινητήρας είναι ένας ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες που διαιρεί μια πλήρη περιστροφή του άξονα σε ένα αριθμό ίσων βημάτων. Επίσης μπορεί να μετακινηθεί καθώς και να ακινητοποιηθεί σε οποιοδήποτε από αυτά τα βήματα χωρίς αισθητήρα ανάδρασης (ελεγκτής ανοιχτού βρόχου), εφόσον ο κινητήρας είναι προσεκτικά επιλεγμένος και κατάλληλος για την εφαρμογή, σε σχέση με τη απαιτούμενη ροπή και την ζητούμενη ταχύτητα.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες περιστρέφονται συνεχώς όταν εφαρμόζεται τάση συνεχούς ρεύματος στους ακροδέκτες τους. Ο βηματικός κινητήρας είναι γνωστός από την ιδιότητά του να μετατρέπει έναν τετραγωνικό παλμό σε μια επακριβώς καθορισμένη θέση του άξονα. Κάθε παλμός μετακινεί τον άξονα κατά ένα βήμα που μεταφράζεται σε μία σταθερή γωνία. Μετρώντας λοιπόν τους παλμούς – βήματα μπορεί εύκολα να βρεθεί η θέση του άξονα με μεγάλη ακρίβεια.

Οι βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από πολλούς "οδοντωτούς" ηλεκτρομαγνήτες διατεταγμένους γύρω από ένα κεντρικό τεμάχιο με σχήμα σαν γρανάζι (Εικόνα 3-10). Οι ηλεκτρομαγνήτες ενεργοποιούνται από εξωτερικό κύκλωμα οδηγού ή μικροελεγκτή. Για να κινηθεί ο άξονας του κινητήρα, ενεργοποιείται πρώτα ένας ηλεκτρομαγνήτης, ο οποίος προσελκύει μαγνητικά τα δόντια του γραναζιού. Όταν τα δόντια του γραναζιού ευθυγραμμίζονται με τον πρώτο ηλεκτρομαγνήτη, είναι ελαφρώς μετατοπισμένα από τον επόμενο ηλεκτρομαγνήτη. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο επόμενος ηλεκτρομαγνήτης ενεργοποιηθεί και ο πρώτος είναι απενεργοποιημένος, το γρανάζι περιστρέφεται ελαφρά για να ευθυγραμμιστεί με το επόμενο. Από εδώ και πέρα η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Κάθε μία από αυτές τις περιστροφές ονομάζεται "βήμα", και κάθε βηματικός κινητήρας έχει έναν ακέραιο αριθμό βημάτων που κάνουν μια πλήρη περιστροφή. Με αυτόν τον τρόπο, ο βηματικός κινητήρας μπορεί να περιστραφεί και να ακινητοποιηθεί σε οποιαδήποτε πολλαπλάσια γωνία βήματος με ακρίβεια.



Εικόνα 3-10. Το εσωτερικό ενός βηματικού κινητήρα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι βηματικών κινητήρων. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες οι οποίοι φαίνονται στην Εικόνα 3-11, με την σειρά των άρθρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Στην πρώτη και δεύτερη άρθρωση χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες 8 καλωδίων μεγέθους NEMA 23 ενώ στην τρίτη άρθρωση χρησιμοποιείται βηματικός κινητήρας 6 καλωδίων μεγέθους NEMA 17. Τα βασικά χαρακτηριστικά των βηματικών κινητήρων είναι διαθέσιμα στα [18], [19] και [20] για την 1^η, 2^η και 3^η άρθρωση, αντίστοιχα.



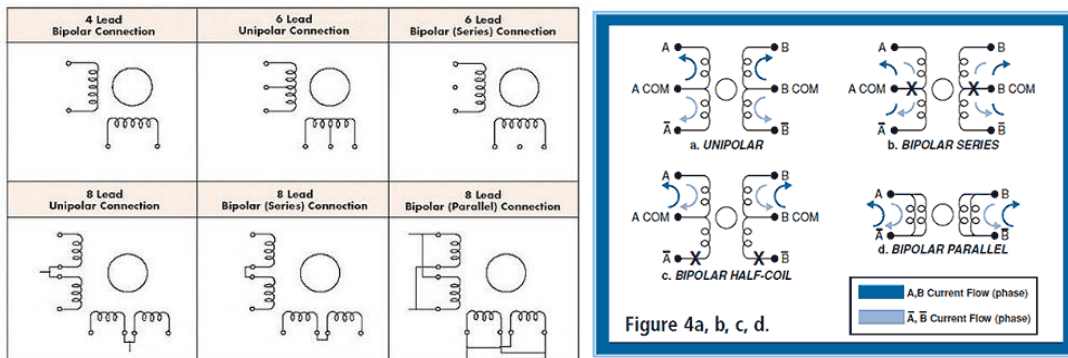
Εικόνα 3-11. Οι βηματικοί κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες ανάλογα με τον αριθμό των καλωδίων που διαθέτουν δύναται να συνδεθούν με διάφορους τρόπους. Η αλλαγή του τρόπου σύνδεσης (bipolar, unipolar) και του οδηγού (stepper driver) που χρησιμοποιείται μπορεί να επιφέρει τελείως διαφορετικά αποτελέσματα στην παραγόμενη ροπή, ισχύ και ταχύτητα.

Οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης τους (unipolar, bipolar series, bipolar parallel). Οι βηματικοί κινητήρες διαφέρουν ως προς τον αριθμό των καλωδίων που φέρει ο καθένας. Έτσι, οι εφικτές συνδέσεις κάθε τύπου κινητήρα βρίσκονται στο Πίνακα 3-1 και στην Εικόνα 3-12.

Πίνακας 3-1. Τρόπος σύνδεσης βηματικών κινητήρων.

Τρόπος σύνδεσης	Αρ. καλωδίων (Leads)	Κύρια χαρακτηριστικά
Unipolar	5, 6 ή 8	Χαμηλό κόστος, αξιόπιστο, απλό, καλύτερο σε χαμηλές ταχύτητες
Bipolar series	4, 6 ή 8	Υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, χαμηλή ροπή σε ψηλές ταχύτητες
Bipolar half coil	6 ή 8	Συνδυασμός των bipolar series και bipolar parallel
Bipolar parallel	4 ή 8	Πιο επίπεδη καμπύλη ταχύτητας ροπής, μεγαλύτερη ροπή σε υψηλές ταχύτητες.



Εικόνα 3-12. Τρόποι ηλεκτρικής σύνδεσης βηματικών κινητήρων [21].

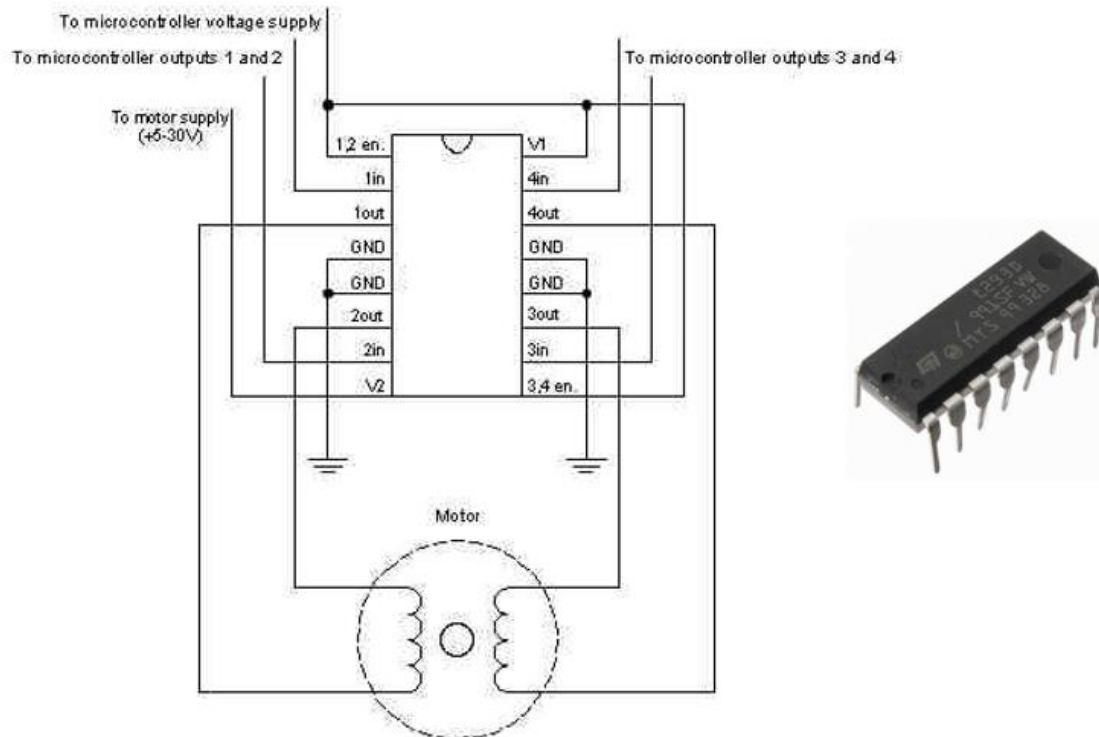
Οι μονοπολικοί οδηγοί (unipolar driver) αντί να αναστρέφουν το ρεύμα σε κάθε τύλιγμα απλά μεταφέρουν το ρεύμα από το ένα τύλιγμα στο άλλο. Ο μονοπολικός τρόπος οδήγησης βηματικού κινητήρα είναι απλούστερος στη λειτουργία και έχει χαμηλότερο κόστος. Παράγει όμως περίπου 30% λιγότερη ροπή από ένα ισοδύναμο διπολικό κινητήρα, καθώς χρησιμοποιούνται μόνο τα μισά τυλίγματα κάθε χρονική στιγμή. Οι μονοπολικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας.

Οι διπολικοί οδηγοί (bipolar driver) εναλλάσσουν συνεχώς την πολικότητα σε κάθε τύλιγμα για την κίνηση του άξονα. Οι διπολικοί κινητήρες παράγουν μεγαλύτερη ροπή από τους μονοπολικούς αλλά λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού τους συνήθως είναι ακριβότεροι. Οι διπολικοί κινητήρες δίδουν την δυνατότητα να συνδεθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα είτε με σύνδεση μισού τυλίγματος. Με τη σύνδεση σε σειρά επιτυγχάνεται υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες. Λόγω όμως της μεγάλης αντίστασης του τυλίγματος άρα και της μεγάλης αυτεπαγωγής του δεν επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες. Με την παράλληλη σύνδεση επιτυγχάνεται υψηλότερη ροπή σε υψηλότερες ταχύτητες ενώ μία ενδιάμεση λύση ανάμεσα στις προηγούμενες συνδέσεις είναι η σύνδεση μισού τυλίγματος. Επειδή συνδέεται μόνο το μισό τύλιγμα μικραίνει η αντίσταση του και έτσι μπορεί να αναπτύσσει μεγαλύτερη ταχύτητα από την σύνδεση bipolar series με μειωμένη όμως ροπή.

Ο τρόπος σύνδεσης που τελικά επιλέχθηκε ήταν bipolar parallel για τις δύο πρώτες αρθρώσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν κινητήρες 8 καλωδίων ενώ για την τρίτη άρθρωση επιλέχθηκε η σύνδεση ως bipolar series καθώς ο κινητήρας έχει 6 καλώδια.

3.4.2.2 Οδηγοί βηματικών κινητήρων

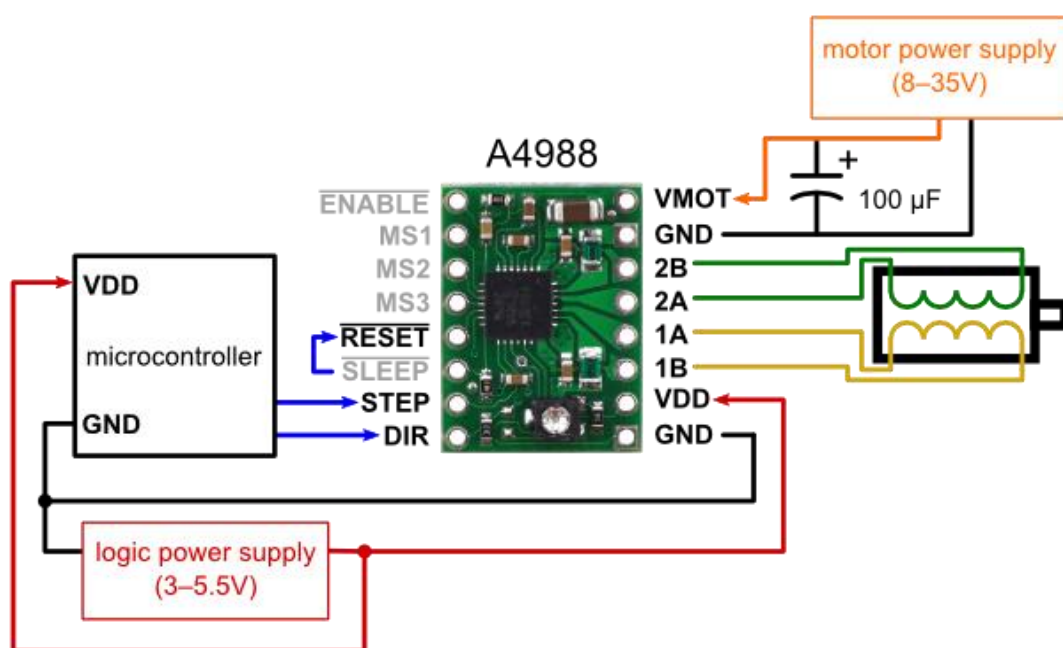
Αφού αποφασίστηκε ότι ο τρόπος σύνδεσης των κινητήρων θα είναι bipolar ξεκίνησαν οι πρώτες δοκιμές χρησιμοποιώντας μία γέφυρα H-Bridge L293D όπως στην Εικόνα 3-13. Η L293D είναι μία καλή και φθηνή λύση αλλά δεν υποστηρίζει οδήγηση με μικροβήματα (microstepping) ενώ σε περίπτωση που χρειάζεται οδήγηση περισσότερης τάσης (overvoltage) με περιορισμό της έντασης δεν διαθέτει κάποιο βοηθητικό κύκλωμα. Αρχικά δοκιμάστηκε με την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη Stepper του Arduino IDE με σύνδεση bipolar series.



Εικόνα 3-13. Κύκλωμα οδήγησης βηματικού κινητήρα με γέφυρα H-Bridge L293D.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στόχευσης με ταυτόχρονη μείωση κραδασμών και ταχύτητας αποφασίστηκε η οδήγηση να γίνει με microstepping. Κατά την οδήγηση με microstepping μειώνεται η διαθέσιμη ροπή. Για τον περιορισμό της μείωσης αυτής αποφασίστηκε η αύξηση της τάσης (overvoltage) στα 24V, το οποίο είναι το διπλάσιο από το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας των βηματικών κινητήρων και ταυτόχρονα είναι και η ονομαστική τάση λειτουργίας της κεραίας. Η αύξηση της τάσης επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς περιστροφής με ταυτόχρονη αύξηση της ροπής στρέψης, καθώς το ρεύμα μπορεί να εναλλάσσεται γρηγορότερα μεταξύ των πηνίων. Ωστόσο, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια τάσεις πάνω από την ονομαστική ισχύ ενός κινητήρα, το ρεύμα του πηνίου πρέπει να περιορίζεται δυναμικά ώστε να μην υπερβαίνει το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα.

Ένας φθηνός με αρκετές πληροφορίες στο διαδίκτυο, οδηγός βηματικού κινητήρα με σύνδεση bipolar (stepper driver) είναι ο A4988 της εταιρείας pololu. Μπορεί να οδηγήσει βηματικούς κινητήρες με 4, με 6 ή με 8 καλώδια. Κοστίζει περίπου τα διπλάσια χρήματα από μία H-Bridge αλλά διαθέτει ρυθμιζόμενο περιοριστή της έντασης του ρεύματος λειτουργίας, προστασία από υπερθέρμανση καθώς και 5 ρυθμίσεις microstepping (έως 1/16). Απαιτεί όμως προσοχή κατά την ηλεκτρική του σύνδεση διότι δεν διαθέτει προστασία ανάποδης πολικότητας. Η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα μπορεί να είναι από 8V – 36V ενώ αν η ένταση είναι έως 1A μπορεί να λειτουργήσει χωρίς ψύκτρα ή ροή αέρα. Η μέγιστη επιτρεπτή ένταση που μπορεί να διαχειριστεί είναι 2A ανά τύλιγμα. Η τάση λειτουργίας του είναι από 3 – 5.5V . Η ελάχιστη σύνδεση του με τον μικροελεγκτή φαίνεται στη Εικόνα 3-14.



Εικόνα 3-14. Ελάχιστη συνδεσμολογία του οδηγού βηματικού κινητήρα A4988 της Pololu [22]

Η παραπάνω συνδεσμολογία είναι η ελάχιστη για να κινηθεί ο κινητήρας. Λειτουργίες που υποστηρίζει ο οδηγός δεν είναι συνδεδεμένες στο παραπάνω σχήμα, όπως η δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του από τον ακροδέκτη enable, επανεκκίνησης από τον ακροδέκτη reset, αναμονής από τον ακροδέκτη sleep και η λειτουργία μικροβημάτων από τους ακροδέκτες MS1, MS2 και MS3.

Ο οδηγός αυτός χρησιμοποιεί κεραμικούς πυκνωτές χαμηλού ESR, γεγονός που τον καθιστά ευαίσθητο σε υπερτάσεις οι οποίες εμφανίζονται συνήθως όταν χρησιμοποιούνται μακριά καλώδια (>25cm). Υπό κανονικές συνθήκες και με μία τάση τροφοδοσίας του κινητήρα 12V οι υπερτάσεις μπορεί να ξεπερνάν τα 35V που είναι και το ανώτατο όριο για τον οδηγό αυτό με καταστροφικές συνέπειες. Ένας τρόπος προστασίας από αυτές τις υπερτάσεις είναι η τοποθέτηση ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή (100μF) ανάμεσα στα καλώδια τροφοδοσίας του κινητήρα και όσο πιο κοντά γίνεται στον οδηγό όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-14.

Για την οδήγηση του βηματικού κινητήρα απαιτούνται από τον μικροελεγκτή δύο σήματα. Το ένα ορίζει την κατεύθυνση (dir) και το άλλο είναι η εντολή για να κάνει ένα βήμα (step). Αν απαιτείται η ρύθμιση μικροβημάτων θα χρειαστεί η σύνδεση των MS1, MS2 και MS3 που φαίνονται στην Εικόνα 3-14 σε ψηφιακές εξόδους του μικροελεγκτή. Ανάλογα με την τιμή που θα έχει η κάθε έξοδος ρυθμίζονται τα μικροβήματα του κάθε κινητήρα σύμφωνα με τον Πίνακα 3-2.

Για την σωστή λειτουργία του κινητήρα, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται μικροβήματα, θα πρέπει το όριο του ρεύματος να ρυθμιστεί χαμηλότερα από το ονομαστικό έτσι ώστε ο περιοριστής ρεύματος να λειτουργεί και να δουλεύει ο κινητήρας σωστά σε όλες τις ρυθμίσεις μικροβημάτων χωρίς να χάνει βήματα (stall).

Πίνακας 3-2. Τιμές ακροδεκτών για ρύθμιση μικροβημάτων στον οδηγό A4988 της Pololu.

MS1	MS2	MS3	Μικροβήματα
Low	Low	Low	1
High	Low	Low	2
Low	High	Low	4
High	High	Low	8
High	High	High	16

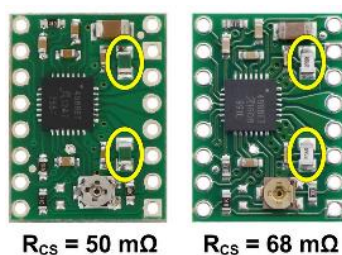
Η ρύθμιση για τον περιορισμό του ρεύματος γίνεται με την βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου που βρίσκεται πάνω στον οδηγό. Θα πρέπει να είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας με ένα αμπερόμετρο συνδεδεμένο σε σειρά με ένα τύλιγμα του. Έτσι μπορεί να μετρηθεί άμεσα η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο. Ο κινητήρας θα πρέπει να

είναι ρυθμισμένος σε πλήρη βήμα και ακινητοποιημένος δηλ. τα πηνία του να διαρρέονται από ρεύμα. Τότε θα πρέπει να ρυθμιστεί, με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου, η ένδειξη στο αμπερόμετρο ώστε να αντιστοιχεί στο 70% της ονομαστικής έντασης του κινητήρα. Θα πρέπει να περιορίζεται η ένταση σε αυτήν την τιμή με τον κινητήρα σε πλήρη βήμα γιατί σε ορισμένες περιπτώσεις με τον κινητήρα σε ρύθμιση μικροβημάτων η ένταση μπορεί να αυξηθεί έως 40% από την τιμή του αμπερομέτρου. Αφού ρυθμιστεί ο περιοριστής έντασης ρεύματος σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία μπορεί να γίνει εκ νέου δοκιμή με τον κινητήρα ρυθμισμένο στα 16 μικροβήματα. Σε περίπτωση αλλαγής της τάσης τροφοδοσίας του οδηγού (3 - 5.5V) θα πρέπει να επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία αφού η τάση αναφοράς που ρυθμίζει το όριο του ρεύματος είναι συνάρτηση της τάσης τροφοδοσίας.

Ένας άλλος τρόπος για την ρύθμιση του συγκεκριμένου οδηγού είναι υπολογίζοντας την τάση αναφοράς που αντιστοιχεί στο επιθυμητό όριο ρεύματος. Έπειτα περιστρέφοντας το ποτενσιόμετρο ρυθμίζεται η τάση αναφοράς η οποία μετριέται με την βοήθεια ενός βολτόμετρου συνδεδεμένου στον ακροδέκτη V_{REF} . Το μέγιστο όριο ρεύματος I_{MAX} συναρτήσει της τάσης αναφοράς V_{REF} είναι:

$$I_{MAX} = \frac{V_{REF}}{8 * R_{CS}}$$

Το R_{CS} είναι η τιμή της αντίστασης (Εικόνα 3-15) που χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του ρεύματος. Από τον Ιανουάριο του 2017 η τιμή της αντίστασης άλλαξε σε 0,068 Ω. από 0,05 Ω που ήταν, για βελτίωση του εύρους.



Εικόνα 3-15. Διαφορά μεταξύ νέου και παλαιού τύπου οδηγών βηματικών κινητήρων.

Από την παραπάνω εξίσωση η τάση αναφοράς θα είναι:

$$V_{REF} = 8 * I_{MAX} * R_{CS}$$

Οπότε, αν για παράδειγμα απαιτείται το όριο ρεύματος να είναι στο 1A και έχοντας την έκδοση των 68mΩ θα πρέπει η τάση αναφοράς να ρυθμιστεί στα 540mV.

Το μέγιστο όριο ρεύματος I_{MAX} είναι συνάρτηση του ρεύματος I_{CoilX} που διαρρέει κάθε πηνίο και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$I_{MAX} = \sqrt{I_{Coil1}^2 + I_{Coil2}^2}$$

3.4.3 Αισθητήρες

Για την εύρεση του διανύσματος στόχευσης είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης και του προσανατολισμού του πλωτού σταθμού καθώς, αυτός επηρεάζεται από το κυματικό δυναμικό. Θα χρειαστούν λοιπόν δύο διαφορετικές συσκευές. Μία συσκευή πλοήγησης, εν συντομία GPS (Global Positioning System), για την πληροφορία της θέσης και μία αδρανειακή μονάδα, εν συντομία IMU (Inertial Measurement Unit), για την πληροφορία του προσανατολισμού.

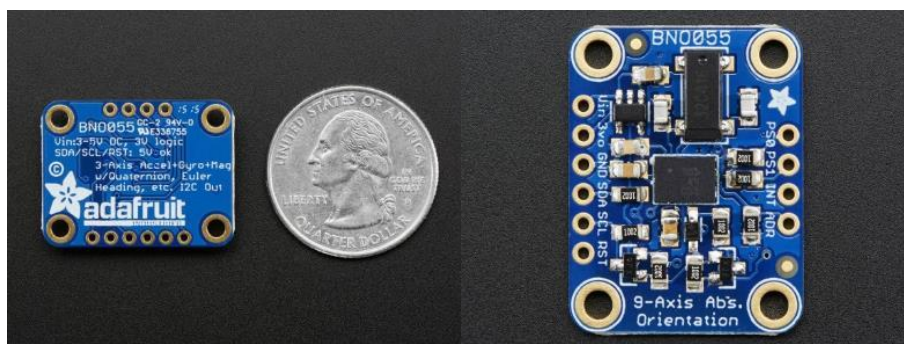
Η πληροφορία του προσανατολισμού απαιτεί αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την πληροφορία της θέσης. Σε ένα αγκυροβολημένο πλωτό σταθμό το σφάλμα της θέσης είναι περιορισμένο και πολύ μικρότερο από την απόσταση στόχευσης π.χ. μετακίνηση του πλωτού σταθμού 300 μέτρα ενώ η απόσταση στόχευσης είναι 5000 μέτρα. Με τη μη γνώση της πληροφορίας της θέσης εισάγεται ένα σφάλμα στόχευσης το οποίο ισούται με την απόσταση του πλωτού σταθμού από το σημείο πόντισης. Οπότε το μέγιστο σφάλμα περιορίζεται από το βάθος και το μήκος του αγκυροβολίου που με την σειρά τους περιορίζουν την μετακίνηση του πλωτήρα πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας. Στο παραπάνω παράδειγμα για να προκύψει το ίδιο σφάλμα στόχευσης χρειάζεται μόλις μία λάθος μέτρηση του προσανατολισμού κατά περίπου 3.5 μοίρες.

Ένας άλλος τύπος αισθητήρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την εύρεση του μηδενικού σημείου σε κάθε άξονα είναι ο διακόπτης – αισθητήρας εγγύτητας.

3.4.3.1 Αδρανειακή μονάδα (IMU)

Η αδρανειακή μονάδα που τελικά χρησιμοποιήθηκε είναι το Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055. Αυτή η IMU χρησιμοποιεί τον έξυπνο αισθητήρα BNO055 της Bosch, τον πρώτο μιας νέας οικογένειας αισθητήρων ονομαζόμενης ASSN (Application Specific Sensor Nodes). Πρόκειται για ένα αισθητήρα απόλυτου τρισδιάστατου προσανατολισμού 9 αξόνων ο οποίος είναι ένα SiP (System in Package), που έχει ενσωματωμένα επιταχυνσιόμετρα 14-bit στους τρεις άξονες, τρία γυροσκόπια 16-bit με εύρος ± 2000 deg/sec, ένα γεωμαγνητικό αισθητήρα τριών αξόνων, έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και έναν 32-bit cortex M0+ μικροελεγκτή που τρέχει το Bosch Sensortec sensor fusion software.

Η Adafruit κατασκεύασε το 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout (Εικόνα 3-16) το οποίο βασίζεται στο SiP BNO055 της Bosch έχοντας όμως προσθέσει κάποια εξαρτήματα όπως ένα ρυθμιστή τάσης στα 3,3V, ένα logic level shifting για το reset και το I²C, έναν εξωτερικό κρύσταλλο στα 32,768KHz (συνίσταται για καλύτερη απόδοση) και κάποιους επιπλέον ακροδέκτες που μπορούν να φανούν χρήσιμοι σε κάποιες περιπτώσεις.



Εικόνα 3-16. Ο αισθητήρας Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055

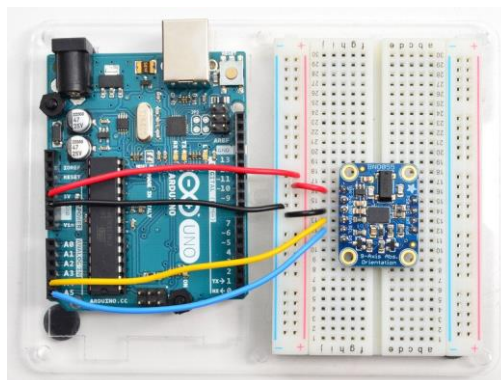
Τα δεδομένα που μπορούν να εξαχθούν από τον αισθητήρα είναι:

- Absolute Orientation (Euler Vector, 100Hz)
Three axis orientation data based on a 360° sphere
- Absolute Orientation (Quaternion, 100Hz)
Four point quaternion output for more accurate data manipulation
- Angular Velocity Vector (100Hz)
Three axis of 'rotation speed' in rad/s
- Acceleration Vector (100Hz)
Three axis of acceleration (gravity + linear motion) in m/s²
- Magnetic Field Strength Vector (20Hz)
Three axis of magnetic field sensing in micro Tesla (uT)

- Linear Acceleration Vector (100Hz)
Three axis of linear acceleration data (acceleration minus gravity) in m/s^2
- Gravity Vector (100Hz)
Three axis of gravitational acceleration (minus any movement) in m/s^2
- Temperature (1Hz)
Ambient temperature in degrees Celsius

Η επικοινωνία με τον Arduino πραγματοποιείται με το I²C πρωτόκολλο επικοινωνίας κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης Wire. Επίσης, χρησιμοποιούνται οι βιβλιοθήκες Adafruit_BNO055 και Adafruit_Sensor για την ανάγνωση του αισθητήρα και την απεικόνιση των τιμών σε μονάδες SI, αντίστοιχα.

Για την τροφοδοσία της IMU μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε 5V είτε 3.3V. Η επικοινωνία με τον Arduino πραγματοποιείται με δύο καλώδια (SDA και SCL). Οι αντιστάσεις που απαιτεί το I²C πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι ενσωματωμένες. Επίσης, διαθέτει έναν ακροδέκτη RST που χρησιμοποιείται για επανεκκίνηση (reset) του αισθητήρα. Στον ακροδέκτη INT δημιουργείται ένα σήμα (interrupt) όταν ανιχνευτεί κάποιο γεγονός στα επιταχυνσιόμετρα όπως πχ η κίνηση του αισθητήρα. Ο ακροδέκτης ADR χρησιμοποιείται για την αλλαγή της διεύθυνσης του αισθητήρα όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Οι ακροδέκτες PS0 και PS1 θα χρησιμοποιηθούν σε περίπτωση αναβάθμισης του firmware του αισθητήρα, οπότε δεν θα πρέπει να συνδεθούν.



Εικόνα 3-17. Η σύνδεση του αισθητήρα BNO055.

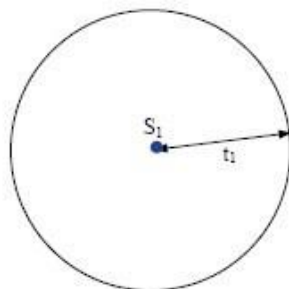
Ο αισθητήρας BNO055 περιλαμβάνει εσωτερικούς αλγορίθμους που τρέχουν στον ενσωματωμένο 32-bit μικροελεγκτή για τη διαρκή βαθμονόμηση των γυροσκοπίων, των επιταχυνσιόμετρων και των μαγνητόμετρων. Ο ακριβής τρόπος της διαδικασίας βαθμονόμησης δεν ανακοινώνεται από την εταιρία (black box). Η διαδικασία της βαθμονόμησης και της εύρεσης του πραγματικού Βορρά περιγράφεται στο κεφ. 5.1.2.

3.4.3.2 Συσκευή εντοπισμού παγκόσμιας θέσης (GPS)

Η συσκευή εντοπισμού παγκόσμιας θέσης GPS (Global Positioning System) χρησιμοποιείται για τον ακριβή υπολογισμό του γεωγραφικού πλάτους και του γεωγραφικού μήκους. Αρχικά αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ το 1973 για να παρέχει την ακριβή θέση του προσωπικού και των οχημάτων. Το σύστημα στη συνέχεια επεκτάθηκε και σήμερα χρησιμοποιείται για εμπορικούς και επιστημονικούς σκοπούς.

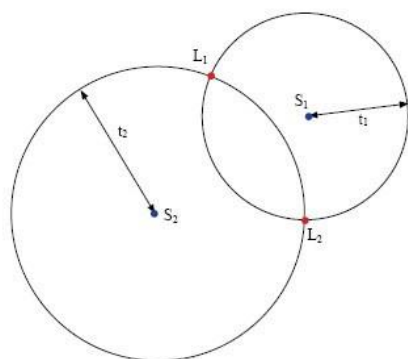
Το GPS βασίζεται σε 24 δορυφόρους που περιστρέφονται γύρω από τη γη 2 φορές το 24ωρο. Το δίκτυο αυτό των 24^{ων} δορυφόρων είναι γνωστό ως Navstar. Η ακριβής τροχιά των δορυφόρων και η χρήση ρολογιών ακριβείας επιτρέπει την εύρεση της θέσης του χρήστη με τριγωνισμό. Κάθε δορυφόρος μεταδίδει την ακριβή του θέση και τον ακριβή χρόνο από το ατομικό ρολόι που φέρει. Ο ακριβής χρόνος που απαιτείται από το GPS παρέχεται από ατομικά ρολόγια στο Ναυτικό Παρατηρητήριο των ΗΠΑ. Οι δορυφόροι συγχρονίζονται και εκπέμπουν όλοι ταυτόχρονα. Τα σήματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός και φτάνουν στο δέκτη σε ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους ανάλογα με την απόσταση μεταξύ του δέκτη και του κάθε δορυφόρου.

Αν είναι γνωστή η ακριβή θέση ενός δορυφόρου S_1 και ο χρόνος που πέρασε t_1 μέχρι το σήμα να φτάσει στο δέκτη τότε μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση από το δορυφόρο. Η θέση λοιπόν του δέκτη από έναν δορυφόρο θα είναι πάνω στην επιφάνεια ενός κύκλου (Εικόνα 3-18).



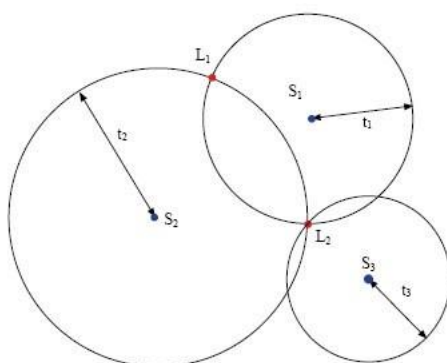
Εικόνα 3-18. Πληροφορία της θέσης από έναν δορυφόρο [23].

Ξέροντας ότι ο δέκτης βρίσκεται στη γη άρα πάνω στην επιφάνεια μιας σφαίρας συνδυάζοντας και τα δεδομένα από ένα δεύτερο δορυφόρο της ακριβής του θέσης S_2 και του χρόνου που πέρασε t_2 μέχρι το σήμα να φτάσει στο δέκτη, τότε η θέση του χρήστη θα είναι στα σημεία τομής των δύο κύκλων (Εικόνα 3-19). Άρα η θέση θα είναι ή το σημείο L_1 ή το σημείο L_2 .



Εικόνα 3-19. Πληροφορία της θέσης από δύο δορυφόρους.

Η πληροφορία λοιπόν ενός τρίτου δορυφόρου θα καθορίσει την ακριβή θέση του δέκτη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-20.



Εικόνα 3-20. Εντοπισμός της τοποθεσίας από τρεις δορυφόρους.

Για την εύρεση του υψομέτρου που βρίσκεται ο δέκτης θα χρειαστεί η πληροφορία από έναν τέταρτο δορυφόρο. Η σύνδεση με περισσότερους δορυφόρους θα βελτιώσει την ακρίβεια της τοποθεσίας.

Η μέτρηση από το GPS μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη όταν χρησιμοποιείται σε ανοιχτό χώρο όπου δεν υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στο δέκτη και τους δορυφόρους. Τα εμπόδια όπως κτίρια, βουνά κ.ά. θα προκαλέσουν σφάλμα στην ακρίβεια της τοποθεσίας που μπορεί να φτάσει και τα 30 μέτρα. Μέσα σε κτίριο ή τούνελ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το GPS καθώς δεν έχει ορατότητα στους απαραίτητους δορυφόρους. Το σήμα του GPS μπορεί να διαπεράσει υλικά όπως το γυαλί, το πλαστικό αλλά όχι υλικά όπως το σκυρόδεμα, το χώμα ή την πέτρα.

Η συσκευή GPS που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι το Venus GPS Logger (Venus638FLPx) της εταιρίας Sparkfun (Εικόνα 3-21).



Εικόνα 3-21. Η συσκευή GPS που χρησιμοποιήθηκε [24].

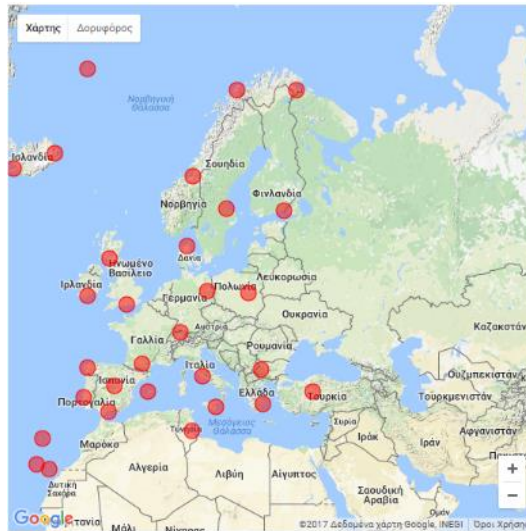
Αυτή η συσκευή GPS υποστηρίζει Satellite-Based Augmentation System (SBAS) [25] το οποίο είναι ένα βοηθητικό σύστημα που συμπληρώνει τα υπάρχοντα Global Navigation Satellite System (GNSS) όπως το Navstar των ΗΠΑ ή το Glonass της Ρωσίας. Το σύστημα SBAS αντισταθμίζει ορισμένα μειονεκτήματα των GNSS όσον αφορά την ακρίβεια, την ακεραιότητα (integrity), τη συνέχεια και την διαθεσιμότητα.

Το σύστημα SBAS αποτελείται από σταθερούς σταθμούς ανά την υφήλιο οι οποίοι βοηθάνε στην διόρθωση του σφάλματος άρα και στην βελτίωση της ακρίβειας. Αφού υπολογιστεί το σφάλμα του GNSS στην συνέχεια αποστέλλεται μήνυμα διόρθωσης με γεωστατικούς δορυφόρους που μπορούν να καλύψουν τεράστιες περιοχές. Πολλές χώρες λοιπόν για να βελτιώσουν την ακρίβεια των συσκευών GPS έχουν αναπτύξει το δικό τους σύστημα SBAS. Στην Εικόνα 3-22 φαίνονται τα διάφορα συστήματα SBAS ανά την υφήλιο.



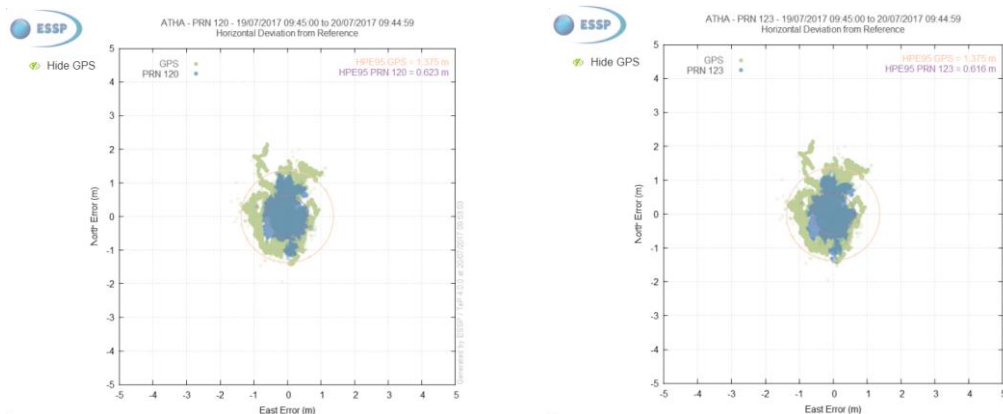
Εικόνα 3-22. Τα SBAS συστήματα ανά την υφήλιο.

Από διαδίκτυο δίδεται η δυνατότητα στον χρήστη να δει εκτός από τα σημεία που βρίσκονται οι σταθμοί (Εικόνα 3-23) και το σφάλμα της θέσης σε πραγματικό χρόνο αλλά και στο παρελθόν ανά περιοχή και ανά δορυφόρο (Εικόνα 3-24) [26].



Εικόνα 3-23. Σταθεροί σταθμοί του συστήματος EGNOS.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται το σφάλμα της θέσης από δύο δορυφόρους στις 19/7/2017 στην περιοχή της Αθήνας χρησιμοποιώντας το σύστημα EGNOS.



Εικόνα 3-24. Το σφάλμα του συστήματος EGNOS στην περιοχή της Αθήνας από δύο δορυφόρους στις 19/07/2017.

Το Venus GPS Logger εκτός από την καλή ακρίβεια (περίπου 2,5 μέτρα), υποστηρίζει ρυθμό δειγματοληψίας έως και 20Hz. Ο χρόνος κρύας εκκίνησης είναι 29 sec ενώ χωρίς τη διακοπή της τροφοδοσία του για την εκκίνηση χρειάζεται 1 sec. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχει είναι η μικρή κατανάλωση ενέργειας (29mA) και οι πολύ μικρές διαστάσεις του.

3.4.3.3 Διακόπτης – Αισθητήρας εγγύτητας (Proximity Switch or Sensor)

Ο επαγωγικός αυτός διακόπτης – αισθητήρας εγγύτητας είναι εφικτό να ανιχνεύσει ένα μεταλλικό αντικείμενο όταν βρεθεί κάτω από μία ορισμένη απόσταση από αυτόν. Ο λόγος λοιπόν που χρησιμοποιήθηκαν 3 από αυτούς τους αισθητήρες είναι για την εύρεση της αρχικής θέσης κάθε άρθρωσης κατά την εκκίνηση του μηχανισμού.

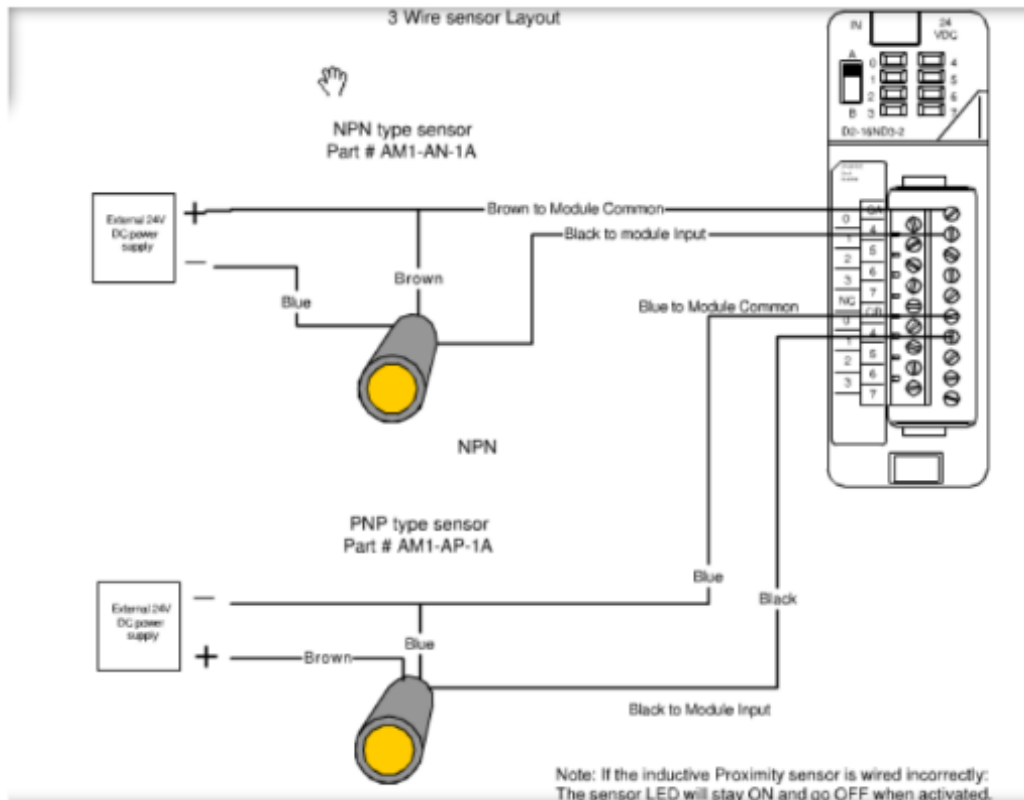
Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται σε ένα πηνίο και έναν ταλαντωτή που δημιουργούν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην περιοχή ανίχνευσης του αισθητήρα. Η παρουσία ενός μαγνητικού αντικειμένου στην περιοχή ανίχνευσης θα προκαλέσει μία μεταβολή του πλάτους ταλάντωσης η οποία αναγνωρίζεται από ένα κύκλωμα κατωφλιού (threshold circuit) κι έτσι μεταβάλλεται η έξοδος του αισθητήρα. Η απόσταση ανίχνευσης του αισθητήρα εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και το μέγεθος του πηνίου καθώς και από το υλικό προς ανίχνευση [27].

Ο τύπος των αισθητήρων εγγύτητας που χρησιμοποιήθηκαν είναι LJ12A3-4-Z/BY PNP Normally open (Εικόνα 3-25) και η τάση τροφοδοσίας τους κυμαίνεται από 6-36V σύμφωνα με το datasheet του αισθητήρα. Η απόσταση ανίχνευσης είναι στα 4mm με συχνότητα απόκρισης 500 Hz.



Εικόνα 3-25. Ο αισθητήρας εγγύτητας που χρησιμοποιήθηκε.

Δοκιμάζοντας τον αισθητήρα εγγύτητας σε εργαστηριακό πάγκο με την βοήθεια τροφοδοτικού και πολύμετρου αρχικά διαπιστώθηκε ότι αρκεί μία τροφοδοσία 5V για τις ανάγκες της εφαρμογής μας. Στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι η κατανάλωση ενέργειας αυξανόταν με την αύξηση της τάσης. Έτσι, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας καθώς πρόκειται για ένα αυτόνομο σύστημα, αποφασίστηκε να τροφοδοτηθούν οι αισθητήρες εγγύτητας κατευθείαν από τον μικροελεγκτή καθώς έχει έξοδο 5V. Η έξοδος του αισθητήρα εγγύτητας είναι αναλογική και εξαρτάται από την απόσταση του αντικειμένου από αυτόν. Στην Εικόνα 3-26 φαίνεται ο αισθητήρας εγγύτητας καθώς και η ηλεκτρική του σύνδεση ανάλογα με τον τύπο του (PNP ή NPN).



Εικόνα 3-26. Η συνδεσμολογία του αισθητήρα εγγύτητας ανάλογα τον τύπο του (PNP ή NPN).

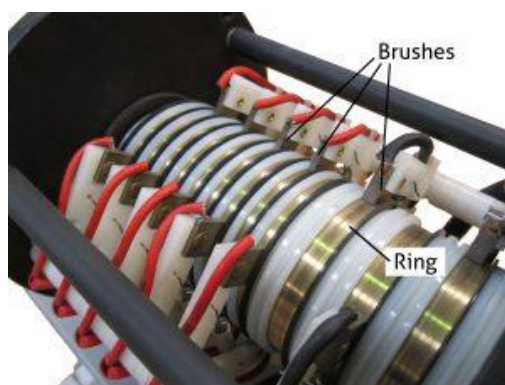
3.4.4 Δακτύλιοι ολίσθησης (Slip rings)

Για την απαραίτητη μεταφορά ρεύματος – σήματος με την ταυτόχρονη αποφυγή καταστροφής των ηλεκτρικών καλωδίων λόγω της περιστροφής των αρθρώσεων του μηχανισμού χρησιμοποιήθηκαν δακτύλιοι ολίσθησης (slip rings).

Βασικά χαρακτηριστικά ενός δακτυλίου ολίσθησης είναι η ισχύς που μεταφέρει, το πάχος και ο αριθμός των καλωδίων, ο θόρυβος που εισάγει, οι εξωτερικές διαστάσεις του, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του καθώς και ο κύκλος ζωής του. Ανάλογο βέβαια είναι και το κόστος του.

Πρόκειται για μία ηλεκτρομηχανική συσκευή που αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, όπου το ένα είναι περιστρεφόμενο και το άλλο σταθερό. Το περιστρεφόμενο τμήμα αποτελείται από μεταλλικούς δακτύλιους μονωμένους μεταξύ τους και συνδεδεμένους με ένα καλώδιο ο καθένας. Καθώς οι δακτύλιοι περιστρέφονται μεταφέρουν το ρεύμα στο σταθερό

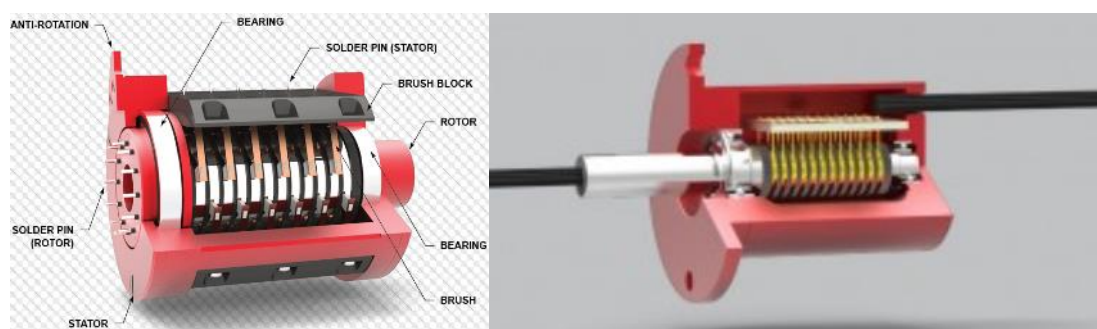
τμήμα το οποίο έχει αντίστοιχο αριθμό ψυκτρών όπου με την βοήθεια ελατηρίου βρίσκονται σε συνεχή επαφή με τους δακτύλιους καθώς αυτοί περιστρέφονται (Εικόνα 3-27). Κάθε ψύκτρα είναι συνδεδεμένη με ένα καλώδιο και βρίσκεται πάντα σε επαφή με ένα δακτύλιο. Με τον τρόπο αυτό συνδέονται καλώδια που μπορούν να μεταφέρουν ρεύμα από κάτι περιστρεφόμενο σε κάτι σταθερό χωρίς περιορισμό σε περιστροφές και χωρίς φθορές ή καταστροφή των καλωδίων.



Εικόνα 3-27. Το εσωτερικό μέρος ενός δακτυλίου ολίσθησης (slip ring) [28].

Ένα τρίτο σημαντικό εξάρτημα είναι το κέλυφος που επιτρέπει την στήριξη του αλλά και την προστασία του από το εξωτερικό περιβάλλον (σκόνη, υγρασία).

Στην Εικόνα 3-28 φαίνονται δύο διαφορετικοί τύποι δακτυλίων ολίσθησης. Στην αριστερή φωτογραφία τα καλώδια του κινητού μέρους περνάνε περιμετρικά από τον περιστρεφόμενο άξονα ενώ στην δεξιά φωτογραφία τα καλώδια περνάνε από οπή του περιστρεφόμενου άξονα. Οι δακτύλιοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι τέτοιου τύπου.



Εικόνα 3-28. Διαφορετικοί τύποι δακτυλίων ολίσθησης (slip ring).

Στο μηχανισμό χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις δακτύλιοι ολίσθησης 12 καλωδίων ο καθένας. Στην πρώτη άρθρωση χρησιμοποιήθηκε δακτύλιος ολίσθησης με μεγαλύτερο πάχος καλωδίων καθώς είχε την ανάγκη για περισσότερο ρεύμα περίπου 2 A, ενώ στις υπόλοιπες αρθρώσεις χρησιμοποιήθηκαν τρεις ίδιοι καθώς καλούνταν να μεταφέρουν περίπου 0,5 A ο καθένας. Οι δύο χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν

δεδομένα και ενέργεια στην κεραία ενώ ο τρίτος για την σύνδεση του βηματικού κινητήρα και του αισθητήρα εγγύτητας της τρίτης άρθρωσης.

Οι τρεις δακτύλιοι ολίσθησης που επιλέχθηκαν ήταν από την Adafruit (Εικόνα 3-29, αριστερά) με 12 καλώδια πάχους 28AWG [29]. Ο δακτύλιος ολίσθησης (Εικόνα 3-29, δεξιά) που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη άρθρωση χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μεταφέροντας υψηλό ρεύμα και έχει 12 καλώδια πάχους 16 AWG [30].



Εικόνα 3-29. Οι δακτύλιοι ολίσθησης (slip ring) που χρησιμοποιήθηκαν.

Για την εύρεση του κατάλληλου πάχους των καλωδίων χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας της Εικόνα 3-30 που είναι διαθέσιμος από την εταιρία Powerstream [31].

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission
10	0.1019	2.58828	0.9969	3.276392	55	15
11	0.0907	2.30378	1.26	4.1328	47	12
12	0.0808	2.05232	1.588	5.20864	41	9.3
13	0.072	1.8288	2.003	6.56984	35	7.4
14	0.0641	1.62814	2.525	8.282	32	5.9
15	0.0571	1.45034	3.184	10.44352	28	4.7
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	22	3.7
17	0.0453	1.15062	5.064	16.60992	19	2.9
18	0.0403	1.02362	6.385	20.9428	16	2.3
19	0.0359	0.91188	8.051	26.40728	14	1.8
20	0.032	0.8128	10.15	33.292	11	1.5
21	0.0285	0.7239	12.8	41.984	9	1.2
22	0.0253	0.64516	16.14	52.9392	7	0.92
23	0.0226	0.57404	20.36	66.7808	4.7	0.729
24	0.0201	0.51054	25.67	84.1976	3.5	0.577
25	0.0179	0.45466	32.37	106.1736	2.7	0.457
26	0.0159	0.40386	40.81	133.8568	2.2	0.361
27	0.0142	0.36068	51.47	168.8216	1.7	0.288
28	0.0126	0.32004	64.9	212.872	1.4	0.226
29	0.0113	0.28702	81.83	268.4024	1.2	0.182
30	0.01	0.254	103.2	338.496	0.88	0.142

Εικόνα 3-30. Απόσπασμα από πίνακα εκλογής κατάλληλου πάχους καλωδίων [31].

3.4.5 Επιλογή κεραίας

Η κεραία που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι η NanoBeam NBE-M5-16 της Ubiquiti (Εικόνα 3-31) λόγω των αρκετά μικρών διαστάσεων και βάρους σε σχέση με την ισχύ της. Έχει διαστάσεις 140x140x54 mm συμπεριλαμβανομένης της βάσης και το βάρος της είναι 320 g. Το κέρδος της είναι 16dBi, τροφοδοτείται με 24V, 0.5A και η μέγιστη κατανάλωση είναι 6W. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή μπορεί να μεταφέρει δεδομένα σε απόσταση 10+ km.



Εικόνα 3-31. Η κατευθυντική κεραία που χρησιμοποιήθηκε.

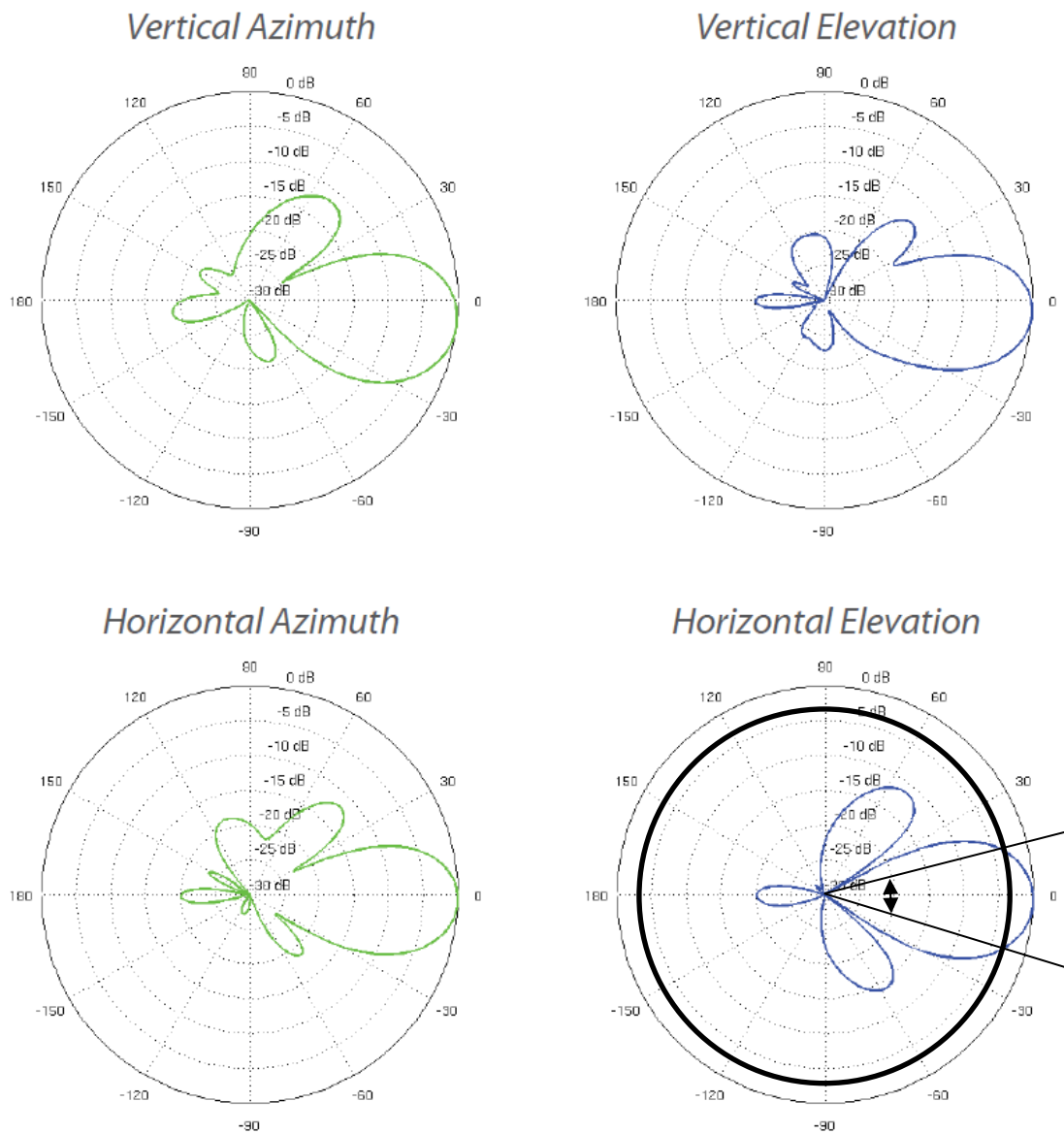
Η ηλεκτρική τροφοδοσία της κεραίας και η μεταφορά των δεδομένων γίνεται μέσω ενός καλωδίου POE (Power Over Ethernet) με συνδεσμολογία mode B. Για να περάσει το σήμα και η τροφοδοσία από τους δακτύλιους ολίσθησης χρειάστηκε να κοπεί το καλώδιο POE και να ξανασυνδεθεί. Ο τερματισμός των καλωδίων έγινε με τη βοήθεια του πίνακα της Εικόνα 3-32.

802.3af Standards A and B from the power sourcing equipment perspective

Pins at switch	T568A color	T568B color	10/100 mode B, DC on spares	10/100 mode A, mixed DC & data	1000 (1 gigabit) mode B, DC & bi-data	1000 (1 gigabit) mode A, DC & bi-data
Pin 1	White/green stripe	White/orange stripe	Rx +	Rx + DC +	TxRx A +	TxRx A + DC +
Pin 2	Green solid	Orange solid	Rx -	Rx - DC +	TxRx A -	TxRx A - DC +
Pin 3	White/orange stripe	White/green stripe	Tx +	Tx + DC -	TxRx B +	TxRx B + DC -
Pin 4	Blue solid	Blue solid		DC + Unused	TxRx C +	DC + TxRx C +
Pin 5	White/blue stripe	White/blue stripe		DC + Unused	TxRx C -	DC + TxRx C -
Pin 6	Orange solid	Green solid	Tx -	Tx - DC -	TxRx B -	TxRx B - DC -
Pin 7	White/brown stripe	White/brown stripe		DC - Unused	TxRx D +	DC - TxRx D +
Pin 8	Brown solid	Brown solid		DC - Unused	TxRx D -	DC - TxRx D -

Εικόνα 3-32. Συνδεσμολογίες καλωδίων POE [32].

Από τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας (Εικόνα 3-33) φαίνεται ότι οι λοβοί εκπομπής και λήψης είναι λίγο διαφορετικοί και λίγο μετατοπισμένοι ανάλογα με την πόλωση αν είναι οριζόντια ή κάθετη. Όμως και στις δύο περιπτώσεις το εύρος δέσμης (beamwidth) της κεραίας κυμαίνεται από $\pm 12,5^\circ$ έως $\pm 15^\circ$.



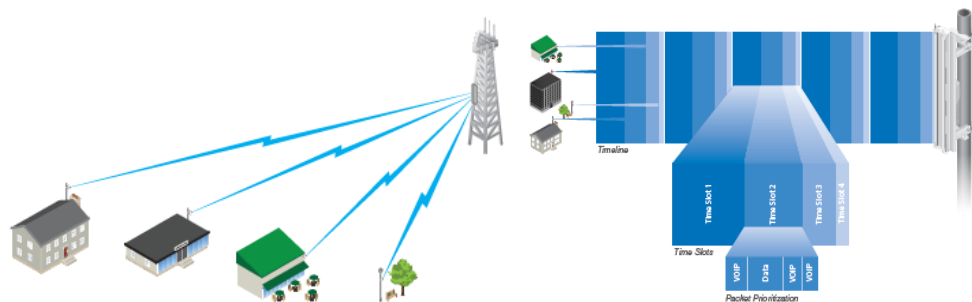
Εικόνα 3-33. Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας.

Λόγω του στενού εύρους δέσμης που έχει μία κατευθυντική κεραία μπλοκάρονται όλα τα ραδιοκύματα που είναι έξω από αυτό το εύρος. Έτσι βελτιώνεται η θωράκιση του σήματος έναντι στο θόρυβο που προκαλείτε από άλλα παρόμοια δίκτυα που ενδεχομένως εκπέμπουν στην ίδια περιοχή.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης κεραίας είναι ότι υποστηρίζεται από κάποια ελεύθερα λογισμικά που έχει αναπτύξει η εταιρία Ubiquiti όπως το:

- AirMax

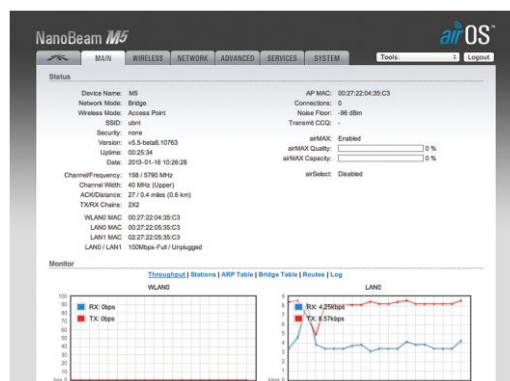
Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο Wi-Fi, το Ubiquiti's Time Division Multiple Access (TDMA) airMAX protocol επιτρέπει σε κάθε χρήστη να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα χρησιμοποιώντας προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα προγραμματισμένα από ένα έξυπνο ελεγκτή AP (Access Point). Με αυτή τη μέθοδο εξαλείφεται η συμφόρηση του κόμβου και μεγιστοποιείται ο χρόνος εκπομπής προσφέροντας σημαντική βελτίωση στην καθυστέρηση του σήματος σε σχέση με άλλα συστήματα της ίδιας κατηγορίας.



Εικόνα 3-34. Το AirMax της Ubiquiti.

- AirOS

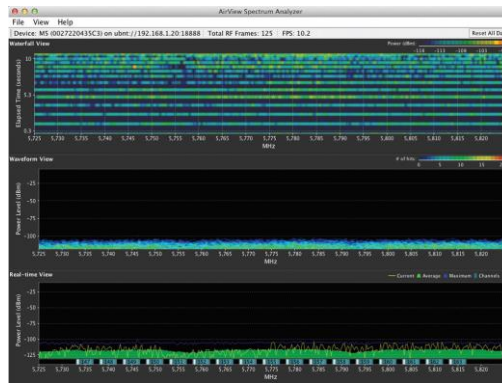
Πρόκειται για ένα πολύ ανεπτυγμένο firmware της Ubiquiti. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο που δεν απαιτείται εκπαίδευση από το χρήστη με σκοπό της σύνδεση πολλαπλών δικτύων.



Εικόνα 3-35. Το AirOS της Ubiquiti.

- AirView

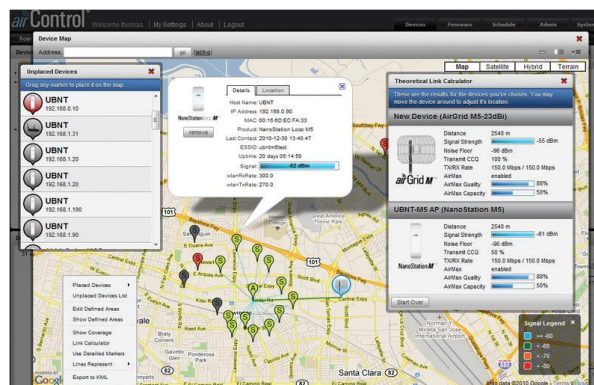
Πρόκειται για ένα προηγμένο αναλυτή του φάσματος πραγματικού χρόνου (real-time spectrum analyzer). Έτσι δίδεται η δυνατότητα στο χρήστη να μπορεί να δει σε πραγματικό χρόνο τυχόν θόρυβο ή παρεμβολές στο σήμα και να ελέγξει ή και να επανασχεδιάσει το δίκτυο του ως προς την ενέργεια που καταναλώνει σε κάθε συχνότητα ή συνολικά.



Εικόνα 3-36. Το AirView της Ubiquiti.

- AirControl

Είναι μία πανίσχυρη και διαισθητική web-based εφαρμογή διαχείρισης δικτύων που λειτουργεί μέσω (web-server network management application). Επιτρέπεται έτσι στους χρήστες να διαχειρίζονται ολόκληρα δίκτυα συσκευών Ubiquiti. Παρέχεται χάρτης με τις συνδεδεμένες συσκευές, παρακολούθηση της κατάστασης τους, αναβάθμιση firmware, πρόσβαση μέσω Web με user interface, ομαδική διαχείριση συσκευών και εκτέλεση προγραμματισμένων εργασιών.



Εικόνα 3-37. Το AirControl της Ubiquiti.

Περισσότερες πληροφορίες και χαρακτηριστικά για την συγκεκριμένη κεραία μπορούν να βρεθούν στο [33].

3.4.6 Εξαρτήματα μετάδοσης κίνησης

Για την μετάδοση της κίνησης χρησιμοποιήθηκαν έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) και οδοντωτοί ιμάντες με τροχαλίες.

Οι οδοντωτοί ιμάντες επιλέχθηκαν αφενός γιατί μειώνουν τους κραδασμούς που δημιουργούν οι βηματικοί κινητήρες και αφετέρου επειδή έχουν σχεδόν μηδενικό τζόγο (zero-backlash). Η μείωση του τζόγου προκύπτει από την ελαστικότητα που έχουν τα δόντια του ιμάντα σε συνδυασμό με την συνεχή εμπλοκή τους με το λιγότερο 4 δόντια της μικρής τροχαλίας.

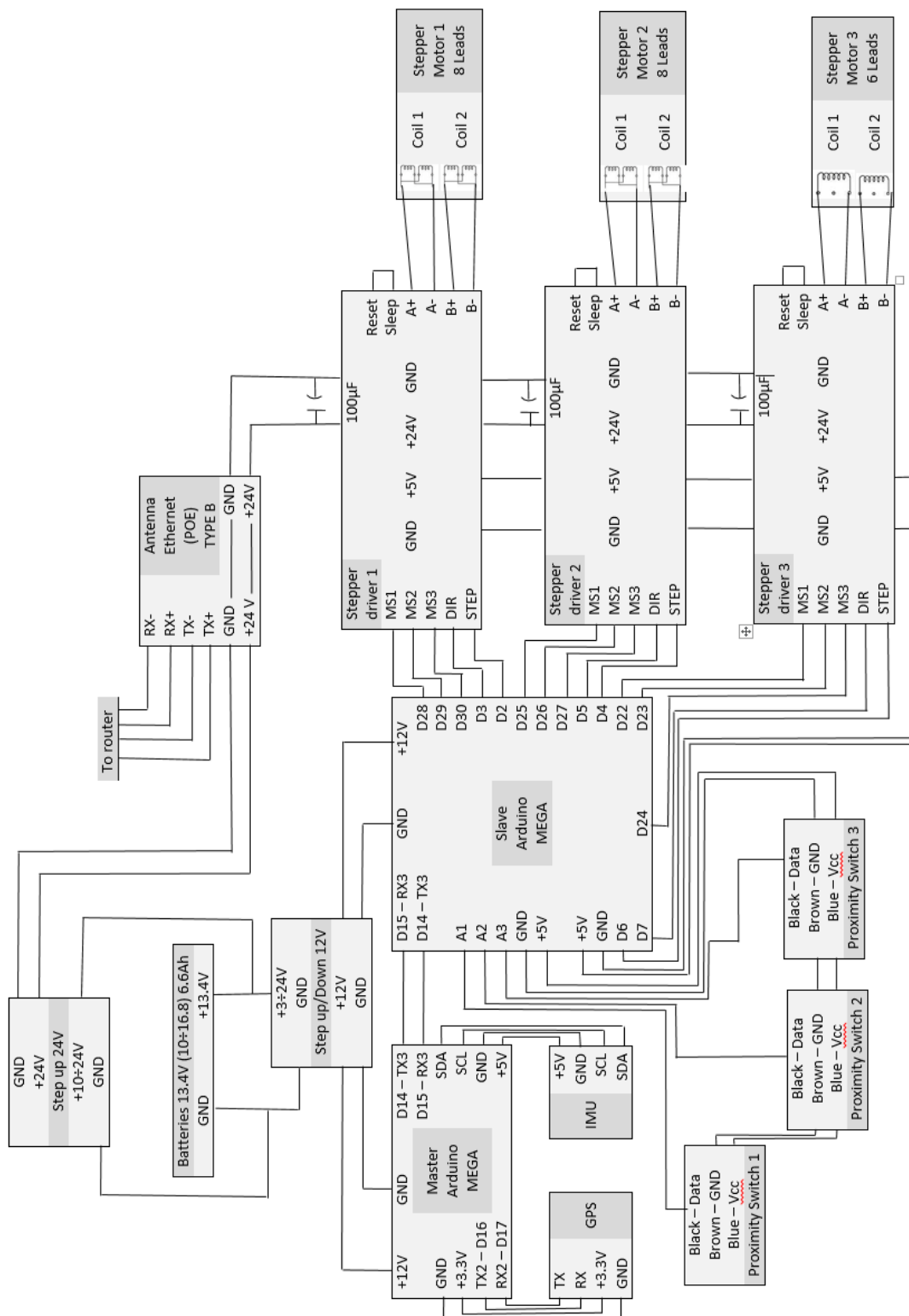
Τα έδρανα κυλίσεως (ρουλεμάν) που χρησιμοποιήθηκαν είναι χαμηλού προφίλ για την διατήρηση του βάρους σε χαμηλά επίπεδα. Η ύπαρξη καλωδίων που περνούν μέσα από τους άξονες μετάδοσης κίνησης δημιουργεί την ανάγκη χρησιμοποίησης ρουλεμάν με σχετικά μεγάλη εσωτερική διάμετρο, τα οποία όμως αντέχουν μεγάλα φορτία για την εφαρμογή μας. Έτσι επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ρουλεμάν χαμηλού προφίλ (με την μικρότερη εξωτερική διάμετρο για δεδομένη εσωτερική) για την διατήρηση του όγκου και του βάρους σε χαμηλά επίπεδα.

Για τη μετάδοση κίνησης της τρίτης άρθρωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο ρουλεμάν τύπου 61802-2Z με διαστάσεις $d=15$, $D=24$, $B=5$ mm, ένας ζεύγος οδοντωτών τροχαλιών (48 – 16 δόντια) με σχέση μετάδοσης 3:1 (κινούμενος προς κινητήριος άξονας) και ένας οδοντωτός ιμάντας 80 δοντιών με pitch 2.5mm, πλάτος 6mm και περίμετρο 200mm.

Για τη δεύτερη άρθρωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ρουλεμάν τύπου 61804-2RS1 με διαστάσεις $d=20$, $D=32$, $B=7$ mm, ένας ζεύγος οδοντωτών τροχαλιών (60 – 15 δόντια) με σχέση μετάδοσης 4:1 και ένας οδοντωτός ιμάντας 132 δοντιών με pitch 2.5mm, πλάτους 6mm και περίμετρο 330mm.

Στην πρώτη άρθρωση η οποία είναι και αυτή με τα μεγαλύτερα φορτία χρησιμοποιήθηκαν δύο ρουλεμάν τύπου 6805-2RS με διαστάσεις $d=25$, $D=37$, $B=7$ mm, τοποθετημένα μεταξύ τους στην μεγαλύτερη απόσταση που επέτρεπε το μήκος των καλωδίων του slip ring. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ένας ζεύγος οδοντωτών τροχαλιών (60 – 15 δόντια) με σχέση μετάδοσης 4:1 και ένας οδοντωτός ιμάντας 92 δοντιών με pitch 2.5mm, πλάτους 6mm και περίμετρο 230mm.

3.5 Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικών συστημάτων



Εικόνα 3-38. Ηλεκτρικό σχέδιο της κατασκευής.

Κεφάλαιο

4

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η κινηματική ανάλυση και η προσομοίωση του συστήματος στόχευσης. Αρχικά επιλύεται το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, υπολογίζεται το διάλυμα στόχευσης και ο επιθυμητός πίνακας στροφής και επιλύεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για την εύρεση των γωνιών των αρθρώσεων. Στη συνέχεια γίνεται μία ανάλυση των σφαλμάτων της στόχευσης και στο τέλος πραγματοποιείται ο έλεγχος της κινηματικής ανάλυσης με την βοήθεια του Matlab και κατάλληλου προγράμματος.

4. Κινηματική ανάλυση - προσομοίωση

Η κινηματική ανάλυση του συστήματος αφορά την επίλυση τριών προβλημάτων. Αυτά είναι το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, ο υπολογισμός του επιθυμητού πίνακα στροφής και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα.

Με την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος προσδιορίζεται η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου ως προς το αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων, γνωρίζοντας τη θέση της κάθε άρθρωσης καθώς επίσης τη θέση και τον προσανατολισμό του πλωτού σταθμού. Η επίλυση του πραγματοποιήθηκε χωρίζοντας το σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος

τοποθετούνται πλαίσια συντεταγμένων στα σημεία ενδιαφέροντος και προσδιορίζεται η θέση και ο προσανατολισμός του καρπού (W) ως προς το αδρανειακό πλαίσιο. Στο δεύτερο μέρος τοποθετούνται τα πλαίσια συντεταγμένων στον σφαιρικό καρπό χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μέθοδο των D-H parameter κατά Graig [34] και προσδιορίζεται ο προσανατολισμός του άκρου ως προς το αδρανειακό πλαίσιο, δεδομένου ότι το αδρανειακό πλαίσιο του σφαιρικού καρπού συμπίπτει με το σημείο του καρπού (W).

Για τον υπολογισμό του επιθυμητού πίνακα στροφής αρχικά υπολογίζεται το διάνυσμα στόχευσης το οποίο αποτελεί και την τρίτη στήλη του, αφού πρώτα μετατραπεί σε μοναδιαίο. Το διάνυσμα πόλωσης αποτελεί τη δεύτερη στήλη του επιθυμητού πίνακα στροφής και υπολογίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης του επιπέδου ενώ η πρώτη στήλη υπολογίζεται με την βοήθεια του εξωτερικού γινομένου. Στη συνέχεια ο επιθυμητός πίνακας στροφής εκφράζεται ως προς το σημείο του καρπού (W).

Η επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος γίνεται με τη χρήση γωνιών ZYZ Euler προσδιορίζοντας τη γωνία της κάθε άρθρωσης που τοποθετεί το άκρο στον επιθυμητό προσανατολισμό σε σχέση με το σημείο του καρπού (W). Για την επίλυση του αρχικά εκφράστηκε ο επιθυμητός πίνακας στροφής σαν γινόμενο των πινάκων στροφής κάθε άρθρωσης και στη συνέχεια με την μέθοδο του αντίστροφου ομογενούς μετασχηματισμού προέκυψαν 9 εξισώσεις. Έπειτα έγινε επιλογή των κατάλληλων ζευγών εξισώσεων ώστε να μπορούν να εξαχθούν οι τιμές και των τριών αρθρώσεων.

Η προσομοίωση της κινηματικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος στο Matlab. Με το πρόγραμμα αυτό επιλύεται το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, υπολογίζεται ο επιθυμητός πίνακας στροφής, επιλύεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα και εκτυπώνεται το αποτέλεσμα, τροφοδοτώντας το φυσικά με τα απαραίτητα δεδομένα όπως πχ δεδομένα από την IMU και από το GPS.

4.1 Ευθύ κινηματικό πρόβλημα

Για την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος ορίστηκε ένα σταθερό πλαίσιο συντεταγμένων (S , Sea) το οποίο θα είναι κάθε φορά το σημείο πόντισης του Πλωτού Ωκεανογραφικού Μετεωρολογικού Σταθμού (Π.Ω.Μ.Σ.) καθώς και ένα πλαίσιο (B , Body) πάνω στον Π.Ω.Μ.Σ.. Λόγω του ότι ο Π.Ω.Μ.Σ. (B) είναι αγκυροβολημένος στο πλαίσιο (S)

δύναται να πλέει μέσα στα όρια ενός προκαθορισμένου κύκλου πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο κύκλος που θα δύναται να πλέει καθορίζεται κάθε φορά από το βάθος του σημείου πόντισης και από το μήκος του αγκυροβολίου.

Παράδειγμα:

Αν το βάθος στο σημείο πόντισης (S) είναι 200 m και το μήκος του αγκυροβολίου 300 m, τότε ο Π.Ω.Μ.Σ. θα μπορεί να κινηθεί γύρω από το σημείο πόντισης στην επιφάνεια της θάλασσας σε μία ακτίνα 223.6 m.

Σύμφωνα με το πυθαγόρειο θεώρημα θα είναι:

$$\text{Μήκος αγκυροβολίου}^2 = \text{Βάθος σημείου}^2 + \text{Ακτίνα κίνησης}^2$$

Άρα

$$300^2 = 200^2 + \text{Ακτίνα κίνησης}^2 \Leftrightarrow \text{Ακτίνα κίνησης} = \sqrt{300^2 - 200^2} \Leftrightarrow$$

$$\text{Ακτίνα κίνησης} = 223.6 \text{ m}$$

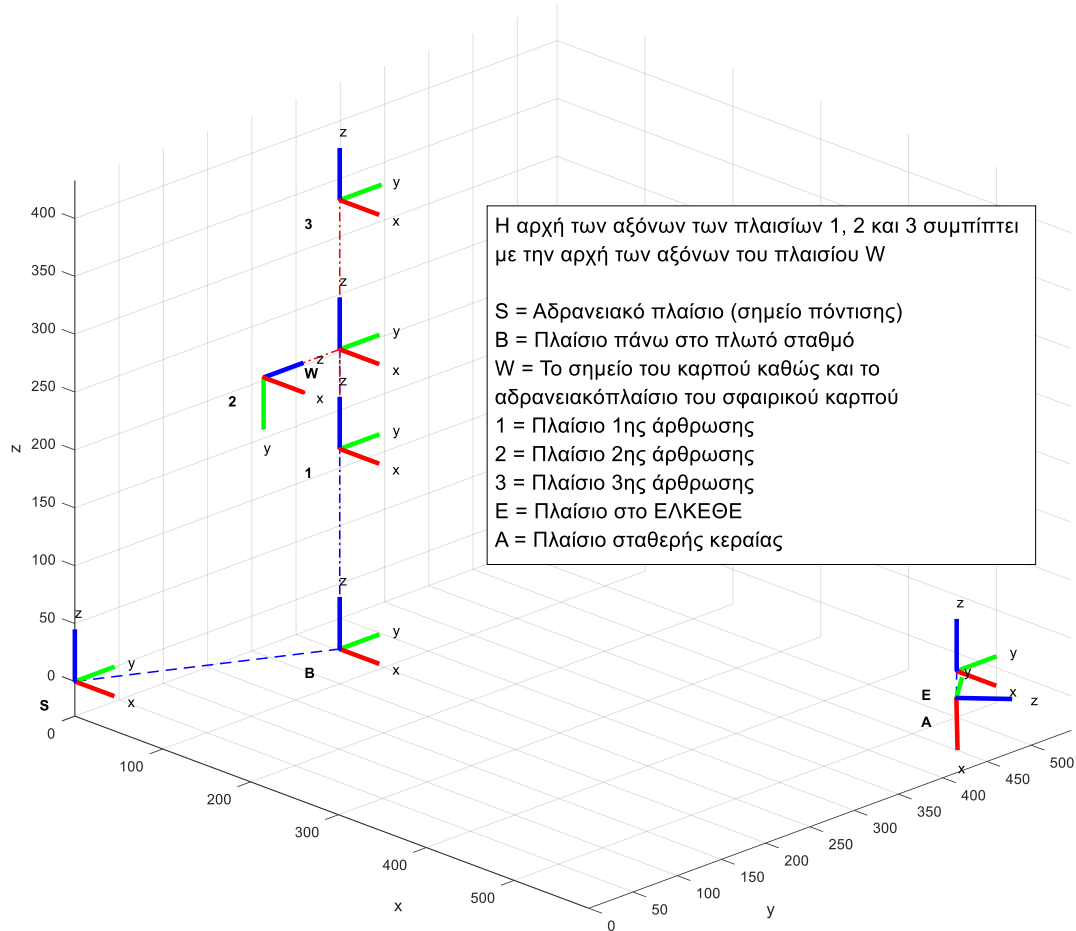
Τοποθετήθηκε επίσης ένα σταθερό πλαίσιο (E) στο ΕΛΚΕΘΕ καθώς και ένα πλαίσιο (A, Antenna) για την σταθερή κεραία. Το πλαίσιο της σταθερής κεραίας (A) τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε τα αρνητικά του άξονα Z να σημαδεύουν πάντα στο σημείο πόντισης (S) αφού γύρω από αυτό κινείται ο Π.Ω.Μ.Σ.. Ο προσανατολισμός του πλαισίου (A) θα πρέπει να αλλάζει κάθε φορά που γίνεται ανέλκυση και επαναπόντισή του αγκυροβολίου (για λόγους συντήρησης) σύμφωνα με τις νέες συντεταγμένες του σημείου πόντισης (S).

Πίνακας 4-1. Συμβολισμοί πλαισίων αναφοράς.

Όνομα πλαισίου	Επεξήγηση
S	Αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς (Sea)
E	Σταθερό πλαίσιο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.
A	Σταθερό πλαίσιο της κεραίας προσανατολισμένο πάντα στο (S)
B	Κινητό πλαίσιο πάνω στον Π.Ω.Μ.Σ.
W	Κινητό πλαίσιο πάνω στο Wrist του σφαιρικού καρπού
1	1 ^η άρθρωση του σφαιρικού καρπού
2	2 ^η άρθρωση του σφαιρικού καρπού
3	3 ^η άρθρωση του σφαιρικού καρπού

Για την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος θεωρήθηκε σταθερή η θέση και ο προσανατολισμός των πλαισίων S (Sea), E (ΕΛΚΕΘΕ), A (Antenna). Ενώ τα πλαίσια B (Body), W (Wrist) καθώς και τα πλαίσια των αρθρώσεων του σφαιρικού καρπού μπορούν να μετακινηθούν και να περιστραφούν κατά τους άξονες X, Y, Z του σταθερού πλαισίου (S).

Τοποθέτηση πλαισίων συντεταγμένων



Εικόνα 4-1. Ορισμός πλαισίων στα σημεία ενδιαφέροντος.

Το πλαίσιο του ΕΛΚΕΘΕ (E) ως προς το πλαίσιο αναφοράς (S) έχει τον ίδιο προσανατολισμό και διαφέρει μόνο ως προς την θέση κατά X, Y, Z. Άρα:

$$g_{SE} = I * \text{trans}(X_{eIk}, Y_{eIk}, Z_{eIk})$$

Όπου:

X, Y, Z_{eIk} = Απόσταση του ΕΛΚΕΘΕ από το σημείο πόντισης

I = Μοναδιαίος πίνακας

Όπως έχει αναφερθεί το σταθερό σημείο πόντισης (S) θα αλλάζει ανά διαστήματα λόγω συντήρησης του Π.Ω.Μ.Σ.. Η στόχευση κάθε φορά της σταθερής κεραίας (A) προς το σημείο πόντισης (S) θα γίνεται χειροκίνητα με την βοήθεια οργάνων όπως η πυξίδα, το κλινοόμετρο και το αλφάδι. Το πλαίσιο της σταθερής κεραίας (A) ως προς το ΕΛΚΕΘΕ (E) έχει: μία μετατόπιση κατά τους άξονες XYZ του πλαισίου (E),

μία στροφή γύρω από τον Z άξονα του τρέχον πλαισίου για αζιμουθιακή στόχευση,
 μία στροφή κατά γωνία $\pi/2$ γύρω από τον Y άξονα του τρέχον πλαισίου,
 μία στροφή γύρω από τον Y άξονα του τρέχον πλαισίου για υψομετρική στόχευση.

Οπότε:

$$g_{EA} = \text{trans}(X_{\text{ant}}, Y_{\text{ant}}, Z_{\text{ant}}) * \text{rotz}(A) * \text{roty}\left(\frac{\pi}{2}\right) * \text{roty}(Y)$$

Όπου:

X, Y, Z_{ant} = Απόσταση της σταθερής κεραίας από το ΕΛΚΕΘΕ

A = Αζιμουθιακή στόχευση = $\text{atan2}(Y_{\text{elk}} + Y_{\text{ant}}, X_{\text{elk}} + X_{\text{ant}})$

Y = Υψομετρική στόχευση = $\text{atan2}\left(Z_{\text{elk}} + Z_{\text{ant}}, \sqrt{(X_{\text{elk}} + X_{\text{ant}})^2 + (Y_{\text{elk}} + Y_{\text{ant}})^2}\right)$

Άρα η σταθερή κεραία (A) ως προς το πλαίσιο αναφοράς (S) θα είναι:

$$g_{SA} = g_{SE} * g_{EA}$$

Το πλαίσιο (B) και το πλαίσιο (W) βρίσκονται πάνω στον Π.Ω.Μ.Σ. και διαφέρουν μόνο κατά τον άξονα Z του πλαισίου (B). Ο Π.Ω.Μ.Σ. μπορεί να μετακινηθεί προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς και να περιστραφεί γύρω και από τους τρεις άξονες λόγω της επίδρασης του κυματικού δυναμικού. Η θέση και ο προσανατολισμός του Π.Ω.Μ.Σ. είναι γνωστά από το GPS και την IMU, αντίστοιχα. Η έξοδος από την IMU είναι σε γωνίες Euler (yaw, pitch, roll). Χρησιμοποιώντας λοιπόν γωνίες Euler (ZYX) ο Π.Ω.Μ.Σ ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S) θα είναι:

$$g_{SB} = \text{trans}(X_{\text{gps}}, Y_{\text{gps}}, Z_{\text{gps}}) * \text{rotz}(\text{yaw}) * \text{roty}(\text{pitch}) * \text{rotx}(\text{roll})$$

Όπου:

X, Y, Z_{gps} = Απόσταση του Π. Ω. Μ. Σ. (B) από το σημείο πόντισης (S)

yaw, pitch, roll = Γωνίες Euler γύρω από άξονες ZYX αντίστοιχα του πλαισίου (B)

Ενώ το πλαίσιο (W) ως προς το (B) θα είναι :

$$g_{BW} = \text{trans}(X_{\text{link}}, Y_{\text{link}}, Z_{\text{link}})$$

Όπου:

X, Y, Z_{link} = Απόσταση του πλαισίου Wrist (W) από το πλαίσιο (B)

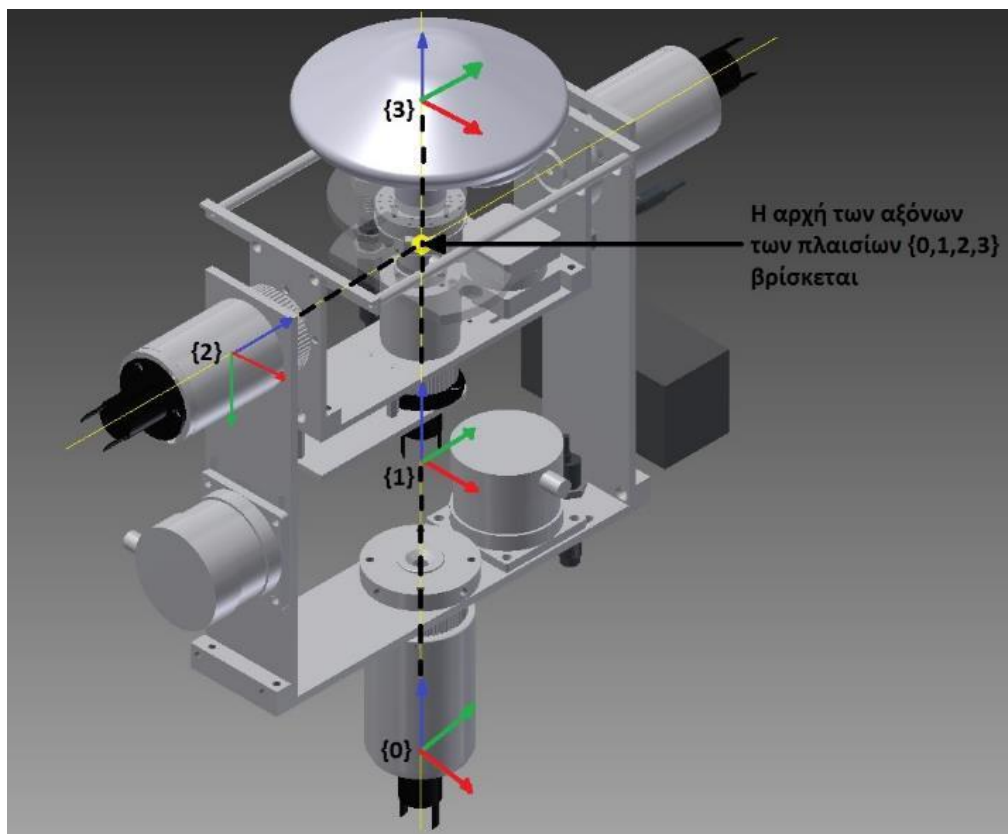
Άρα το πλαίσιο (W) ως προς το (S) θα είναι:

$$g_{SW} = g_{SB} * g_{BW}$$

Στο σφαιρικό καρπό οι άξονες Z όλων των πλαισίων των αρθρώσεων τέμνονται στο σημείο του καρπού W (Wrist). Για απλοποίηση του προβλήματος έχουν μεταφερθεί και τα τρία πλαίσια των αρθρώσεων στο σημείο του καρπού (W). Αφού λοιπόν η θέση όλων των πλαισίων του μηχανισμού είναι η ίδια, η διαφορά μεταξύ των ομογενών μετασχηματισμών θα βρίσκεται μόνο στον πίνακα στροφής.

Πίνακας 4-2. Πίνακας D-H παραμέτρων κατά Graig για τον σφαιρικό καρπό.

$\{i-1\} \rightarrow \{i\}$	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	Θ_i
$\{W\} \rightarrow \{1\}$	0	0	0	Θ_1
$\{1\} \rightarrow \{2\}$	-90	0	0	Θ_2
$\{2\} \rightarrow \{3\}$	90	0	0	Θ_3



Εικόνα 4-2. Τοποθέτηση πλαισίων στο σφαιρικό καρπό χρησιμοποιώντας D-H παραμέτρους κατά Graig.

Με την πρώτη άρθρωση (πλαίσιο 1) επιτυγχάνεται η αζιμουθιακή στόχευση. Με την δεύτερη άρθρωση (πλαίσιο 2) επιτυγχάνεται η υψομετρική στόχευση ενώ η τρίτη άρθρωση (πλαίσιο 3) χρειάζεται για την διατήρηση της πόλωσης μεταξύ των δύο κεραίων.

Σύμφωνα με τον πίνακα των D-H παραμέτρων κατά Graig οι ομογενής μετασχηματισμοί των πλαισίων του σφαιρικού καρπού είναι:

$$\begin{aligned}g_{W1} &= \text{rotz}(th_1) \\g_{12} &= \text{rotx}(-\pi/2) * \text{rotz}(th_2) \\g_{23} &= \text{rotx}(\pi/2) * \text{rotz}(th_3)\end{aligned}$$

Όπου:

$th_{1,2,3}$ = Οι γωνίες των αρθρώσεων του μηχανισμού

Τα πλαίσια των τριών αρθρώσεων του σφαιρικού καρπού ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S) είναι:

$$\begin{aligned}g_{S1} &= g_{SW} * g_{W1} \\g_{S2} &= g_{S1} * g_{12} \\g_{S3} &= g_{S2} * g_{23}\end{aligned}$$

4.2 Υπολογισμός επιθυμητού πίνακα στροφής

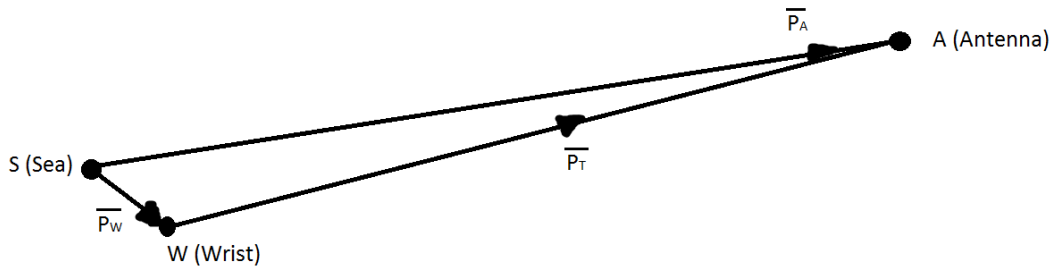
Από την επίλυση του ευθύ κινηματικού προβλήματος είναι γνωστή η θέση και ο προσανατολισμός της σταθερής κεραίας (A) ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S). Επίσης γνωστή είναι η θέση και ο προσανατολισμός του καρπού (W) ως προς το αδρανειακό (S). Έχοντας τα δύο διανύσματα θέσης, της σταθερής κεραίας (P_A) και του Wrist (P_W) εκφρασμένα στο αδρανειακό πλαίσιο (S), με την μεταξύ τους αφαίρεση θα προκύψει το επιθυμητό διάνυσμα στόχευσης (P_T) ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S).

$$\vec{P}_T = \vec{P}_A - \vec{P}_W$$

Όπου:

$$\vec{P}_A = [\vec{P}_{Ax} \quad \vec{P}_{Ay} \quad \vec{P}_{Az}]^T = g_{SA}(1:3, 1:3)$$

$$\vec{P}_W = [\vec{P}_{Wx} \quad \vec{P}_{Wy} \quad \vec{P}_{Wz}]^T = g_{SW}(1:3, 1:3)$$



Εικόνα 4-3. Υπολογισμός διανύσματος στόχευσης.

Για να επιτευχθεί η στόχευση μεταξύ των 2 κεραιών θα πρέπει ο άξονας Z της τρίτης άρθρωσης του σφαιρικού καρπού (3) να ταυτιστεί με το διάνυσμα στόχευσης (P_T). Άρα με την μετατροπή αυτού του διανύσματος σε μοναδιαίο διάνυσμα θα προκύψει η τρίτη στήλη του επιθυμητού πίνακα στροφής.

Για να μετατραπεί ένα διάνυσμα σε μοναδιαίο διαιρείται με το μέτρο του.

$$\widehat{P}_T = \frac{\vec{P}_T}{\|\vec{P}_T\|}$$

Όπου:

\widehat{P}_T = Το μοναδιαίο διάνυσμα στόχευσης ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S)

\vec{P}_T = Το διάνυσμα στόχευσης ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S)

$\|\vec{P}_T\|$ = Το μέτρο του διανύσματος στόχευσης = $\sqrt{P_{Tx}^2 + P_{Ty}^2 + P_{Tz}^2}$

Έχοντας βρει το μοναδιαίο διάνυσμα στόχευσης \widehat{P}_T άρα και την τρίτη στήλη (Z) του επιθυμητού πίνακα στροφής και λύνοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα ο μηχανισμός του σφαιρικού καρπού θα μπορεί να στοχεύσει στην σωστή θέση. Για να στοχεύει όμως και με σωστή πόλωση θα πρέπει να καθοριστούν και οι άλλες δύο στήλες του επιθυμητού πίνακα στροφής. Αυτό μπορεί να γίνει με την βοήθεια της εξίσωσης του επιπέδου, όπου καθορίζοντας την μία από τις δύο στήλες θα προκύψει η άλλη.

Η γενική μορφή της εξίσωσης του επιπέδου είναι:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad \text{με τουλάχιστον ένα από τα } A, B, C \neq 0$$

Όπου:

A, B, C = συντελεστές διεύθυνσης = $[\widehat{P}_{Tx} \quad \widehat{P}_{Ty} \quad \widehat{P}_{Tz}]^T$

D = Μετατόπιση από την αρχή των αξόνων

$$x, y, z = \text{συντεταγμένες σημείου} = [\vec{P}_{WX} \quad \vec{P}_{WY} \quad \vec{P}_{WZ}]^T$$

Αν ο συντελεστής διεύθυνσης A, B ή Γ μιας ευθείας είναι 0 τότε η ευθεία που προκύπτει (L) θα είναι κάθετη στον άξονα X, Y , ή Z , αντίστοιχα. Αν ο συντελεστής διεύθυνσης είναι 1 τότε θα είναι παράλληλη.

$$\Gamma = 0 \Leftrightarrow L \perp Z$$

$$\Gamma = 1 \Leftrightarrow L \parallel Z$$

Το ζητούμενο διάνυσμα πόλωσης \vec{P}_P θα βρίσκεται στην αρχή του διανύσματος στόχευσης \vec{P}_T και θα είναι κάθετο προς αυτό. Το διάνυσμα πόλωσης θα πρέπει να είναι παράλληλο με το XY επίπεδο του αδρανειακού πλαισίου. Άρα το Δ και το Γ θα είναι 0 οπότε η εξίσωση του επιπέδου μετατρέπεται σε:

$$A(X - X_0) + B(Y - Y_0) + \Gamma(Z - Z_0) + \Delta = 0$$

Όπου αν:

$$\Gamma(Z - Z_0) = 0 \quad \text{και} \quad \Delta = 0$$

Η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$A(X - X_0) + B(Y - Y_0) = 0$$

Λύνοντας ως προς X προκύπτει:

$$X = \frac{-(Y - Y_0) * B}{A} + X_0$$

Διανυσματικά θα είναι:

$$\vec{P}_{PX} = \frac{-(\vec{P}_{PY} - \vec{P}_{WY}) * \widehat{P}_{TY}}{\widehat{P}_{TX}} + \vec{P}_{WX}$$

Στην παραπάνω εξίσωση υπάρχουν δύο άγνωστοι το \vec{P}_{PY} και το \vec{P}_{PX} . Καθορίζοντας λοιπόν το \vec{P}_{PY} προκύπτει το \vec{P}_{PX} . Το \vec{P}_{PZ} είναι το ίδιο με το \vec{P}_{WZ} αφού το διάνυσμα πόλωσης βρίσκεται στο κάθετο XY επίπεδο της αρχής του διανύσματος στόχευσης \vec{P}_{TZ} .

$$\vec{P}_{PZ} = \vec{P}_{WZ}$$

Έπειτα από δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η πόλωση ήταν σωστή όταν το \vec{P}_{PY} είχε αρκετά μεγάλες τιμές.

Το μοναδιαίο διάνυσμα πόλωσης \hat{P}_P θα είναι άλλη μία στήλη του επιθυμητού πίνακα στροφής και με την χρήση του εξωτερικού γινομένου θα προκύψει η τρίτη. Για να μετατραπεί σε μοναδιαίο διαιρείται με το μέτρο του.

$$\hat{P}_P = \frac{\vec{P}_P}{\|\vec{P}_P\|}$$

Όπου:

\hat{P}_P = Το μοναδιαίο διάνυσμα στόχευσης ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S)

\vec{P}_P = Το διάνυσμα πόλωσης ως προς το αδρανειακό πλαίσιο (S)

$$\|\vec{P}_P\| = \text{Το μέτρο του διανύσματος πόλωσης} = \sqrt{P_{PX}^2 + P_{PY}^2 + P_{PZ}^2}$$

Ο επιθυμητός πίνακας στροφής R_D θα είναι:

$$R_D = [\hat{X} \quad \hat{Y} \quad \hat{Z}]$$

Όπου:

$$\hat{X} = \hat{Y} \times \hat{Z}$$

$$\hat{Y} = \hat{P}_P$$

$$\hat{Z} = \hat{P}_T$$

Ο ορισμός του εξωτερικού γινομένου είναι:

$$\hat{a} \times \hat{b} = \|\hat{a}\| * \|\hat{b}\| * \sin \theta * \mathbf{n}$$

Όπου:

$$\|\hat{x}\| = \text{Το μέτρο του μοναδιαίου διανύσματος} = \sqrt{\hat{x}_X^2 + \hat{x}_Y^2 + \hat{x}_Z^2}$$

$\sin \theta$ = το ημίτονο της περιεχόμενης μεταξύ τους γωνία = 1 λόγω ορθομοναδιαίου $\Sigma\Sigma$

\mathbf{n} = διάνυσμα ίσο με 1 και κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν τα \hat{a} και \hat{b}

Οπότε:

$$R_{D\hat{X}} = \hat{P}_P^T * \hat{P}_T$$

Ο επιθυμητός πίνακας στροφής R_D που έχει βρεθεί είναι εκφρασμένος στο αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς (S). Η επίλυση του αντίστροφου κινηματικού για τον σφαιρικό καρπό γίνεται με τη χρήση των γωνιών ZYZ Euler ως προς το πλαίσιο του καρπού (W). Οπότε θα πρέπει ο επιθυμητός πίνακας στροφής R_D να εκφραστεί ως προς το πλαίσιο του καρπού (W). Αυτό γίνεται πολλαπλασιάζοντας κάθε στήλη του επιθυμητού πίνακα στροφής R_D με τον πίνακα στροφής ο οποίος περιγράφει τον προσανατολισμό μεταξύ των

δύο πλαισίων. Ο προσανατολισμός μεταξύ των δύο πλαισίων (S) και (W) είναι γνωστός από τον ομογενή μετασχηματισμό g_{SW} .

$$R_D = [g_{SW}(1:3,1:3)^{-1} * \hat{X}, \quad g_{SW}(1:3,1:3)^{-1} * \hat{Y}, \quad g_{SW}(1:3,1:3)^{-1} * \hat{Z}]$$

4.3 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα

Όπως έχει προαναφερθεί για την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού χρησιμοποιούνται οι γωνίες ZYZ Euler οι οποίες αντιστοιχούν στην 1^η, 2^η και 3^η άρθρωση του σφαιρικού καρπού αντίστοιχα.

Εκφράζοντας τον επιθυμητό πίνακα στροφής σαν γινόμενο των πινάκων στροφής κάθε γωνίας προκύπτει ότι:

$$R(\alpha, \beta, \gamma)_{ZYZ} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \text{Rot}_Z(\alpha) * \text{Rot}_Y(\beta) * \text{Rot}_Z(\gamma) \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\beta & 0 & c_\beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_\gamma & -s_\gamma & 0 \\ s_\gamma & c_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Εφαρμόζοντας την μέθοδο του αντίστροφου ομογενούς μετασχηματισμού και πολλαπλασιάζοντας από αριστερά με τον αντίστροφο της γωνίας α η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως:

$$\text{Rot}_Z(\alpha)^{-1} * \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \text{Rot}_Y(\beta) * \text{Rot}_Z(\gamma) \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} c_\alpha & s_\alpha & 0 \\ -s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\beta & 0 & c_\beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_\gamma & -s_\gamma & 0 \\ s_\gamma & c_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} n_x c_\alpha + n_y s_\alpha & o_x c_\alpha + o_y s_\alpha & a_x c_\alpha + a_y s_\alpha \\ -n_x s_\alpha + n_y c_\alpha & -o_x s_\alpha + o_y c_\alpha & -a_x s_\alpha + a_y c_\alpha \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & -c_\beta s_\gamma & s_\beta \\ s_\gamma & c_\gamma & 0 \\ -s_\beta s_\gamma & s_\beta c_\gamma & c_\beta \end{bmatrix}$$

Έχοντας απομονώσει την γωνία α προκύπτει ένα σύνολο 9 εξισώσεων οι οποίες είναι:

Από τα στοιχεία (1,1): $n_x c_\alpha + n_y s_\alpha = c_\beta c_\gamma$

Από τα στοιχεία (1,2): $o_x c_\alpha + o_y s_\alpha = -c_\beta c_\gamma$

Από τα στοιχεία (1,3): $a_x c_\alpha + a_y s_\alpha = s_\beta$

Από τα στοιχεία (2,1): $-n_x s_\alpha + n_y c_\alpha = s_\gamma$

Από τα στοιχεία (2,2): $-o_x s_\alpha + o_y c_\alpha = c_\gamma$

Από τα στοιχεία (2,3): $-a_x s_\alpha + a_y c_\alpha = 0$

Από τα στοιχεία (3,1): $n_z = -s_\beta c_\gamma$

Από τα στοιχεία (3,2): $o_z = s_\beta s_\gamma$

Από τα στοιχεία (3,3): $a_z = c_\beta$

Για την εύρεση της γωνίας α επιλέγονται τα στοιχεία (2,3):

$$-a_x s_\alpha + a_y c_\alpha = 0 \Leftrightarrow a_y c_\alpha = a_x s_\alpha \Leftrightarrow \tan \alpha = \frac{a_y}{a_x} \Leftrightarrow \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_x} \right) \Leftrightarrow$$

$$\alpha = \text{Atan2}(a_y, a_x)$$

Η εύρεση της γωνίας β εφόσον είναι γνωστή πλέον η γωνία α , γίνεται με την διαίρεση κατά μέλη των στοιχείων (1,1) και (3,3):

$$\left. \begin{array}{l} a_x c_\alpha + a_y s_\alpha = s_\beta \\ a_z = c_\beta \end{array} \right\} \Leftrightarrow \tan \beta = \frac{a_x c_\alpha + a_y s_\alpha}{a_z} \Leftrightarrow \beta = \tan^{-1} \left(\frac{a_x c_\alpha + a_y s_\alpha}{a_z} \right) \Leftrightarrow$$

$$\beta = \text{Atan2}(a_x c_\alpha + a_y s_\alpha, a_z)$$

Για την εύρεση της γ γωνίας χρησιμοποιείται ο ίδιος τρόπος χρησιμοποιώντας αυτή την φορά τα στοιχεία (2,1) και (2,2):

$$\left. \begin{array}{l} -n_x s_\alpha + n_y c_\alpha = s_\gamma \\ -o_x s_\alpha + o_y c_\alpha = c_\gamma \end{array} \right\} \Leftrightarrow \tan \gamma = \frac{-n_x s_\alpha + n_y c_\alpha}{-o_x s_\alpha + o_y c_\alpha} \Leftrightarrow \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{-n_x s_\alpha + n_y c_\alpha}{-o_x s_\alpha + o_y c_\alpha} \right) \Leftrightarrow$$

$$\gamma = \text{Atan2}(-n_x s_\alpha + n_y c_\alpha, -o_x s_\alpha + o_y c_\alpha)$$

Συνοψίζοντας η λύση του αντίστροφου κινηματικού με ZYZ Euler του σφαιρικού καρπού θα είναι:

$$\alpha = \text{Atan2}(a_y, a_x)$$

$$\beta = \text{Atan2}(a_x c_\alpha + a_y s_\alpha, a_z)$$

$$\gamma = \text{Atan2}(-n_x s_\alpha + n_y c_\alpha, -o_x s_\alpha + o_y c_\alpha)$$

4.4 Σφάλματα στόχευσης

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά των σφαλμάτων που αναμένονται από το συγκεκριμένο σύστημα στόχευσης λόγω κάποιων παραδοχών – επιλογών. Η μία επιλογή ήταν η ύπαρξη σταθερής κεραίας που δημιουργεί σφάλμα στην ευθυγράμμιση των δύο κεραιών ενώ η δεύτερη επιλογή ήταν η χρησιμοποίηση βηματικών κινητήρων που εισάγει ένα σφάλμα στη στόχευση ανάλογο του βήματος – μικροβήματος που χρησιμοποιείται στον κινητήρα.

4.4.1 Σφάλμα ευθυγράμμισης λόγω σταθερής κεραίας

Απόλυτη ευθυγράμμιση μίας σταθερής κεραίας με μία κινητή μπορεί να γίνει, μόνο και μόνο όταν, ο άξονας Z της κινητής κεραίας συμπίπτει με τον άξονα Z της σταθερής. Για όλες τις υπόλοιπες εφικτές θέσεις της κινητής κεραίας θα υπάρχει ένα σφάλμα ευθυγράμμισης μεταξύ των δύο κεραιών. Ο τρόπος για να μηδενιστεί θεωρητικά το σφάλμα ευθυγράμμισης, είναι η χρησιμοποίηση δύο κινητών κεραιών. Θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην ξηρά ένας μηχανισμός 2 D.O.F. ο οποίος θα στοχεύει την κινητή κεραία. Λόγω όμως επιπλέον κόστους και πολυπλοκότητας, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί σταθερή κεραία.

Η σταθερή κεραία λοιπόν, στοχεύει συνεχώς προς το σημείο πόντισης αλλά ο πλωτός σταθμός κινείται γύρω από αυτό σε μία ακτίνα περίπου 223 μέτρων, ενώ η καθ' ύψος μετακίνηση του σταθμού λόγω των κυμάτων δεν ξεπερνάει τα 5 μέτρα. Αναπόφευκτα λοιπόν θα υπάρχει ένα σφάλμα στην ευθυγράμμιση των πλαισίων μεταξύ της σταθερής και της κινητής κεραίας. Το σφάλμα ευθυγράμμισης των πλαισίων είναι ένα μόνιμο σφάλμα και εξαρτάται από την απομάκρυνση του πλωτού σταθμού από το σημείο πόντισης καθώς και από την απόσταση στόχευσης. Το σφάλμα ευθυγράμμισης των πλαισίων μεγαλώνει όσο μικραίνει η απόσταση στόχευσης κρατώντας σταθερή την ακτίνα μεταβολής της θέσης του σταθμού.

4.4.2 Ελάχιστο σφάλμα στόχευσης λόγω βήματος κινητήρα

Εφόσον η κίνηση του μηχανισμού γίνεται με βηματικούς κινητήρες θα υπάρχει μία ελάχιστη γωνία κίνησης της κάθε άρθρωσης, ανάλογα με το βήμα του κάθε κινητήρα, την οδήγηση του και την σχέση μετάδοσης που χρησιμοποιείται. Από την ελάχιστη γωνία κίνησης του μηχανισμού και από την απόσταση της στόχευσης προκύπτει το ελάχιστο σφάλμα στόχευσης. Το σφάλμα αυτό είναι μόνιμο και ανάλογο της απόστασης στόχευσης.

$$e_t = \tan(M_{Ac}) * S_t$$

Όπου:

e_t = Ελάχιστο σφάλμα

M_{Ac} = Η ακρίβεια του μηχανισμού (*rad*)

S_t = Απόσταση στόχευσης

Παράδειγμα:

Ένας κοινός βηματικός κινητήρας έχει 200 βήματα/περιστροφή που αντιστοιχεί σε 1,8° ανά βήμα. Αν χρησιμοποιηθεί με μία σχέση μετάδοσης 1:3, τότε το κάθε βήμα θα αντιστοιχεί σε 0,6° (ίσες με 0,0105 rad) που είναι και η ελάχιστη γωνία κίνησης.

Οπότε αν η απόσταση στόχευσης είναι 500 μέτρα το ελάχιστο σφάλμα στόχευσης θα είναι:

$$e_t = \tan(0,0105) * 500 = 5,236 \text{ m}$$

Στα 5000 μέτρα το ελάχιστο σφάλμα στόχευσης θα είναι:

$$e_t = \tan(0,0105) * 5000 = 52,361 \text{ m}$$

Στο παραπάνω παράδειγμα αν ο βηματικός κινητήρας οδηγείται με μισό βήμα τότε θα το παραπάνω σφάλμα θα υποδιπλασιαστεί. Αν ο βηματικός κινητήρας οδηγείται με τέσσερα μικροβήματα το σφάλμα θα υποτετραπλασιαστεί κ.ο.κ.

4.5 Προσομοίωση κινηματικής ανάλυσης

Η επαλήθευση των μαθηματικών υπολογισμών για την στόχευση έγινε με την βοήθεια του Matlab. Αφού επιλύθηκαν το ευθύ κινηματικό, η εύρεση του επιθυμητού πίνακα στροφής και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα εκτύπωσης των αποτελεσμάτων για τον έλεγχο της ορθής στόχευσης.

Οι είσοδοι που χρειάζεται το πρόγραμμα είναι:

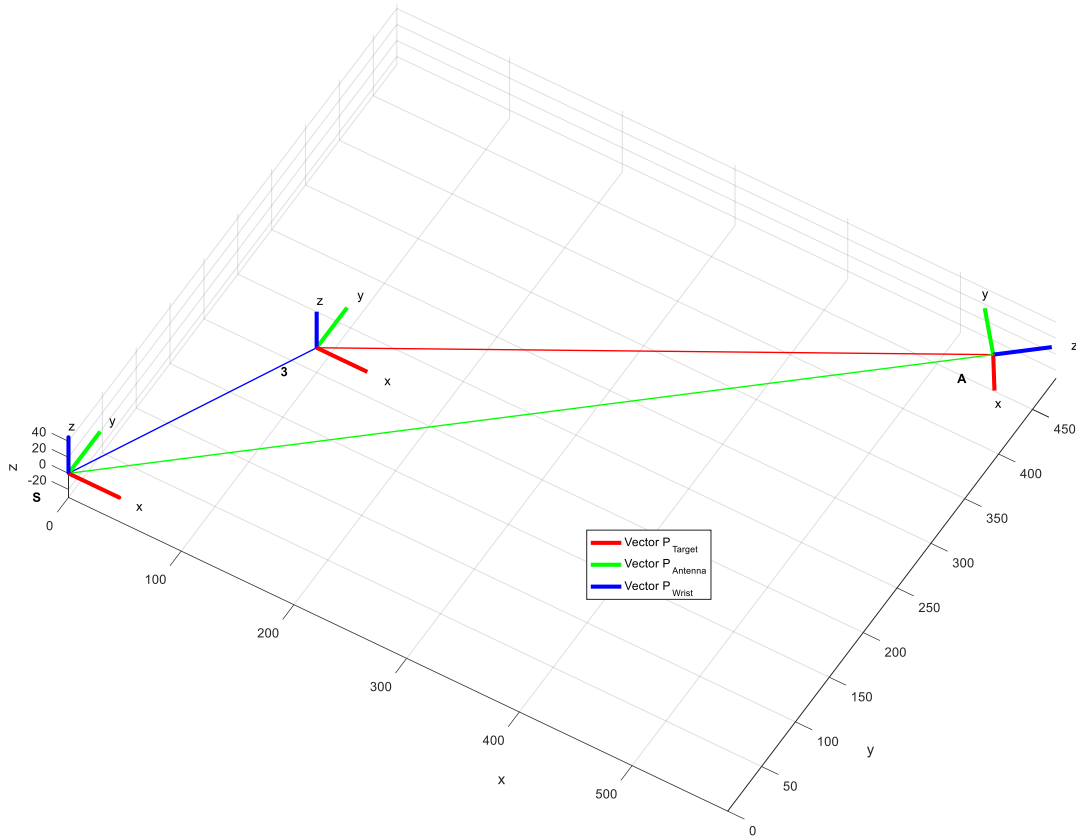
- ο προσανατολισμός (roll, pitch, yaw) του πλωτού σταθμού
- η απόσταση του πλωτού σταθμού κατά X,Y,Z από το σημείο πόντισης (αρχικό σημείο)
- η θέση της σταθερής κεραίας ως προς το ΕΛΚΕΘΕ
- η θέση του ΕΛΚΕΘΕ ως προς το σταθερό σημείο πόντισης
- οι γωνίες των αρθρώσεων του μηχανισμού
- το ύψος τοποθέτησης του μηχανισμού πάνω στον πλωτό σταθμό (η απόσταση μεταξύ των πλαισίων B και W).

Για τον γρήγορο έλεγχο των αποτελεσμάτων γίνεται οπτική απεικόνιση τους εκτυπώνοντας τα πλαίσια συντεταγμένων, το διάνυσμα στόχευσης, το εύρος δέσμης της κεραίας καθώς και το σφάλμα ευθυγράμμισης μεταξύ των 2 κεραίων.

Στην Εικόνα 4-1 απεικονίζεται η αρχική τοποθέτηση των πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της κινηματικής ανάλυσης. Τα πλαίσια του σφαιρικού καρπού (πλαίσια 1, 2 και 3) έχουν μετακινηθεί από την πραγματική τους θέση ώστε να είναι εύκολα ορατά. Η πραγματική θέση των πλαισίων 1, 2 και 3 συμπίπτει με το σημείο τομής των αξόνων του σφαιρικού καρπού (πλαίσιο W). Επίσης παρατηρείται ότι ο άξονας Z της σταθερής κεραίας (πλαίσιο A) στοχεύει προς το αδρανειακό πλαίσιο S (σημείο πόντισης).

Στην Εικόνα 4-4 φαίνεται το διάνυσμα στόχευσης (Vector P_{Target}), το οποίο προκύπτει κάθε φορά από την αφαίρεση των διανυσμάτων (Vector $P_{Antenna} - Vector P_{Wrist}$). Το διάνυσμα Vector $P_{Antenna}$ υπολογίζεται μία φορά καθώς παραμένει σταθερό ενώ το διάνυσμα Vector P_{Wrist} υπολογίζεται συνεχώς καθώς μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση και το προσανατολισμό του πλωτού σταθμού.

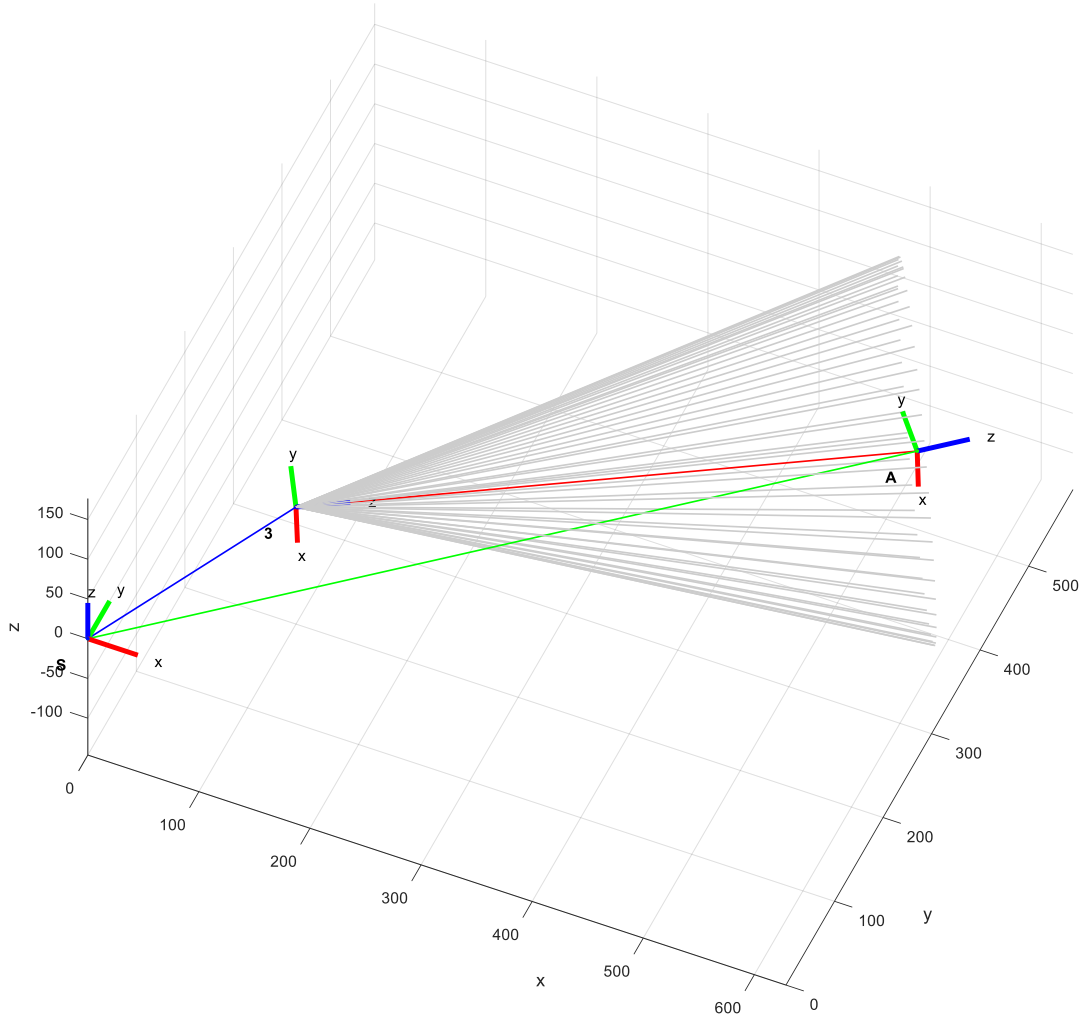
Εύρεση διανύσματος στόχευσης



Εικόνα 4-4. Απεικόνιση του διανύσματος στόχευσης.

Στην Εικόνα 4-5 γίνεται ο έλεγχος της στόχευσης καθώς και η απεικόνιση του εύρους δέσμης της κεραίας (κώνος) που φέρει ο σφαιρικός καρπός. Η ορθή στόχευση αποδεικνύεται από το ότι ο άξονας Z της τρίτης άρθρωσης (πλαίσιο 3) συμπίπτει με το διάνυσμα στόχευσης $Vector P_{Target}$ και το πλαίσιο A της σταθερής κεραίας βρίσκεται στο κέντρο του εύρους δέσμης της κινητής κεραίας.

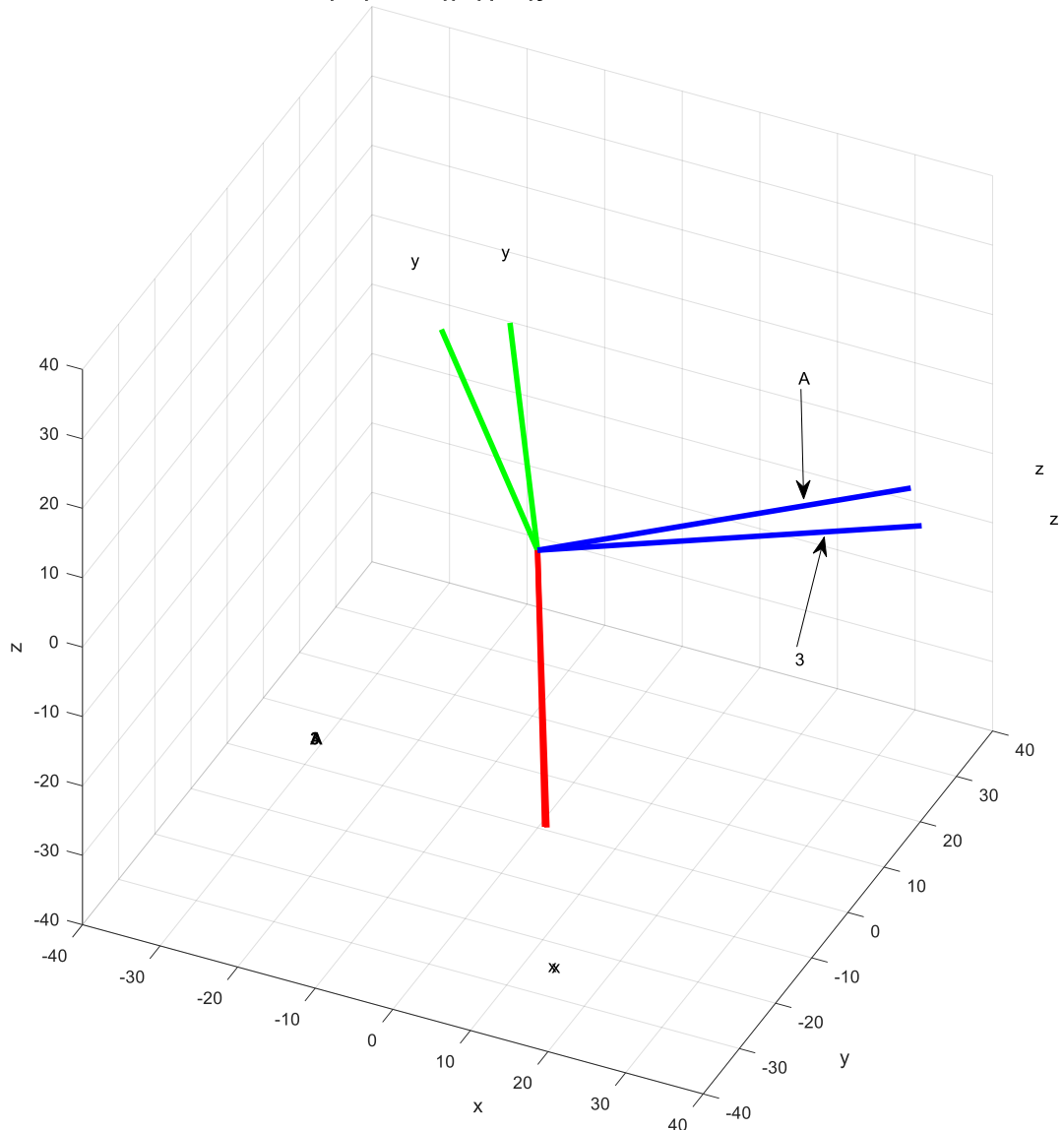
Στόχευση και εύρος δέσμης της κεραίας



Εικόνα 4-5. Απεικόνιση στόχευσης και εύρους δέσμης κεραίας του σφαιρικού καρπού.

Στην Εικόνα 4-6 έχουν εκτυπωθεί το πλαίσιο της σταθερής κεραίας A και το πλαίσιο της 3^{ης} άρθρωσης του σφαιρικού καρπού (πλαίσιο 3) στο ίδιο σημείο διατηρώντας όμως τον προσανατολισμό τους. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ένας γρήγορος έλεγχος της ορθής πόλωσης μεταξύ των δύο κεραίων καθώς και ο καθορισμός του σφάλματος ευθυγράμμισης μεταξύ τους. Η ορθή πόλωση φαίνεται από το ότι οι άξονες Y βρίσκονται στο οριζόντιο επίπεδο. Το σφάλμα ευθυγράμμισης οφείλεται στο ότι η μία εκ των δύο κεραίων είναι σταθερή και προσανατολισμένη στο σημείο πόντισης ενώ η άλλη κεραία κινείται γύρω από αυτό.

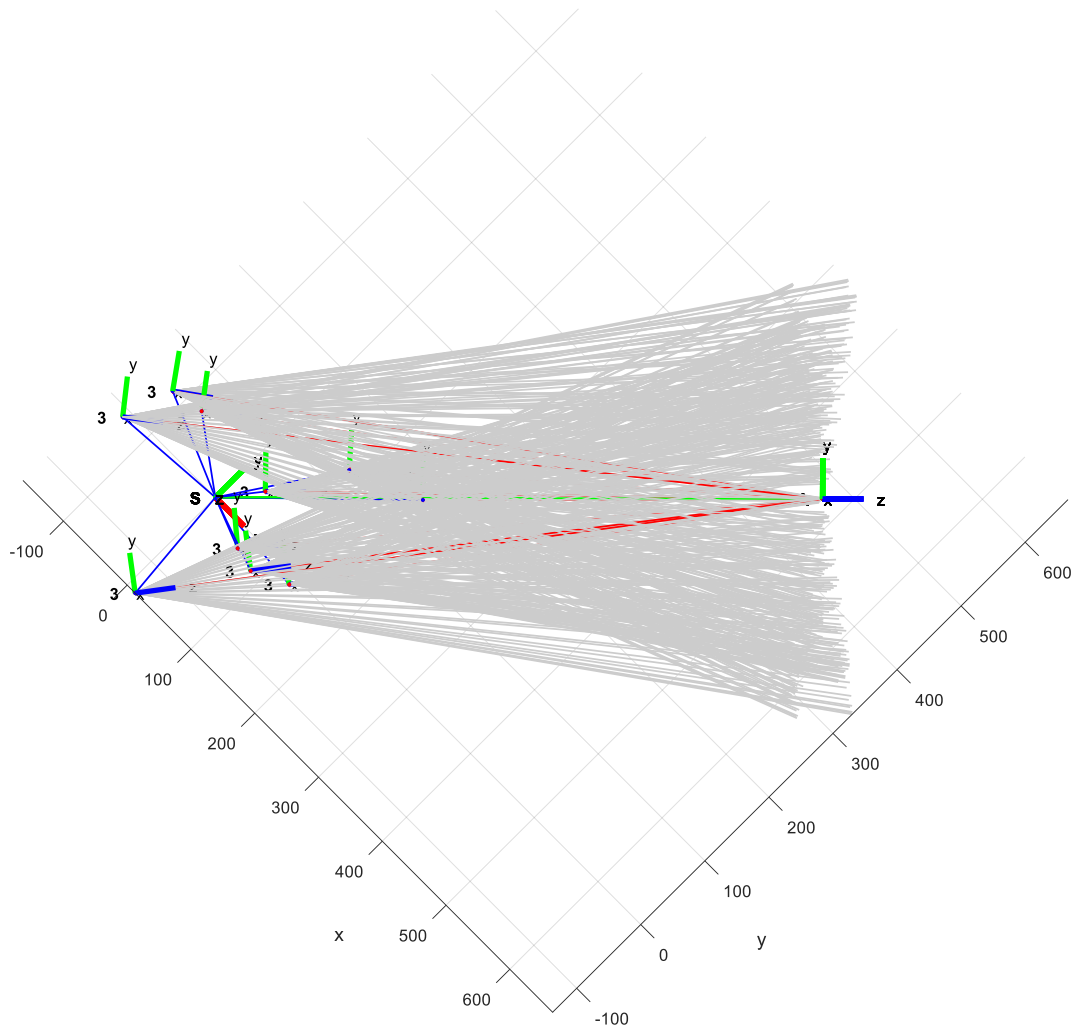
Σφάλμα ευθυγράμμισης των πλαισίων 3 και A



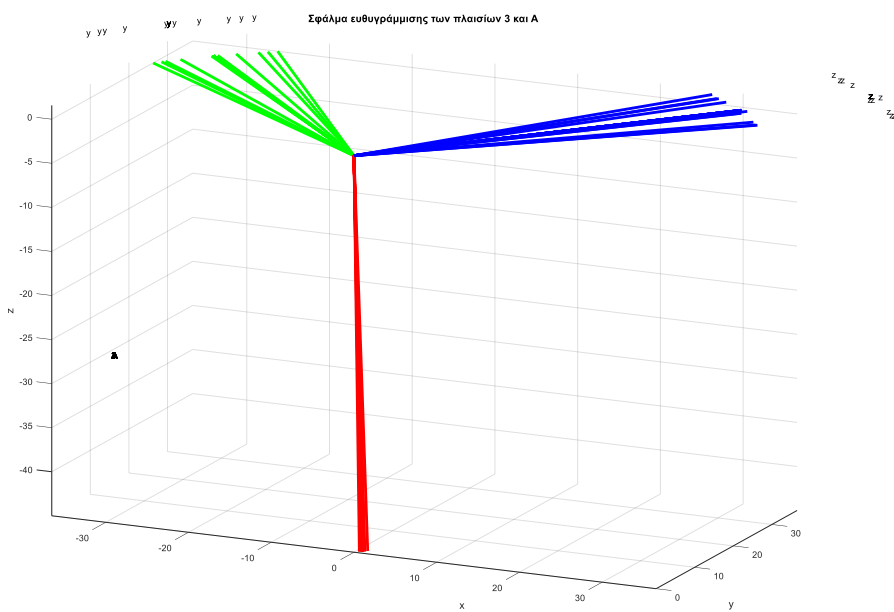
Εικόνα 4-6. Απεικόνιση σφάλματος ευθυγράμμισης και ορθής πόλωσης των πλαισίων 3 και A.

Χρησιμοποιώντας γεννήτρια τυχαίων αριθμών για την μεταβολή των εισόδων του προγράμματος και τρέχοντας το παραπάνω πρόγραμμα για 10 φορές προέκυψαν οι Εικόνα 4-7 και Εικόνα 4-8. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει ο έλεγχος της ορθής στόχευσης για πολλές διαφορετικές τυχαίες θέσεις και προσανατολισμούς του πλωτού σταθμού γύρω από το αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων (S).

Στόχευση και εύρος δέσμης κεραίας



Εικόνα 4-7. Απεικόνιση στόχευσης και εύρους δέσμης κεραίας για 10 τυχαίες θέσεις του πλωτού σταθμού.



Εικόνα 4-8. Απεικόνιση σφάλματος ευθυγράμμισης και ορθής πόλωσης για 10 τυχαίες θέσεις του πλωτού σταθμού.

Κεφάλαιο

5

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τον προγραμματισμό των ελεγκτών του ρομποτικού συστήματος στόχευσης. Ακολουθεί μία γενική περιγραφή των δύο ελεγκτών και στην συνέχεια αναλύονται οι εργασίες – διαδικασίες που αναλογούν στον καθένα ξεχωριστά. Αναφέρονται επίσης οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν, η βαθμονόμηση της IMU και στο τέλος δίδονται τα διαγράμματα ροής του κάθε ελεγκτή.

5. Προγραμματισμός ελεγκτών

Κατά την υλοποίηση του πρωτότυπου ρομποτικού συστήματος στόχευσης αποφασίστηκε για λόγους ευκολίας και ευελιξίας να χρησιμοποιηθούν 2 μικροελεγκτές Arduino Mega 2560. Ο πρωτεύων ελεγκτής (Master από εδώ και στο εξής) βρίσκεται τοποθετημένος στην βάση του συστήματος στόχευσης ενώ ο δευτερεύων (Slave από εδώ και στο εξής) είναι τοποθετημένος στο περιστρεφόμενο μέρος του συστήματος στόχευσης και συγκεκριμένα στην πρώτη άρθρωση.

Ο πρωτεύων ελεγκτής διαβάζοντας τους αισθητήρες (GPS & IMU) και επιλύοντας το κινηματικό πρόβλημα βρίσκει τις κατάλληλες θέσεις των αρθρώσεων για την ορθή στόχευση. Ο δευτερεύων ελεγκτής (Slave) είναι υπεύθυνος για την κίνηση των τριών βηματικών κινητήρων καθώς και για την εύρεση της αρχικής θέσης του μηχανισμού διαβάζοντας τους

αισθητήρες εγγύτητας (proximity sensors). Οι δύο ελεγκτές επικοινωνούν μεταξύ τους με TTL (Transistor – Transistor Logic) σειριακή επικοινωνία δεσμεύοντας μόνο ένα καλώδιο στο κεντρικό δακτύλιο ολίσθησης (slip ring).

Ο προγραμματισμός των ελεγκτών πραγματοποιήθηκε στη γλώσσα του Arduino η οποία βασίζεται στη γλώσσα Wiring, μια παραλλαγή της C/C++ για μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής AVR όπως ο ATmega, και υποστηρίζει όλες τις βασικές δομές της C καθώς και μερικά χαρακτηριστικά της C++. Για compiler χρησιμοποιείται ο AVR gcc και ως βασική βιβλιοθήκη C χρησιμοποιείται η AVR libc. Λόγω της καταγωγής της από την C, στην γλώσσα του Arduino μπορούν να χρησιμοποιηθούν ουσιαστικά οι ίδιες βασικές εντολές και συναρτήσεις, με την ίδια σύνταξη, τους ίδιους τύπους δεδομένων και τους ίδιους τελεστές όπως και στην C. Πέρα από αυτές όμως, υπάρχουν κάποιες ειδικές εντολές, συναρτήσεις και σταθερές που βοηθούν για την διαχείριση του ειδικού hardware του Arduino. Οι πιο σημαντικές από αυτές μπορούν να βρεθούν στο [35]. Επίσης υπάρχουν διάφορες βιβλιοθήκες στο διαδίκτυο με ελεύθερη πρόσβαση που έχουν γραφτεί για διάφορους αισθητήρες – επενεργητές.

5.1 Πρωτεύων ελεγκτής (Master)

Ο πρωτεύων ελεγκτής (Master) διαβάζει την πληροφορία της γεωγραφικής θέσης του πλωτού σταθμού από το GPS χρησιμοποιώντας TTL (Transistor – Transistor Logic) σειριακή επικοινωνία. Επίσης, διαβάζει τον προσανατολισμό (yaw, pitch, roll) του σταθμού από την IMU χρησιμοποιώντας I²C πρωτόκολλο επικοινωνίας. Στη συνέχεια επιλύει την κινηματική ανάλυση του συστήματος στόχευσης υπολογίζοντας τις τρεις επιθυμητές γωνίες των αρθρώσεων ώστε να επιτευχθεί η ορθή στόχευση. Τέλος οι τρεις επιθυμητές γωνίες αποστέλλονται από τον πρωτεύων ελεγκτή (Master) με TTL σειριακή επικοινωνία στον δευτερεύων ελεγκτή (Slave).

Για την επικοινωνία με το GPS χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη NeoGPS από τον Slash DevIn [36]. Πρόκειται για μία πλήρως παραμετροποιήσιμη βιβλιοθήκη που χρησιμοποιεί ελάχιστη RAM (10 bytes), δεσμεύει λίγο χώρο στην μνήμη του προγράμματος (866 bytes) και απασχολεί λιγότερο από 1 msec τον μικροεπεξεργαστή (CPU) για κάθε νέα πρόταση NMEA

(National Marine Electronics Association). Η συχνότητα ανανέωσης της θέσης είναι ρυθμισμένη στο 1 Hz ενώ η ταχύτητα (baud rate) της σειριακής επικοινωνίας στα 9600 bps. Επειδή πρόκειται για μία παραμετροποιήσιμη βιβλιοθήκη που απαιτεί διαφορετικές ρυθμίσεις (configuration) για κάθε project είναι προτιμότερο να μην γίνει εγκατάσταση της στο IDE του Arduino αλλά να τοποθετείται στον φάκελο του κάθε project με τις συγκεκριμένες κάθε φορά ρυθμίσεις.

Το γεωγραφικό μήκος και πλάτος διαβάζονται σε μορφή δεκαδικών μοιρών ενώ για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιούνται μεταβλητές τύπου long int. Οι συναρτήσεις της βιβλιοθήκης που χρησιμοποιούνται όσο αφορά τη θέση είναι η `fix_data.latitudeL()` και η `fix_data.longitudeL()` ενώ για το υψόμετρο χρησιμοποιείται η συνάρτηση `fix_data.altitude()` της οποίας η επιστροφή είναι πραγματικός αριθμός (μεταβλητή τύπου float, σε μέτρα). Η προσθήκη του υψόμετρου έγινε μόνο για την πραγματοποίηση των δοκιμών στην στεριά δεδομένου ότι στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στο θαλάσσιο περιβάλλον η μεταβολή του υψόμετρου θεωρείται αμελητέα. Στη συνέχεια καλείται η συνάρτηση υπολογισμού της απόστασης μεταξύ δύο σημείων η οποία περιγράφεται στο κεφ. 5.1.1.

Για την επικοινωνία με την αδρανειακή μονάδα (IMU) χρησιμοποιούνται: η ενσωματωμένη στο IDE του Arduino βιβλιοθήκη Wire η οποία υποστηρίζει το I²C πρωτόκολλο επικοινωνίας, η βιβλιοθήκη της Adafruit_BNO055 που διαβάζει τις τιμές του συγκεκριμένου αισθητήρα, η βιβλιοθήκη της Adafruit_Unified_Sensor η οποία μετατρέπει τις τιμές από όλους τους αισθητήρες της Adafruit σε μονάδες SI και τέλος η ενσωματωμένη στο IDE του Arduino βιβλιοθήκη EEPROM για την εγγραφή και ανάγνωση των συντελεστών βαθμονόμησης (κεφ. 5.1.2). Χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες της Adafruit και συγκεκριμένα τις συναρτήσεις `'sensor_event_t event'` και `'bno.getEvent (&event)'` δημιουργείται ένα νέο γεγονός (event) στον αισθητήρα. Έπειτα οι τιμές του προσανατολισμού εξάγονται σε μοίρες χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις `'event.orientation.x'`, `'event.orientation.y'` και `'event.orientation.z'`. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα προκύπτει ότι οι τιμές του προσανατολισμού σε γωνίες Euler μπορούν να εξάγονται με συχνότητα 100 Hz. Στη συνέχεια γίνεται κανονικοποίηση των τριών γωνιών ώστε να συμβαδίζουν με τα πλαίσια που έχουν οριστεί στην κινηματική ανάλυση του κεφ. 4.

Η επίλυση της κινηματικής ανάλυσης του μηχανισμού είχε υλοποιηθεί και ελεγχθεί για την ορθότητα των αποτελεσμάτων της, στο Matlab (κεφ. 4.5). Έπειτα γράφτηκε σε γλώσσα C για να συμβατή με τον Arduino. Αρχικά λοιπόν η επίλυση του κινηματικού προβλήματος υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση πολλαπλασιασμού δισδιάστατων πινάκων στη C για τις πράξεις μεταξύ των ομογενών μετασχηματισμών. Με

αυτόν τον τρόπο χρειάζονταν περίπου 8 msec για την εύρεση των επιθυμητών γωνιών των αρθρώσεων. Για τη μείωση του χρόνου αυτού επιλύθηκαν τα περισσότερα κομμάτια της κινηματικής ανάλυσης με την μέθοδο των συμβολικών μεταβλητών (Syms) στο Matlab. Έτσι αποφεύχθηκε η χρησιμοποίηση της παραπάνω συνάρτησης πολλαπλασιασμού πινάκων με τα διπλά for loop, με αποτέλεσμα ο χρόνος επίλυσης να κατέβει στα 2,8 msec. Χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατοι πίνακες (array), δηλωμένοι ως global μεταβλητές στους οποίους γίνεται ο υπολογισμός και η ανανέωση κάθε στοιχείου του πίνακα ξεχωριστά.

Αφού προκύψουν οι επιθυμητές γωνίες των αρθρώσεων από την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος γίνεται η διόρθωση λόγω μαγνητικής απόκλισης για την γωνία yaw και καλείται ο αλγόριθμος αναγνώρισης Νότου – πολλαπλών περιστροφών που περιγράφεται στο κεφ. 5.1.3. Έπειτα γίνεται η κανονικοποίηση της 3^{ης} γωνίας για την διατήρηση της ορθής πόλωσης αποτρέποντας την να πάρει τιμές μεγαλύτερες των 90°.

Η αποστολή των τριών γωνιών των αρθρώσεων προς τον Slave ελεγκτή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πραγματικούς αριθμούς (μεταβλητές τύπου float). Κάθε μεταβλητή τύπου float καταλαμβάνει 4 bytes μνήμης. Τα bytes της κάθε γωνίας (yaw, pitch, roll) διαβάζονται με τη χρήση pointers και αποστέλλονται προς το slave ελεγκτή διαδοχικά.

Για ευκολία κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών προσαρμόστηκαν στο σύστημα σταθερής στόχευσης: ένα κουμπί για την αλλαγή των συντεταγμένων του στόχου, ένας διακόπτης διπλής λειτουργίας (διακόπτη βαθμονόμησης – αρχικών σημείων) και ένας διακόπτης επιλογής λειτουργίας (On=Indoor, Off=Outdoor).

Το κουμπί αλλαγής στόχου ελέγχεται κατά την διάρκεια του βρόγχου ελέγχου και γίνεται απαρίθμηση των πατημάτων του. Ο απαριθμητής μηδενίζει μόλις φτάσει στο μέγιστο αριθμό στόχων που έχει οριστεί ξαναγυρνώντας έτσι στον αρχικό. Πατώντας το αλλάζουν οι συντεταγμένες του στόχου και υπολογίζεται το διάνυσμα μεταξύ του αρχικού σημείου και του νέου στόχου. Ανάλογα τη θέση του διακόπτη βαθμονόμησης κατά την εκκίνηση του προγράμματος επιλέγεται αν θα χρησιμοποιηθούν οι καταχωρημένοι στην EEPROM μνήμη του Arduino συντελεστές βαθμονόμησης της IMU ή θα ακολουθήσει η προσπάθεια για νέα βαθμονόμηση της IMU. Αν ενεργοποιηθεί αυτός ο διακόπτης κατά την διάρκεια εκτέλεσης του βρόγχου ελέγχου, τότε αποστέλλονται μηδενικές τιμές στον slave ελεγκτή για τις γωνίες των αρθρώσεων με σκοπό να μπορεί να διενεργηθεί οπτικός έλεγχος απώλειας βημάτων των κινητήρων. Επίσης κατά την εκκίνηση του προγράμματος γίνεται έλεγχος της θέσης του διακόπτη επιλογής λειτουργίας για να ενεργοποιηθεί ή όχι το GPS ανάλογα με το χώρο της δοκιμής.

Ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του βρόγχου ελέγχου χωρίς να εκτυπώνονται οι πληροφορίες στη σειριακή θύρα είναι 4.6 msec που σημαίνει ότι η συχνότητα αποστολής των γωνιών προς το Slave φτάνει στα 217 Hz.

5.1.1 Υπολογισμός απόστασης μεταξύ δύο σημείων

Για να είναι εφικτή η διόρθωση του διάνυσματος στόχευσης κατά τη μετακίνηση του σταθμού θα πρέπει συνεχώς να ανανεώνεται ο υπολογισμός της απόστασης του σταθμού από την αρχική του θέση ή σημείο πόντισης. Το διάνυσμα από το σημείο πόντισης στην σταθερή κεραία παραμένει σταθερό οπότε και υπολογίζεται μία φορά κατά την εκκίνηση του προγράμματος. Το διάνυσμα της απόστασης του σταθμού από το σημείο πόντισης μεταβάλλεται με την μετακίνηση του σταθμού. Η μεταβολή αυτή υπολογίζεται με την βοήθεια της συσκευής εντοπισμού παγκόσμιας θέσης (Global Positioning System), εν συντομία GPS.

Το GPS πληροφορεί τον μικροελεγκτή για την θέση του δίνοντας του γεωγραφικές συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος - latitude και γεωγραφικό μήκος – longitude) σε μορφή δεκαδικών μοιρών. Για μεγαλύτερη ακρίβεια ο μικροελεγκτής διαβάζει αυτές τις δεκαδικές μοίρες σε μορφή ακεραίων (long int).

Με τις δεκαδικές μοίρες εκφράζεται το γεωγραφικό πλάτος και μήκος γεωγραφικών συντεταγμένων ως δεκαδικό κλάσμα και χρησιμοποιείται σε πολλά συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), εφαρμογές χαρτογράφησης στο Web όπως το Google Maps και συσκευές GPS. Οι μοίρες ως δεκαδικός αριθμός είναι μία εναλλακτική μορφή για την απεικόνιση των μοιρών, λεπτών και δευτέρων (DMS). Οι τιμές του γεωγραφικού πλάτους και μήκους παίρνουν τιμές από $\pm 90^\circ$ και $\pm 180^\circ$, αντίστοιχα. Οι θετικές τιμές του γεωγραφικού πλάτους βρίσκονται βόρεια του Ισημερινού και οι θετικές τιμές του γεωγραφικού μήκους βρίσκονται ανατολικά του Μεσημβρινού.

Η μέση ακτίνα του άξονα της γης στον Ισημερινό είναι 6.378.160 m από την οποία προκύπτει περιφέρεια 40.075.161,2 m. Ο ισημερινός χωρίζεται σε 360° γεωγραφικού μήκους, οπότε σε κάθε μοίρα αντιστοιχούν 111.319,9 m ή περίπου 111 km (Πίνακας 5-1). Καθώς απομακρυνόμαστε από τον Ισημερινό προς έναν από τους πόλους, κάθε μία μοίρα

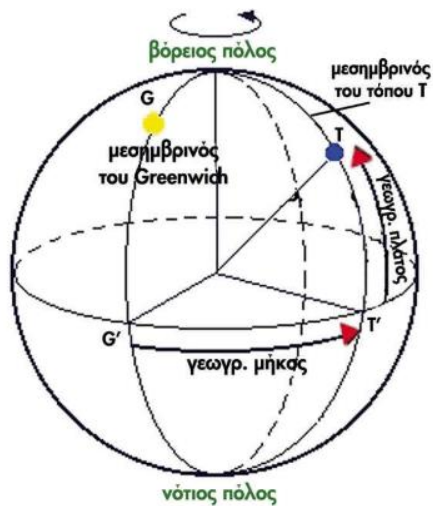
γεωγραφικού μήκους αντιπροσωπεύει μία φθίνουσα απόσταση μέτρων, προσεγγίζοντας το μηδέν στον πόλο.

Πίνακας 5-1. Η ακρίβεια στον Ισημερινό των δεκαδικών μοιρών σε σχέση με τα δεκαδικά ψηφία [37].

Θέση δεκαδικού σημείου	Μοίρες	Απόσταση
0	1.0	111 km
1	0.1	11.1 km
2	0.01	1.11 km
3	0.001	111 m
4	0.0001	11.1 m
5	0.00001	1.11 m
6	0.000001	11.1 cm
7	0.0000001	1.11 cm
8	0.00000001	1.11 mm

Οι θέσεις λοιπόν των δύο σημείων (αρχική θέση και τρέχων θέση) είναι γνωστές σε δεκαδικές μοίρες. Θα πρέπει όμως να υπολογιστεί η μεταξύ τους απόσταση σε μέτρα για να είναι εφικτή η διόρθωση της στόχευσης βάσει της θέσης του σταθμού. Μία συνηθισμένη με καλά αποτελέσματα μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση των εξισώσεων Haversine [38]. Οι εξισώσεις όμως αυτές παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε αποστάσεις όπου η καμπυλότητα της γης αρχίζει και παίζει σημαντικό ρόλο. Οι απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής δεν ξεπερνούν τα 10 km.

Η απόσταση του πλωτού σταθμού από την ξηρά είναι μόλις 4.5 km. Μετά λοιπόν από έρευνα στο διαδίκτυο βρέθηκε και δοκιμάστηκε με ικανοποιητικά αποτελέσματα μία μέθοδος υπολογισμού με καλή ακρίβεια σε μικρές αποστάσεις [39]. Υπολογίζει την απόσταση που αντιστοιχεί ανά δεκαδικό βαθμό γεωγραφικού πλάτους και μήκους με βάση ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-1 η απόσταση μεταξύ δύο μεσημβρινών είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό και μικραίνει όσο πλησιάζει τους πόλους. Άρα ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος μεταβάλλεται η απόσταση γεωγραφικού μήκους που ορίζει ένας δεκαδικός βαθμός της μοίρας.



Εικόνα 5-1. Γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος.

Η απόσταση που απαιτείται να υπολογιστεί είναι μεταξύ δύο σημείων που ενδεχομένως να βρίσκονται σε διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος. Για καλύτερη ακρίβεια λαμβάνεται ως γεωγραφικό πλάτος αναφοράς r_{Lat} ο μέσος όρος του γεωγραφικού πλάτους των δύο σημείων. Αφού ο μέσος όρος μετατραπεί σε ακτίνα r_{Lat} στη συνέχεια υπολογίζεται η απόσταση που αντιστοιχεί σε ένα δεκαδικό βαθμό γεωγραφικού πλάτους και η απόσταση που αντιστοιχεί σε ένα δεκαδικό βαθμό γεωγραφικού μήκους σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$m/deg_{Lat} = 111132.92 - (559.82 * \cos(2 * r_{Lat})) + (1.175 * \cos(4 * r_{Lat}))$$

$$m/deg_{Lon} = (111412.84 * \cos(r_{Lat})) - (93.5 * \cos(3 * r_{Lat}))$$

Υπολογίζοντας λοιπόν τη διαφορά των συντεταγμένων μεταξύ των δύο γεωγραφικών σημείων και γνωρίζοντας την απόσταση σε μέτρα που αντιστοιχεί σε μία δεκαδική μοίρα (στο συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος) μπορεί να υπολογιστεί η μεταξύ τους απόσταση σε μέτρα κατά τον άξονα X και Y με ένα πολλαπλασιασμό. Το μήκος του διανύσματος στόχευσης έπειτα υπολογίζεται με το Πυθαγόρειο θεώρημα.

5.1.2 Βαθμονόμηση IMU

Ο αισθητήρας BNO055 περιλαμβάνει εσωτερικούς αλγορίθμους που τρέχουν στον ενσωματωμένο 32-bit μικροελεγκτή για τη διαρκή βαθμονόμηση των γυροσκοπίων, των επιταχυνσιόμετρων και των μαγνητόμετρων [40]. Ο ακριβής τρόπος της διαδικασίας βαθμονόμησης δεν ανακοινώνεται από την εταιρία (black box).

Χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Adafruit_BNO055 και την συνάρτηση `getCalibration()` μπορεί να διαβαστεί η κατάσταση βαθμονόμησης του συστήματος αλλά και κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Η επιστροφή της συνάρτησης είναι τέσσερις καταχωρητές με τιμές από 0 (μη βαθμονομημένα δεδομένα) έως το 3 (πλήρως βαθμονομημένα δεδομένα). Ο πρώτος από τους τέσσερις αριθμούς δείχνει τη συνολική κατάσταση βαθμονόμησης του συστήματος ενώ οι υπόλοιποι τρεις δείχνουν την κατάσταση βαθμονόμησης των γυροσκοπίων, των επιταχυνσιόμετρων και των μαγνητόμετρων, αντίστοιχα.

Ο αισθητήρας BNO055 έχει δύο διαφορετικές λειτουργίες (two fusion mode) σχετικά με την βαθμονόμηση των μαγνητόμετρων. Ρυθμίζοντας την τιμή της μεταβλητής NDoF (TRUE or FALSE) ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται αντίστοιχα, η λειτουργία της γρήγορης βαθμονόμησης των μαγνητόμετρων (Fast Magnetometer Calibration).

Ο αισθητήρας αρχίζει να παράγει δεδομένα μόλις ενεργοποιηθεί. Οι εργοστασιακές ρυθμίσεις του αισθητήρα σχετικά με τους καταχωρητές της κατάστασης βαθμονόμησης είναι αρκετά αυστηρές (tight offset), πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να ληφθούν έγκυρα δεδομένα πριν ακόμα ολοκληρωθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης. Τα δεδομένα δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν η κατάσταση της βαθμονόμησης του συστήματος είναι 0 και ιδιαίτερα όταν είναι ενεργοποιημένη η λειτουργία NDoF. Σε αυτήν την περίπτωση ο αισθητήρας δεν έχει βρει ακόμα τον μαγνητικό Βορρά οπότε και οι τιμές του προσανατολισμού (heading) είναι μηδενικές. Οι τιμές του προσανατολισμού θα γίνουν απόλυτες μόλις ο αισθητήρας εντοπίσει το μαγνητικό Βορρά και ο καταχωρητής της κατάστασης βαθμονόμησης του συστήματος πάρει τιμή 1 ή υψηλότερη.

Για τη δημιουργία έγκυρων δεδομένων βαθμονόμησης θα πρέπει να πληρούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

- **Γυροσκόπια:**
Ο αισθητήρας θα πρέπει να παραμείνει ακίνητος για μικρό χρονικό διάστημα σε οποιαδήποτε θέση.
- **Μαγνητόμετρα:**

Παλαιότερα απαιτούνταν μία κίνηση σχήματος 8 (figure 8) του αισθητήρα στον αέρα αλλά με την λειτουργία NDoF πραγματοποιείται γρήγορη μαγνητική αντιστάθμιση με την επαρκή κανονική κίνηση του αισθητήρα.

- Επιταχυνσιόμετρα:

Ο αισθητήρας θα πρέπει να τοποθετηθεί σε 6 σταθερές θέσεις (+X, -X, +Y, -Y, +Z, και -Z) το οποίο είναι και το πιο δύσκολο σε όλη τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Μπορούν όμως να ληφθούν ποιοτικά δεδομένα από τον αισθητήρα ακόμα και όταν τα επιταχυνσιόμετρα δεν είναι μερικώς ή πλήρως βαθμονομημένα.

Αφού τελειώσει η διαδικασία της βαθμονόμησης οι συντελεστές διατηρούνται μέχρι την απενεργοποίηση του αισθητήρα καθώς δε διαθέτει μνήμη EEPROM για την αποθήκευσή τους. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που γίνεται επανεκκίνηση του αισθητήρα θα πρέπει να εκτελείται η διαδικασία της βαθμονόμησης ή να επαναφέρονται με μη αυτόματο τρόπο οι αποθηκευμένοι συντελεστές βαθμονόμησης. Για την επαναφορά των συντελεστών βαθμονόμησης υπάρχει έτοιμο παράδειγμα στην βιβλιοθήκη της Adafruit_BNO055 που επαναφέρει τους συντελεστές βαθμονόμησης οι οποίοι προηγουμένως έχουν αποθηκευτεί στην μνήμη EEPROM του Arduino. Προσοχή πρέπει να δοθεί όταν επαναφέρονται οι συντελεστές βαθμονόμησης ενώ το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αισθητήρα έχει μεταβληθεί, καθώς σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί επαναβαθμονόμηση των μαγνητόμετρων.

Η επαναφορά των συντελεστών βαθμονόμησης βοηθάει σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει μεταβολή του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον αισθητήρα. Έτσι επιτυγχάνεται μια γρήγορη εκκίνηση του αισθητήρα καθώς δεν απαιτεί κάθε φορά που διακόπτεται η τροφοδοσία ρεύματος να επαναληφθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης του.

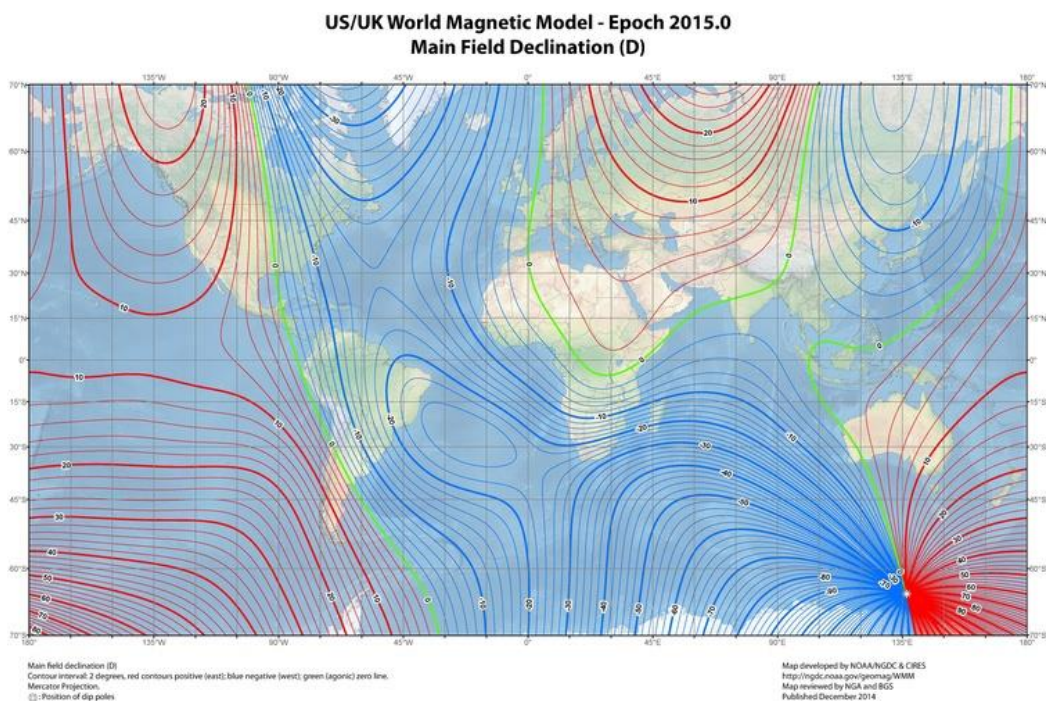
Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να γίνει μία αναφορά στον ορισμό του Βορρά καθώς η αδρανειακή μονάδα (IMU) αντιλαμβάνεται τον μαγνητικό Βορρά ενώ η πληροφορία της γεωγραφικής θέσης από το GPS και στη συνέχεια η επίλυση του κινηματικού προβλήματος πραγματοποιείται με βάση τον πραγματικό – γεωγραφικό Βορρά. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος θα πρέπει να γίνει διόρθωση βάσης της μαγνητικής απόκλισης που αναλύεται παρακάτω.

Ο Βορράς αναφέρεται με διάφορους επιμέρους χαρακτηρισμούς γεγονός που καθιστά αναγκαίο τον ακριβή προσδιορισμό του όταν γίνεται αναφορά σε αυτόν. Υπάρχει ο γεωγραφικός ή πραγματικός Βορράς (True North), ο μαγνητικός Βορράς (Magnetic North), ο Βορράς τετραγωνισμού (Grid North) και ο αστρονομικός Βορράς (Astronomical North). Τον

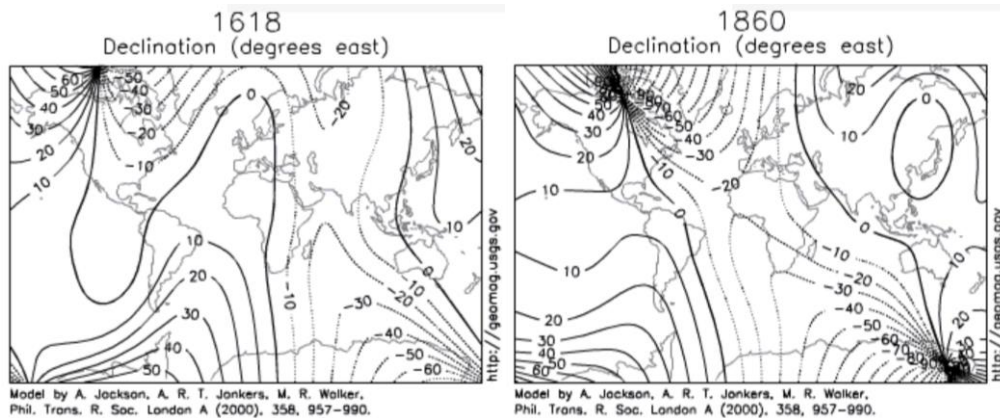
Βορρά τετραγωνισμού δείχνουν οι κάθετες γραμμές τετραγωνισμού του χάρτη ενώ τον αστρονομικό Βορρά τον δείχνει ο πολικός αστέρας.

Ο γεωγραφικός ή πραγματικός Βορράς είναι το σημείο όπου ο άξονας περιστροφής της Γης τέμνει την επιφάνεια της στον βόρειο πόλο και βρίσκεται στην μέση του αρκτικού ωκεανού ενώ ο μαγνητικός βορράς σήμερα βρίσκεται στο νησί Ellesmere στον βόρειο Καναδά. Η απόσταση μεταξύ του πραγματικού και του μαγνητικού Βορρά σήμερα είναι περίπου 1000 χλμ.

Η μαγνητική απόκλιση ή παραλλαγή (magnetic declination or variation) είναι η γωνία στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ του μαγνητικού Βορρά (η κατεύθυνση της βελόνας της πυξίδας, που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση των γραμμών του μαγνητικού πεδίου της γης) και του πραγματικού Βορρά (η κατεύθυνση κατά μήκος ενός μεσημβρινού προς το Βόρειο πόλο) [41]. Αυτή η γωνία ποικίλει ανάλογα με τη θέση στην επιφάνεια της Γης και αλλάζει με την πάροδο του χρόνου (Εικόνα 5-2 και Εικόνα 5-3).

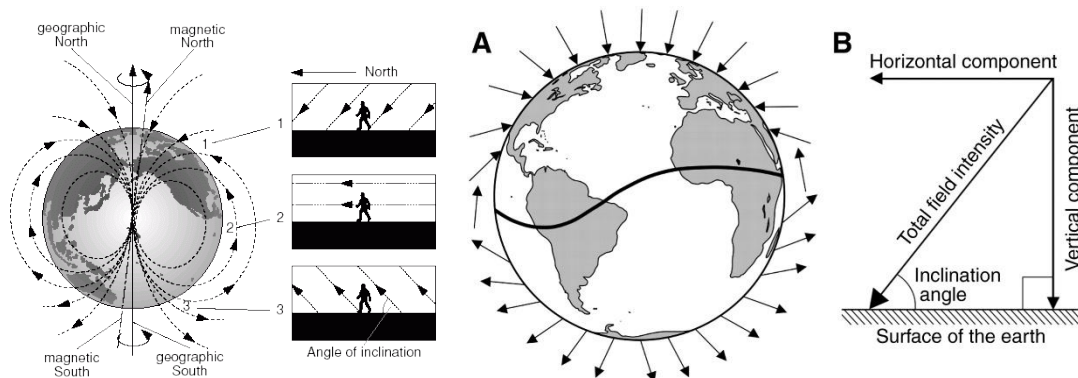


Εικόνα 5-2. Το παγκόσμιο μοντέλο μαγνητικής απόκλισης το 2015.



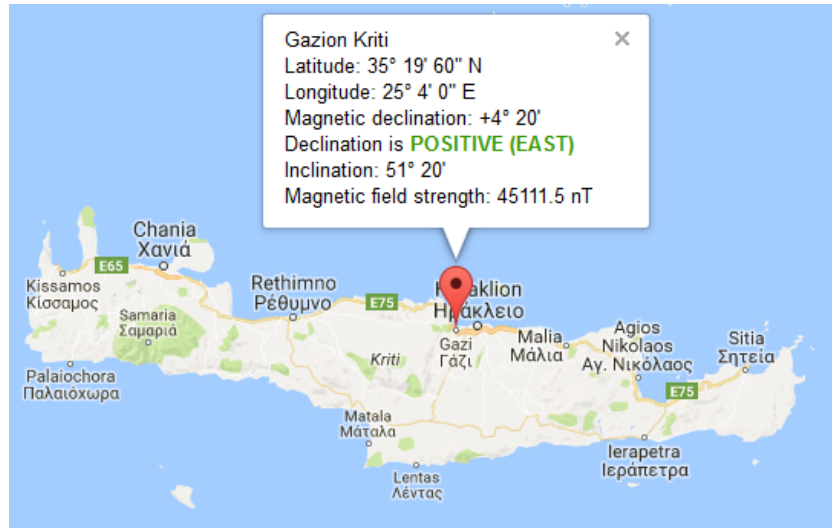
Εικόνα 5-3. Η αλλαγή της μαγνητικής απόκλισης με την πάροδο του χρόνου.

Η μαγνητική κλίση (magnetic inclination) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και των γραμμών του μαγνητικού πεδίου της γης. Η γωνία αυτή ποικίλει ανάλογα με τη θέση πάνω στην επιφάνεια της γης (Εικόνα 5-4). Η μαγνητική κλίση είναι ιδιαίτερα σημαντική στην αεροπλοΐα.



Εικόνα 5-4. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου της γης και η μαγνητική κλίση [42].

Η μαγνητική απόκλιση τον Αύγουστο του 2017 στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης ήταν $+4.2^\circ$ και η μαγνητική κλίση 51.2° (Εικόνα 5-5). Η διόρθωση που θα πρέπει να γίνεται στο πρόγραμμα κατά περιόδους για την ορθή στόχευση είναι η τιμή της μαγνητικής απόκλισης (magnetic declination).



Εικόνα 5-5. Η μαγνητική απόκλιση και η μαγνητική κλίση στο Ηράκλειο Κρήτης τον Αύγουστο του 2017 [43].

5.1.3 Αλγόριθμος αναγνώρισης νότου – πολλαπλών περιστροφών

Η γωνία περιστροφής της πρώτης άρθρωσης βγαίνει από την επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος σε εύρος από -180° έως 180° και οι 0° αντιστοιχούν στον βορρά. Αυτό δημιουργούσε πρόβλημα στην στόχευση προς το Νότο. Όταν πχ. η ένδειξη της πυξίδας ήταν -179° και την επόμενη χρονική στιγμή 179° σημαίνει ότι η μεταβολή της γωνίας ήταν 2° . Οι βηματικοί κινητήρες οδηγούνται από την βιβλιοθήκη Accelstepper με απόλυτη θέση οπότε σωστά και ο μηχανισμός ξεκινούσε να κάνει τον κύκλο ώστε να πάει από της -179° στις 179° (δηλ. κάνοντας 358° αντί για 2°).

Η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος δείχνει απλή αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι και τόσο. Μία απλή και γρήγορη λύση που θα σκεφτόταν κάποιος θα ήταν ο μετασχηματισμός της γωνίας από το διάστημα $[-180^\circ - 180^\circ]$ στο διάστημα $[0^\circ - 360^\circ]$. Αυτός όμως ο τρόπος λύνει εν μέρει το πρόβλημα με το Νότο, καθώς το ίδιο πρόβλημα μεταφέρετε στο Βορρά. Εκεί δηλαδή που από απόλυτη θέση 1° την επόμενη χρονική στιγμή θα βρίσκεται σε απόλυτη θέση 359° , που στην πραγματικότητα όμως αντιστοιχούν σε μία διαφορά 2° και όχι 358° .

Το πρόβλημα αυτό τελικά λύθηκε με την αποθήκευση της προηγούμενης τιμής της $1^{\text{ης}}$ γωνίας και με τα εξής βήματα:

1. Εύρεση της διαφοράς της νέας γωνίας από την προηγούμενη τιμή της.
2. Αποθήκευση της νέας γωνίας ως προηγούμενη τιμή.
3. Έλεγχος αν η διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από 180° .
Αν είναι, σημαίνει ότι γίνεται αριστερόστροφη κίνηση, οπότε αφαιρούμε μία μονάδα από μία μεταβλητή η οποία ξεκίνησε με μηδενική τιμή.
4. Έλεγχος αν η διαφορά τους είναι μικρότερη από -180° .
Αν είναι, σημαίνει ότι γίνεται δεξιόστροφη κίνηση, οπότε προσθέτουμε μία μονάδα στη μεταβλητή.
5. Έλεγχος της μεταβλητής
Αν η μεταβλητή δεν έχει μηδενική τιμή τότε η έξοδος θα είναι το άθροισμα της νέας γωνίας με το γινόμενο της μεταβλητής με τις 360° του κύκλου, διαφορετικά η έξοδος δεν θα μεταβληθεί οπότε και θα κρατήσει την τιμή της νέας γωνίας αφού δεν θα έχουν πραγματοποιηθεί περιστροφές.

Τα παραπάνω βήματα σε κώδικα γράφονται:

```
dif_a=a-previous_a;
previous_a=a;
if (dif_a>180.0)
    var--;
if (dif_a<-180.0)
    var++;
if (!var==0)
    a_out=turn*360.0+a;
else
    a_out=a;
```

Το αποτέλεσμα του παραπάνω αλγόριθμου είναι ότι όταν γίνεται η αλλαγή του τεταρτημόριου στο Νότο μεταβάλλει την έξοδο προσθέτοντας ή αφαιρώντας αντίστοιχα 360° . Έτσι στο παράδειγμα που αναφέρεται παραπάνω αντί ο μηχανισμός να κάνει ολόκληρο τον κύκλο θα μετακινηθεί μόνο δύο μοίρες γιατί η έξοδος θα είναι -181° και σε περίπτωση που συνεχίσει με την ίδια φορά σταματώντας στο ίδιο σημείο, τότε η έξοδος θα είναι -541° και ούτω καθεξής.

Το γεγονός ότι η έξοδος του πρωτεύων ελεγκτή μετατρέπεται σε απόλυτη γωνιακή θέση (από το σημείο εκκίνησης) καθιστά τον παραπάνω αλγόριθμο χρήσιμο και σε άλλες εφαρμογές.

5.2 Δευτερεύων ελεγκτής (Slave)

Ο δευτερεύων ελεγκτής (Slave) χρησιμοποιείται για την οδήγηση των βηματικών κινητήρων με βάση την πληροφορία (γωνίες yaw, pitch και roll) που παίρνει από τον πρωτεύων ελεγκτή (Master). Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων πραγματοποιείται από τους οδηγούς βηματικών κινητήρων A4988 της Pololu δίνοντας τους ένα ψηφιακό σήμα για την επιθυμητή κατεύθυνση περιστροφής (DIR) και ένα ψηφιακό σήμα για την εκτέλεση ενός βήματος – μικροβήματος (STEP). Επίσης με τον δευτερεύων ελεγκτή πραγματοποιείται η αρχική τοποθέτηση των αρθρώσεων του σφαιρικού καρπού στο μηδενικό – αρχικό τους σημείο με βάση την πληροφορία που εξάγεται από τους αισθητήρες εγγύτητας.

Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων πραγματοποιείται με την βοήθεια της βιβλιοθήκης AccelStepper [44]. Η βιβλιοθήκη αυτή είναι αρκετά βελτιωμένη σε σχέση με την ενσωματωμένη στο IDE του Arduino βιβλιοθήκη Stepper, σε διάφορους τομείς. Υποστηρίζει ταυτόχρονη οδήγηση πολλαπλών βηματικών κινητήρων με ανεξάρτητη οδήγηση του καθένα, επιτάχυνση και επιβράδυνση, πολύ χαμηλές ταχύτητες, απόλυτη και σχετική θέση κ.ά.

Στην αρχή του προγράμματος δηλώνονται οι βηματικοί κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν, οι ακροδέκτες που είναι συνδεδεμένοι και ο τρόπος οδήγησης του κάθε κινητήρα δημιουργώντας ένα class για κάθε κινητήρα ξεχωριστά. Έπειτα δηλώνονται τα μικροβήματα για κάθε κινητήρα καθώς και οι ρυθμίσεις επιτάχυνσης – επιβράδυνσης και μέγιστης ταχύτητας.

Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση 'setCurrentPosition()' ορίζονται οι μηδενικές – αρχικές θέσεις των κινητήρων. Στην συνάρτηση 'moveTo()' δηλώνεται η επιθυμητή απόλυτη θέση, σε σχέση με την θέση 0, με μεταβλητή τύπου signed long int. Οι αρνητικές τιμές βρίσκονται αριστερόστροφα της θέσης 0. Με την κλήση της συνάρτησης 'run()' ο κινητήρας θα κινηθεί κατά ένα βήμα από την τρέχουσα προς την επιθυμητή θέση, εφόσον δεν έχει ήδη φτάσει, η οποία έχει τεθεί από την πιο πρόσφατη κλήση της συνάρτησης 'moveTo()'. Με τη συνάρτηση 'run()' εφαρμόζονται οι ρυθμίσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης έως την επίτευξη της επιθυμητής θέσης για αυτό θα πρέπει να καλείται όσο συχνότερα γίνεται και κατά προτίμηση στον κεντρικό βρόγχο.

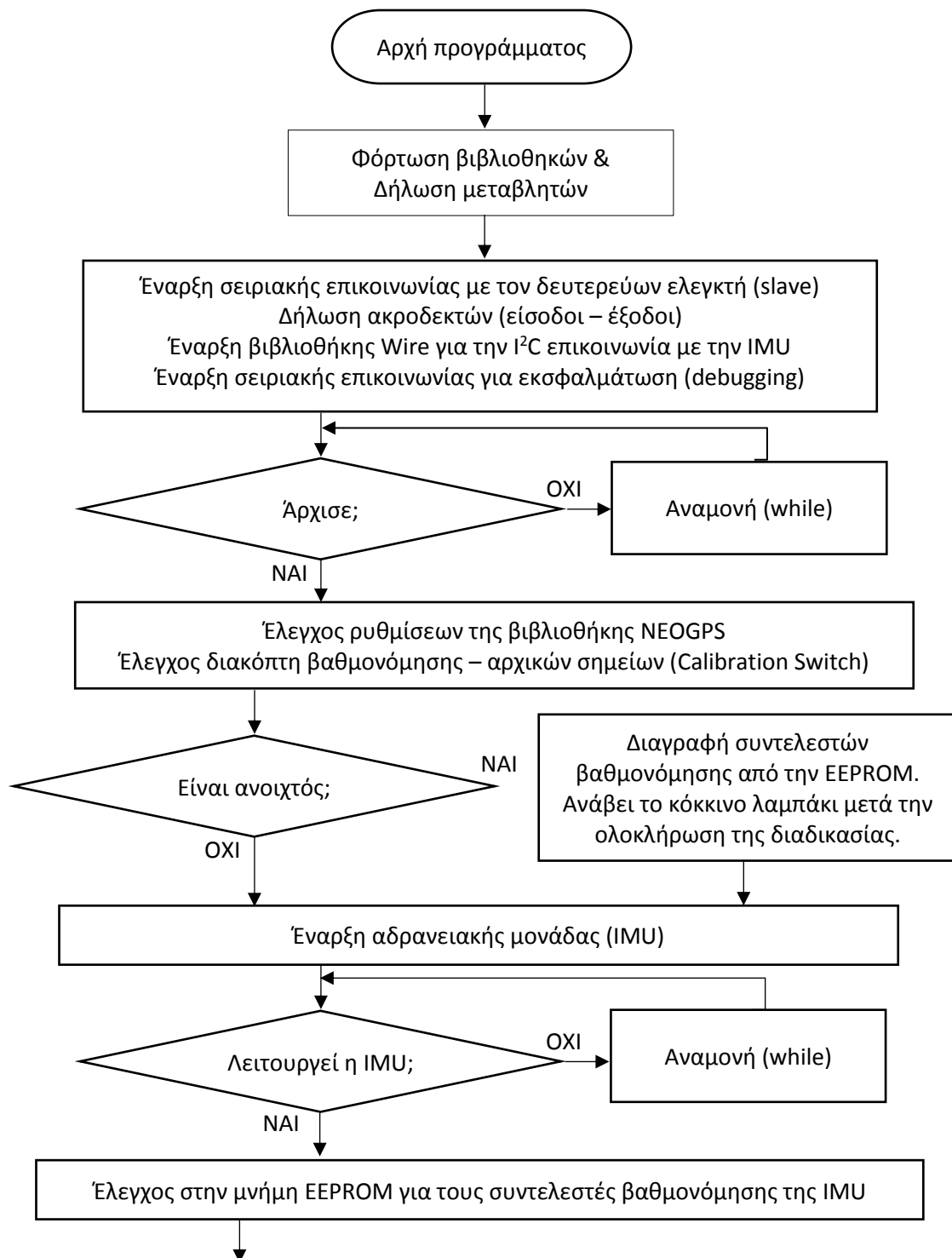
Η ρύθμιση της επιτάχυνσης πραγματοποιείται με τη συνάρτηση 'setAcceleration()'. Η μεταβλητή που δέχεται είναι τύπου float και πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0 steps/sec^2 . Η κλήση της συνάρτησης αυτής κοστίζει υπολογιστικά καθώς απαιτεί τον υπολογισμό τετραγωνικής ρίζας. Για αυτό συνίσταται να μην καλείται συχνότερα από όσο χρειάζεται. Η επιτάχυνση του $1^{ου}$, $2^{ου}$ και $3^{ου}$ κινητήρα είναι ορισμένη στα 2500, 4000 και 4000 steps/sec^2 , αντίστοιχα.

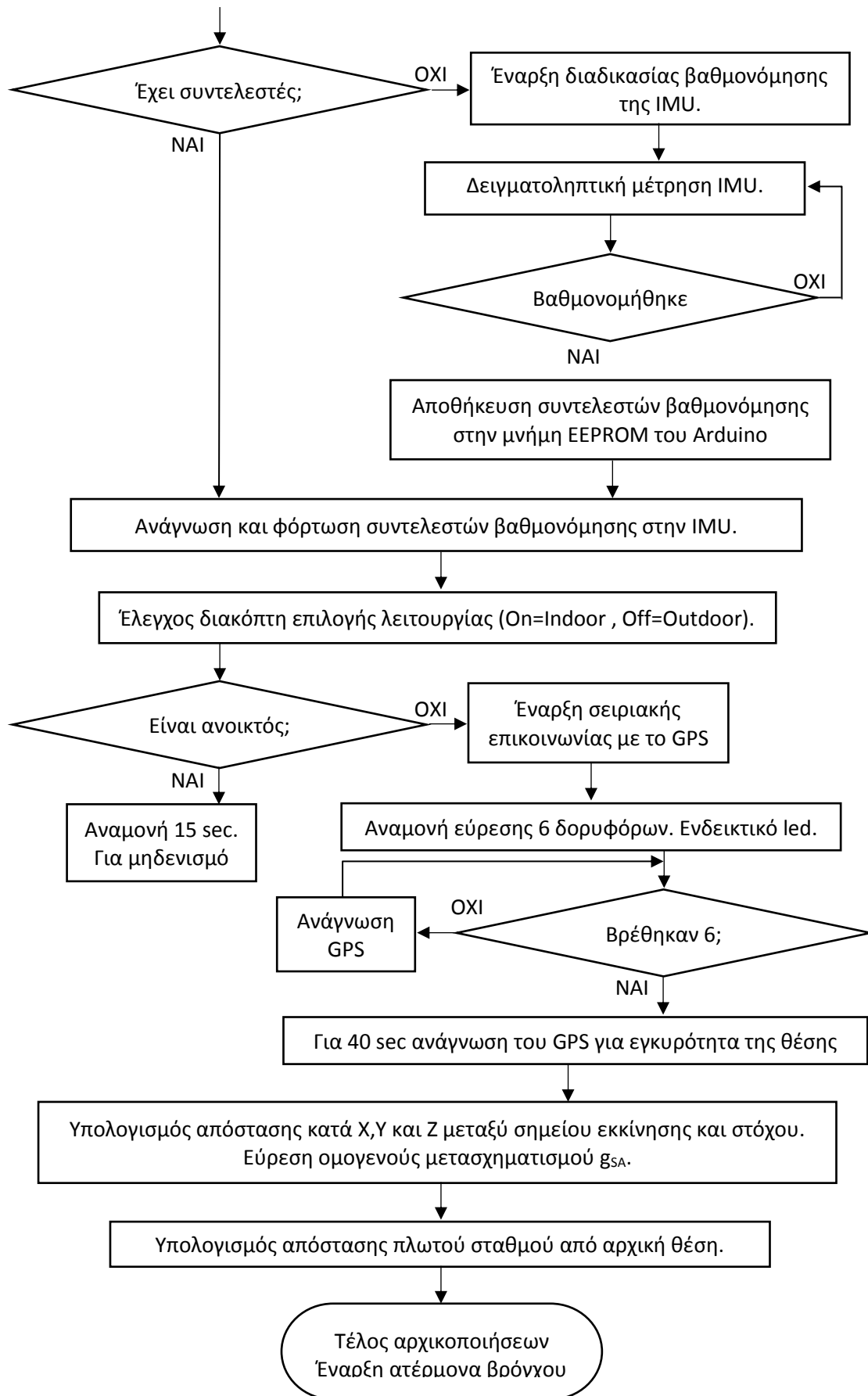
Η ρύθμιση της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας πραγματοποιείται με τη συνάρτηση 'setMaxSpeed()'. Ο τύπος της μεταβλητής που δέχεται είναι float και πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0 steps/sec . Η συνάρτηση run() θα επιταχύνει τον κινητήρα μέχρι την μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα που ορίζεται από την συνάρτηση 'setMaxSpeed()'. Θα πρέπει να δοθεί προσοχή καθώς η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από τον μικροελεγκτή και την συχνότητα ρολογιού του. Η ταχύτητα του 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} κινητήρα αντίστοιχα ήταν ρυθμισμένη στα 800, 800 και 600 steps/sec , αντίστοιχα.

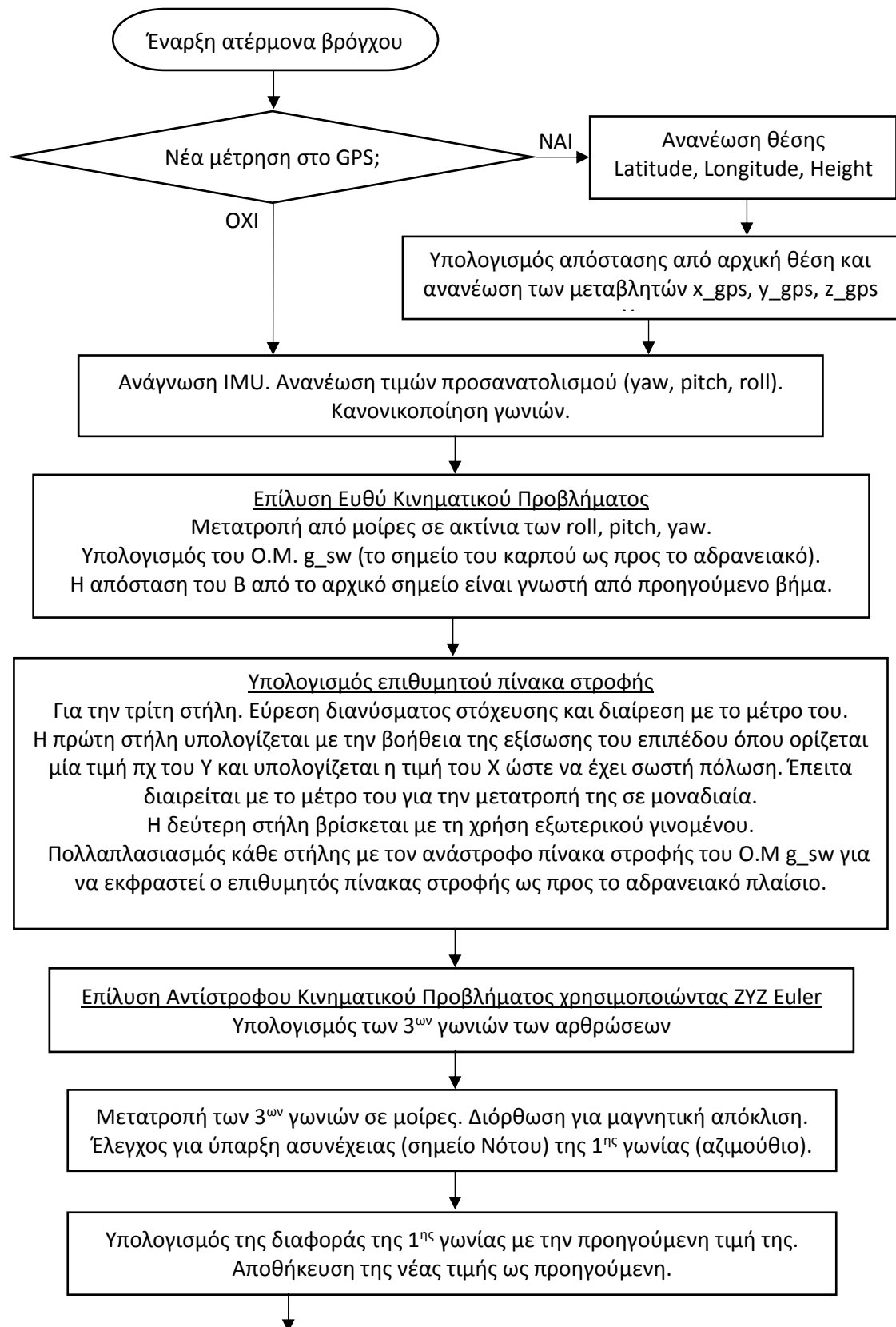
Για την εύρεση των μηδενικών – αρχικών σημείων κάθε κινητήρα χρησιμοποιείται διαδοχικά η συνάρτηση go_start() η οποία δημιουργήθηκε για το σκοπό αυτό. Με την εκκίνηση της συγκεκριμένης συνάρτησης διαβάζεται η ένδειξη του αισθητήρα εγγύτητας (proximity sensor). Στην περίπτωση που η θέση της άρθρωσης είναι κοντά στο μηδενικό σημείο πριν την διαδικασία εύρεσης του μηδενικού σημείου γίνεται απομάκρυνση της άρθρωσης από αυτό. Σε διαφορετική περίπτωση ακολουθείται η διαδικασία εύρεσης του μηδενικού σημείου κατά την οποία διαβάζεται ο αισθητήρας εγγύτητας και εφόσον δεν υπάρχει ένδειξη κινείται ο κινητήρας κατά ένα βήμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως να υπάρξει κάποια ένδειξη από τον αισθητήρα εγγύτητας. Με την ύπαρξη ένδειξης ο κινητήρας εκτελεί προκαθορισμένο αριθμό βημάτων ώστε να φτάσει στο μηδενικό σημείο. Έπειτα ακινητοποιείται και δηλώνεται το σημείο αυτό ως αρχικό.

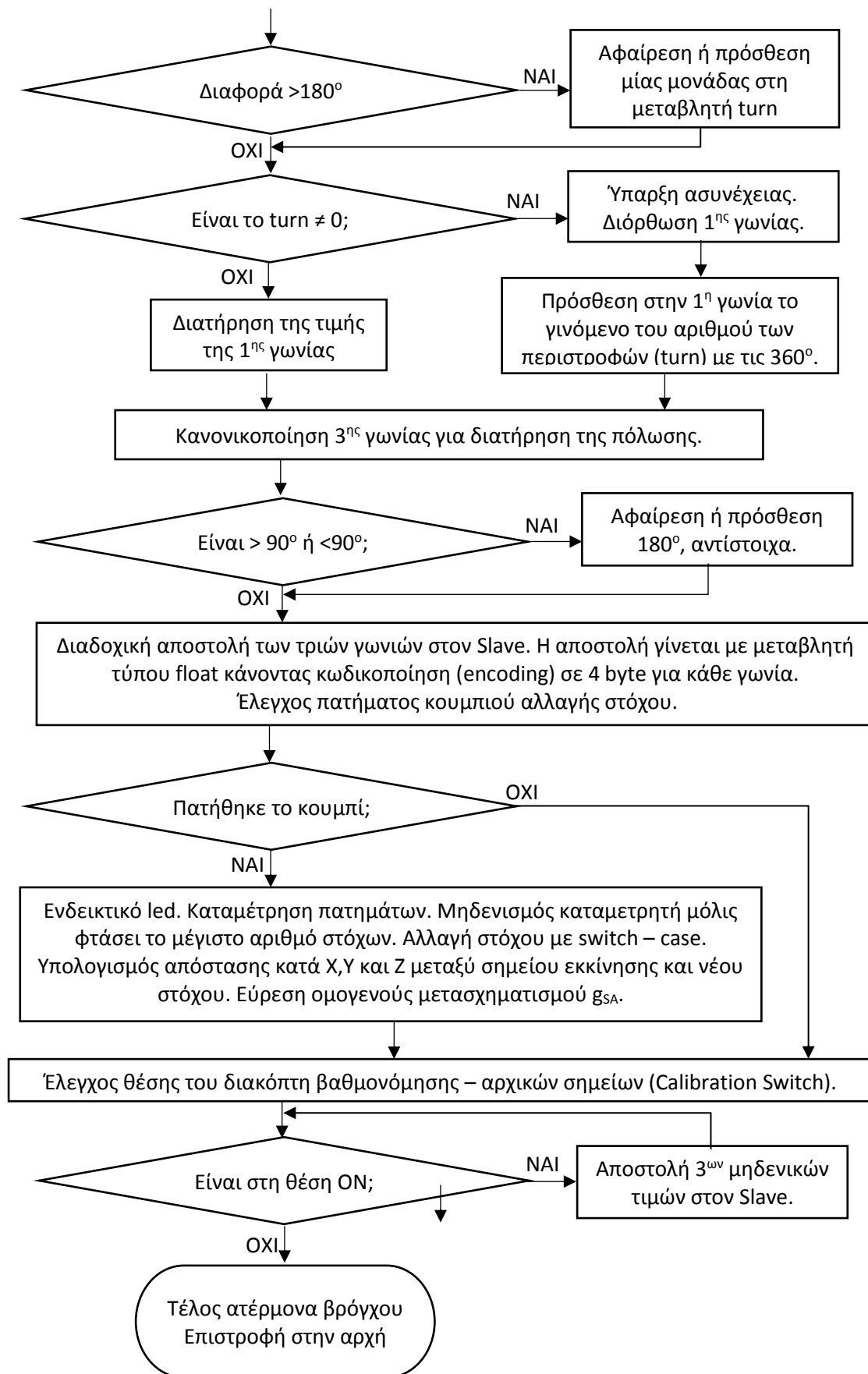
Στον ατέρμονα βρόγχο για όσο δεν υπάρχουν νέες τιμές γωνιών στη σειριακή θύρα εκτελείται η συνάρτηση 'run()' για κάθε κινητήρα διαδοχικά. Όταν υπάρχουν διαθέσιμα 12 bytes στη σειριακή γίνεται η ανάγνωση τους και η ανοικοδόμηση των float γωνιών χρησιμοποιώντας pointers. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο αριθμός των βημάτων ανάλογα με την σχέση μετάδοσης και τη ρύθμιση των μικροβημάτων του κάθε κινητήρα. Έπειτα καλείται διαδοχικά η συνάρτηση 'moveTo()' ορίζοντας τις νέες επιθυμητές θέσεις των αρθρώσεων σε απόλυτα βήματα.

5.3 Διάγραμμα ροής πρωτεύων ελεγκτή

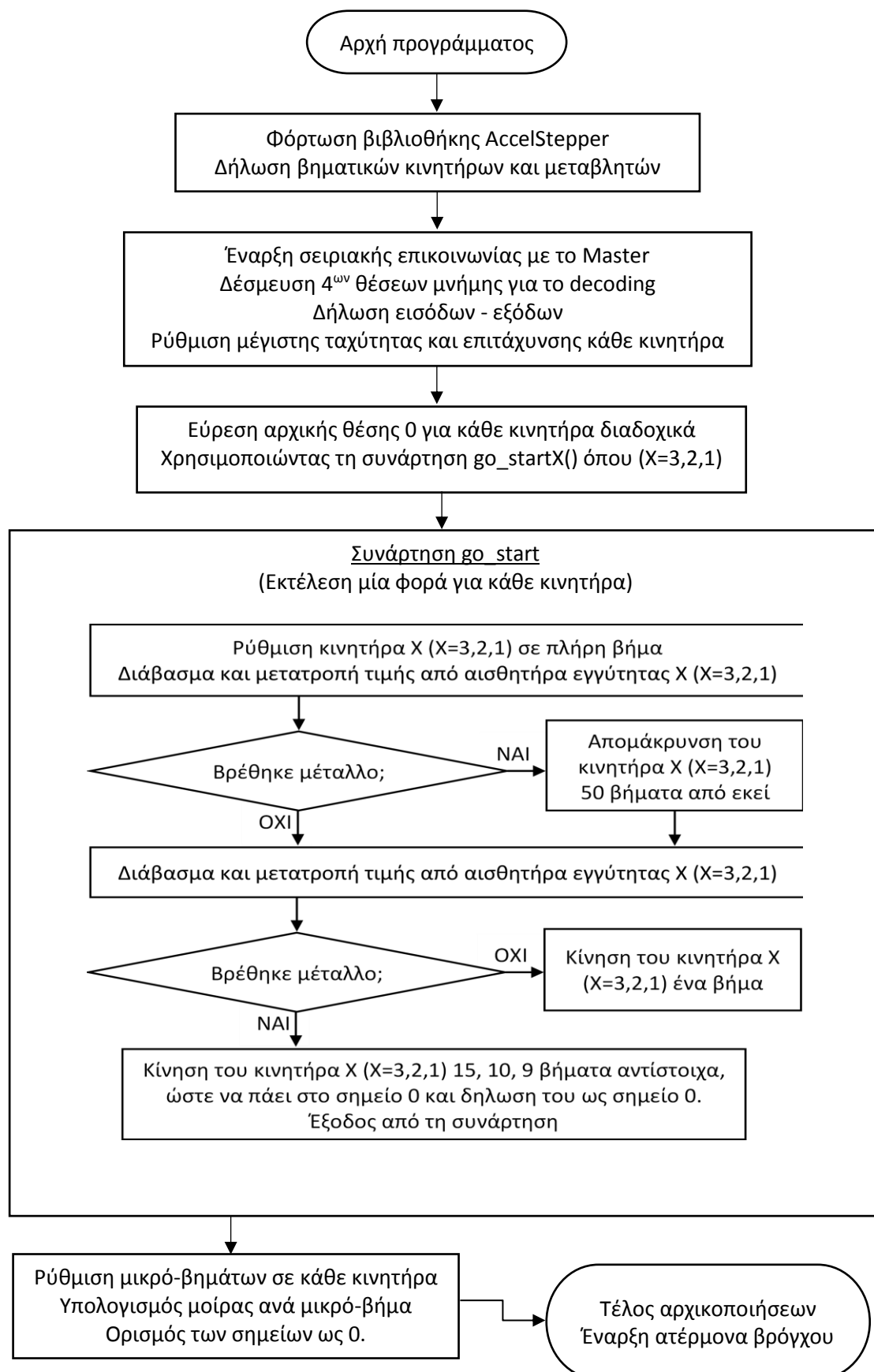


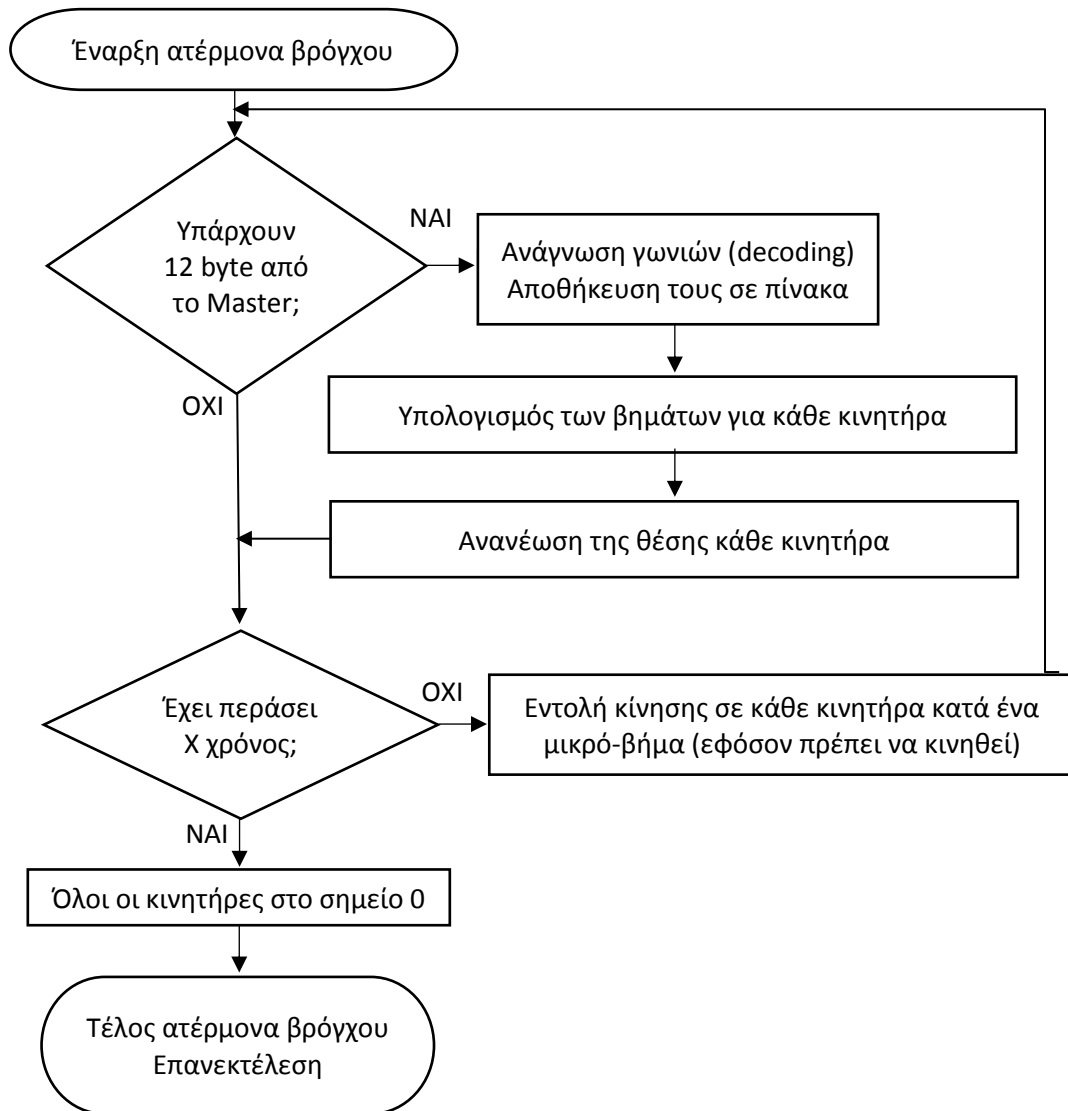






5.4 Διάγραμμα ροής δευτερέων ελεγκτή





Κεφάλαιο

6

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών και γίνεται η αξιολόγηση του συστήματος. Αρχικά γίνεται έλεγχος της αδρανειακής μονάδας (IMU) και στη συνέχεια ελέγχεται η σκόπευση και η ικανότητα διατήρησης της. Ακολουθεί ο έλεγχος σωστής λειτουργίας των αλγορίθμων και η εξωτερική δοκιμή του όλου συστήματος.

6. Πειραματικά αποτελέσματα και αξιολόγηση συστήματος στόχευσης

Για την αξιολόγηση του συστήματος έγιναν διάφοροι έλεγχοι των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Αρχικά γίνονται κάποιοι έλεγχοι της αδρανειακής μονάδας (IMU) που σκοπό έχουν να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των μετρήσεων της. Οι έλεγχοι που γίνονται είναι: για τη αρχική βαθμονόμηση της και για τη διατήρηση του προσανατολισμού μετά από τη διακοπή της τροφοδοσίας του αισθητήρα, την αντιστάθμιση κλίσης, για την ακρίβεια της και στις 360°, για την παρεκτροπή της πυξίδας, για την επιρροή της σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία, για την ακρίβεια στις κλίσεις (roll, pitch) και τέλος για την απόδοση του φίλτρου.

Στη συνέχεια γίνονται έλεγχοι για την ορθή στόχευση και την ικανότητα διατήρησης της καθώς και έλεγχοι ορθής λειτουργίας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται. Τέλος

παρουσιάζεται η δοκιμή σε εξωτερικό περιβάλλον η οποία συνδυάζει όλους τους παραπάνω ελέγχους.

Συγκεκριμένα ο έλεγχος αζιμουθιακής στόχευσης και απόστασης καθώς και ο έλεγχος υψομετρικής στόχευσης πραγματοποιήθηκαν διατηρώντας ακίνητη τη βάση του συστήματος στόχευσης. Με τους παραπάνω ελέγχους διαπιστώνεται η ορθή αζιμουθιακή και υψομετρική στόχευση καθώς και η ακρίβεια του αλγόριθμου υπολογισμού αποστάσεων.

Ο έλεγχος διατήρησης της σκόπευσης έγινε κινώντας τον μηχανισμό χειροκίνητα προς όλες τις κατευθύνσεις και με οπτική παρατήρηση του προσανατολισμού της κεραίας. Στη συνέχεια περιστρέφοντας τον σφαιρικό καρπό γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του έγινε ο έλεγχος ορθής λειτουργίας του αλγόριθμου αναγνώρισης του νότου – πολλαπλών περιστροφών.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος για την ανανέωση της θέσης του μηχανισμού και ο έλεγχος της επίδρασης της μεταβλητής link. Ο σκοπός των δύο αυτών ελέγχων είναι για την εξακρίβωση της ορθής στόχευσης του μηχανισμού καθώς μεταβάλλονται οι συντεταγμένες της θέσης και η μεταβλητή link, αντίστοιχα.

Τέλος πραγματοποιείται η δοκιμή σε εξωτερικό περιβάλλον όπου συνδυάζονται όλοι οι παραπάνω έλεγχοι και γίνεται η αξιολόγηση του συστήματος.

6.1 Έλεγχος αδρανειακής μονάδας (IMU)

Οι δύο πρώτοι έλεγχοι της αδρανειακής μονάδας (IMU) έγιναν ώστε να διαπιστωθεί η ορθή βαθμονόμηση, η ικανότητα διατήρησης του προσανατολισμού της μετά από επανεκκίνηση του συστήματος καθώς και η ακρίβεια του προσανατολισμού σε όλο το εύρος μέτρησης (και στις 360°).

Με τον τρίτο έλεγχο διαπιστώνεται αν η αδρανειακή μονάδα αντισταθμίζει ικανοποιητικά την κλίση (Compass Tilt Compensate) της πυξίδας. Η αντιστάθμιση κλίσης της πυξίδας είναι απαραίτητη στην συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς η αδρανειακή μονάδα καλείται να λειτουργήσει πάνω σε ένα πλωτό σταθμό όπου η κλίση του λόγω του κυματικού δυναμικού είναι δεδομένο.

Ο τέταρτος έλεγχος αποσκοπεί στην εύρεση της παρεκτροπής της πυξίδας (compass drift) με το πέρασμα του χρόνου ενώ ο πέμπτος έλεγχος σκοπό έχει να ερευνήσει αν

επηρεάζεται η πυξίδα σε μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται γύρω της πχ αν πλησιάσει ένα μαγνητικό υλικό στην αδρανειακή μονάδα (IMU).

Τέλος γίνεται έλεγχος της ακρίβειας σε κλίσεις (roll και pitch) καθώς και ο έλεγχος της απόδοσης του φίλτρου που χρησιμοποιεί η αδρανειακή μονάδα (IMU).

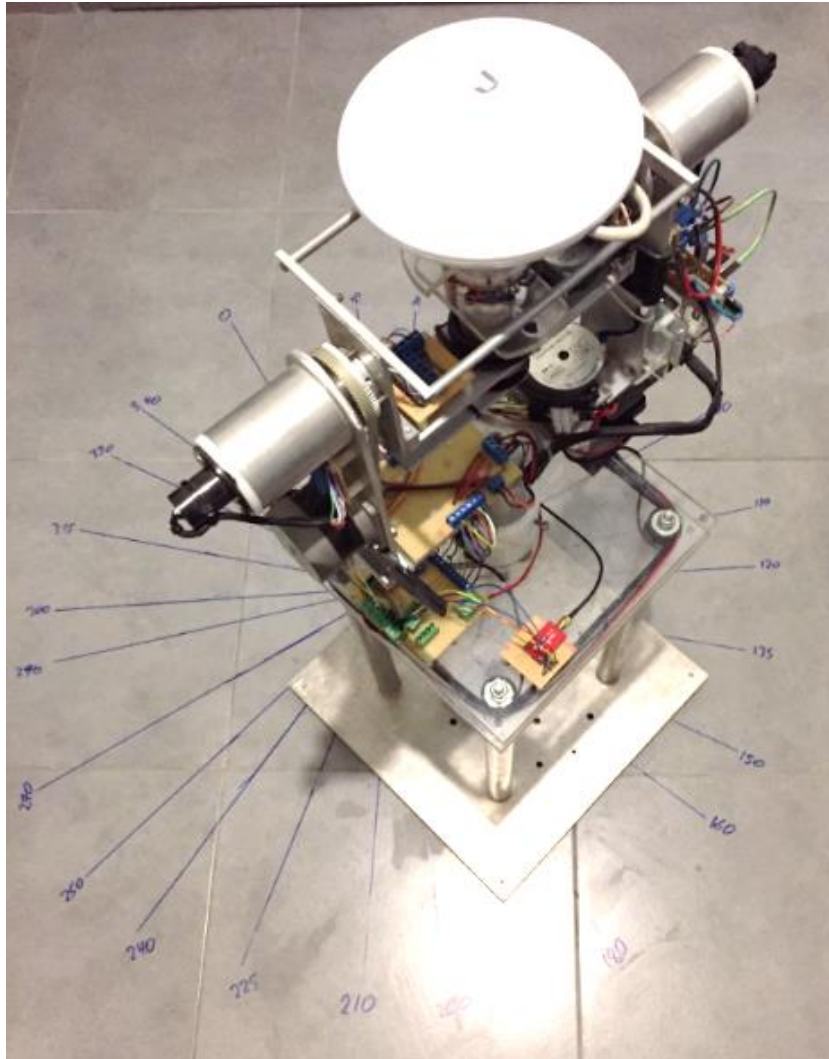
6.1.1 Έλεγχος ορθής βαθμονόμησης

Ο έλεγχος αυτός είχε σκοπό αφενός τη διαπίστωση της ορθής βαθμονόμησης και αφετέρου τη διαπίστωση της διατήρησης του πραγματικού προσανατολισμού μετά από διακοπή της τροφοδοσίας του αισθητήρα.

Για τον έλεγχο της ορθής βαθμονόμησης αρχικά βρέθηκε ο πραγματικός βορράς με την βοήθεια της κλασικής πυξίδας προσθέτοντας τη μαγνητική απόκλιση ($+4,2^\circ$) και στη συνέχεια σχεδιάστηκε στο πάτωμα η κατεύθυνση του. Έπειτα έγινε ένας δεύτερος έλεγχος του πραγματικού βορρά με την πυξίδα ενός βαθμονομημένου Smartphone. Αφού λοιπόν είχε πλέον βρεθεί η κατεύθυνση του πραγματικού βορρά σχεδιάστηκαν και οι υπόλοιπες γωνίες όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-1.

Αφού πραγματοποιήθηκε επιτυχώς η βαθμονόμηση της IMU, όπως περιγράφεται στο κεφ. 5.1.2, ακολούθησε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ευθυγραμμίζοντας χειροκίνητα την βάση του συστήματος στόχευσης, με τις σχεδιασμένες γραμμές στο πάτωμα και ελέγχοντας τις ενδείξεις της IMU στην οθόνη του υπολογιστή.

Για να διαπιστωθεί η διατήρηση του πραγματικού προσανατολισμού παρέμεινε ακίνητος ο μηχανισμός κάνοντας 10 επανεκκινήσεις της IMU διακόπτοντας τελείως την τροφοδοσία ρεύματος. Αυτό έγινε για δύο διαφορετικές γωνίες της βάσης του μηχανισμού (περίπου 0° και -30°). Η έξοδος της αδρανειακής μονάδας (IMU) αποστέλλονταν με σειριακή επικοινωνία στον υπολογιστή και έτσι προέκυψε ο Πίνακας 6-1 και τα διαγράμματα των Εικόνα 6-2 και Εικόνα 6-3 τα οποία δείχνουν τις τιμές, μόνο, της γωνίας γ_{aw} που εξετάζεται.

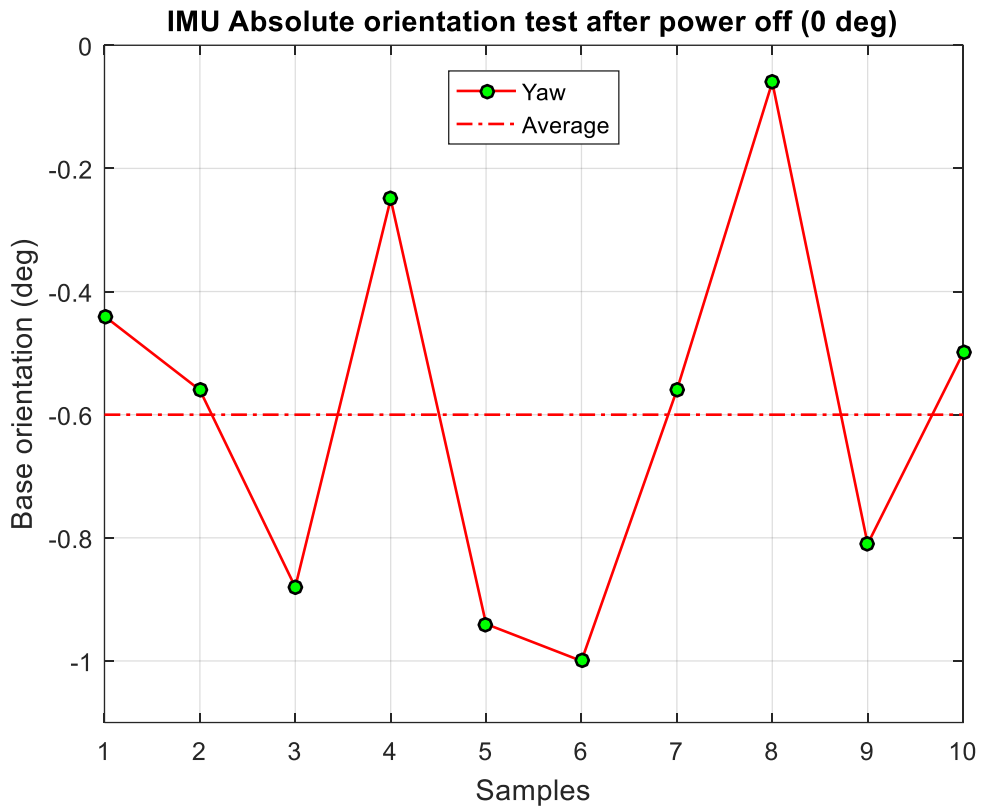


Εικόνα 6-1. Σταθερό μοιρογνωμόνιο για τον έλεγχο της ορθής βαθμονόμησης της αδρανειακής μονάδας (IMU).

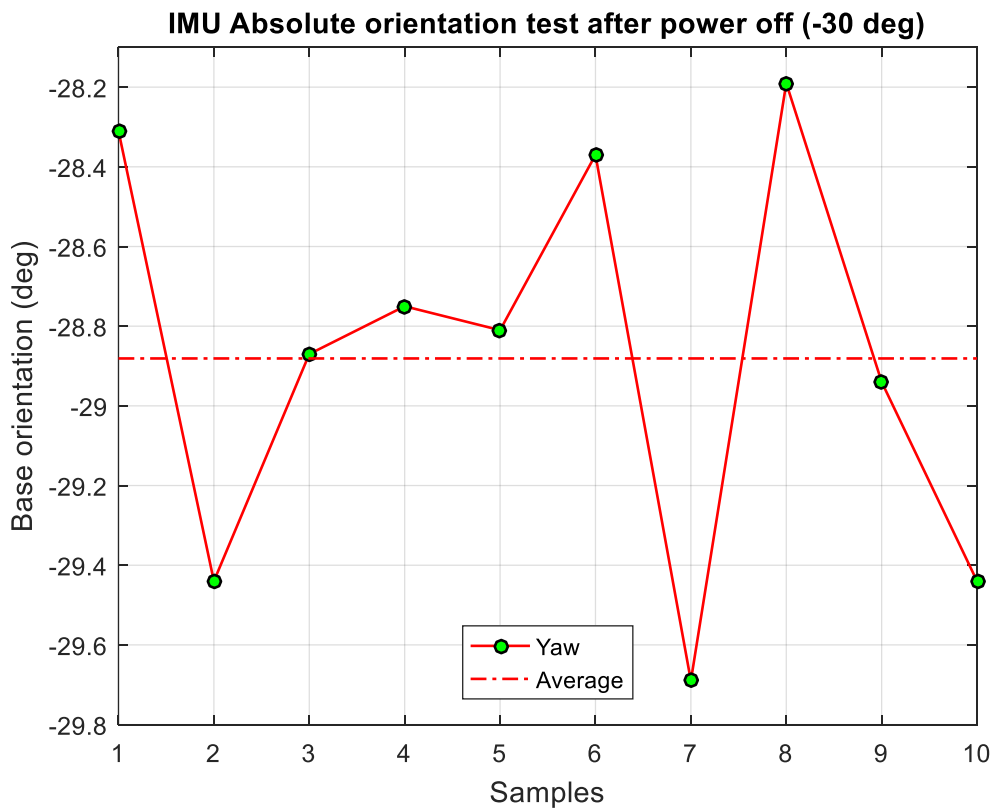
Πίνακας 6-1. Οι τιμές της IMU μετά από 10 επανεκκινήσεις για δύο διαφορετικές γωνίες.

	Samples									
0°	-0.44	-0.56	-0.88	-0.25	-0.94	-1.00	-0.56	-0.06	-0.81	-0.50
-30°	-28.31	-29.44	-28.87	-28.75	-28.81	-28.37	-29.69	-28.19	-28.94	-29.44

Σύμφωνα με τον παρακάτω διαγράμματα η μέγιστη διαφορά που προέκυψε μεταξύ δύο επανεκκινήσεων ήταν περίπου 1.5° το οποίο θεωρείται αποδεκτό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή



Εικόνα 6-2. Τιμές προσανατολισμού μετά από 10 επανεκκινήσεις στις 0°.

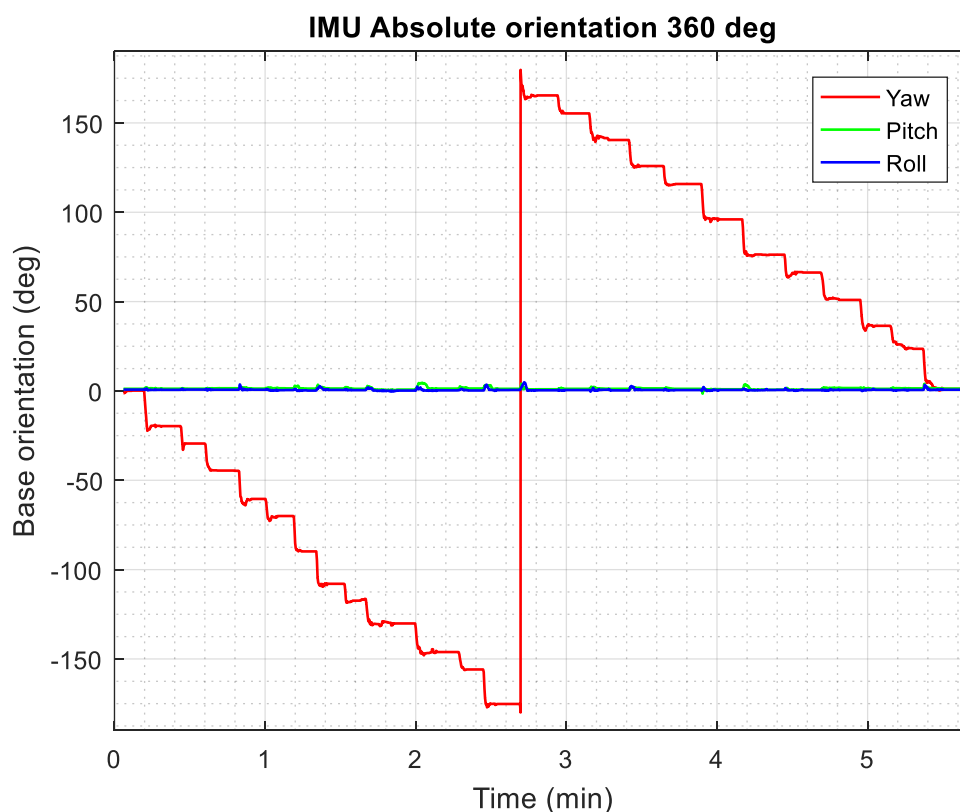


Εικόνα 6-3. Τιμές προσανατολισμού μετά από 10 επανεκκινήσεις στις -30°.

6.1.2 Διατήρηση προσανατολισμού και στις 360°

Ο δεύτερος έλεγχος έγινε για να διαπιστωθεί η διατήρηση της ακρίβειας του προσανατολισμού και στις 360°. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των διαγραμμισμένων σημείων του ορίζοντα που υπήρχαν στο πάτωμα (Εικόνα 6-1).

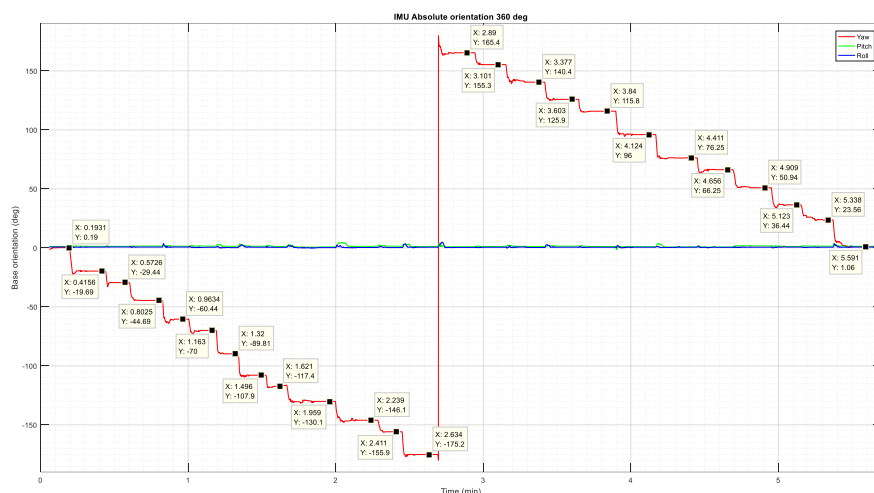
Ο χειριστής προσπαθούσε χειροκίνητα να ευθυγραμμίσει τη βάση του μηχανισμού με κάθε διαγραμμισμένη γραμμή για 360°. Όταν θεωρούσε, με οπτική παρατήρηση, ότι το είχε καταφέρει άφηνε ακίνητο το μηχανισμό για λίγα δευτερόλεπτα σε αυτήν την θέση και έπειτα προχωρούσε στην επόμενη γωνία. Αυτό έγινε για 24 διαφορετικές γωνίες καθώς η 25^η γωνία ήταν η ίδια με την αρχική. Κατά την διάρκεια του ελέγχου καταγράφονταν η έξοδος της IMU καθώς και ο χρόνος. Εκτυπώνοντας τα δεδομένα προέκυψε το διάγραμμα της Εικόνα 6-4 στο οποίο φαίνεται η έξοδος της IMU χρονικά. Επίσης μπορούν να διακριθούν οι κινήσεις του χειριστή.



Εικόνα 6-4. Ο προσανατολισμός της βάσης κατά το έλεγχο ακρίβειας και στις 360°.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το εργαλείο Data Cursor του Matlab βρέθηκαν με ακρίβεια οι τιμές της καταγεγραμμένης γωνίας yaw και για τα 25 δείγματα (Εικόνα 6-5). Οι τιμές αυτές συμπληρώθηκαν στον Πίνακα 6-2, υπολογίστηκε το σφάλμα ως η διαφορά της μετρούμενης από την πραγματική τιμή και έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα των Εικόνα 6-6,

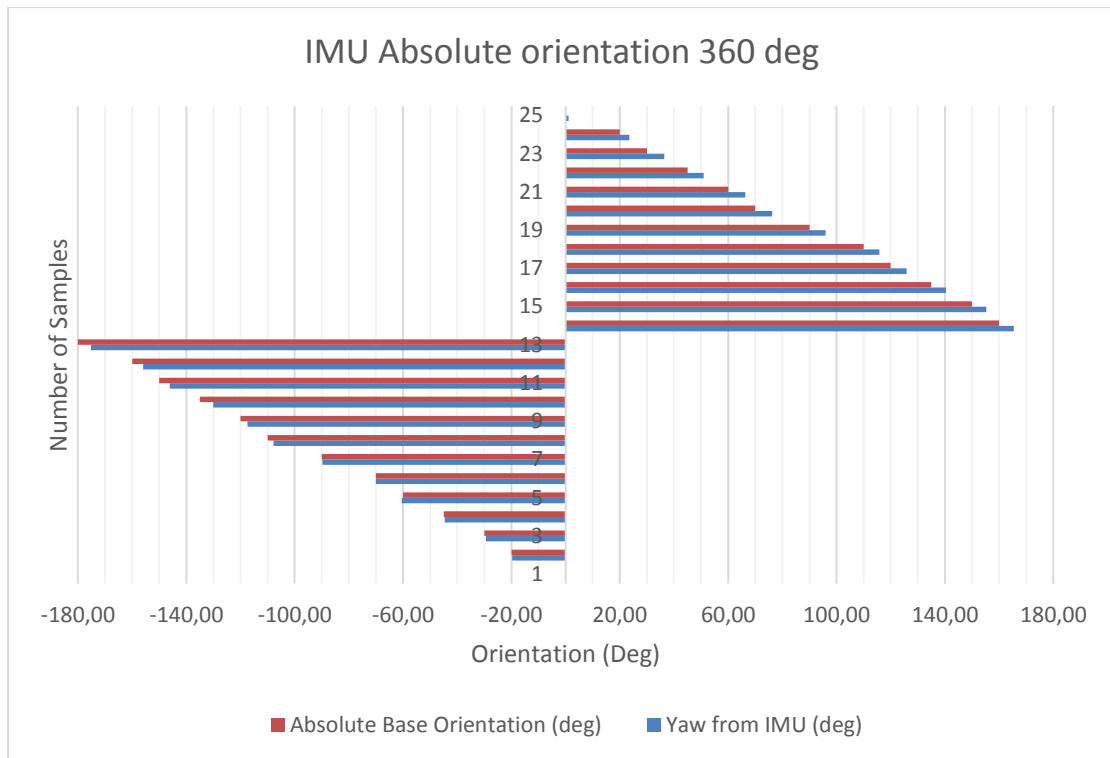
Εικόνα 6-7 και Εικόνα 6-8, από τα οποία μπορεί να εξαχθεί το τελικό αποτέλεσμα του συγκεκριμένου ελέγχου.



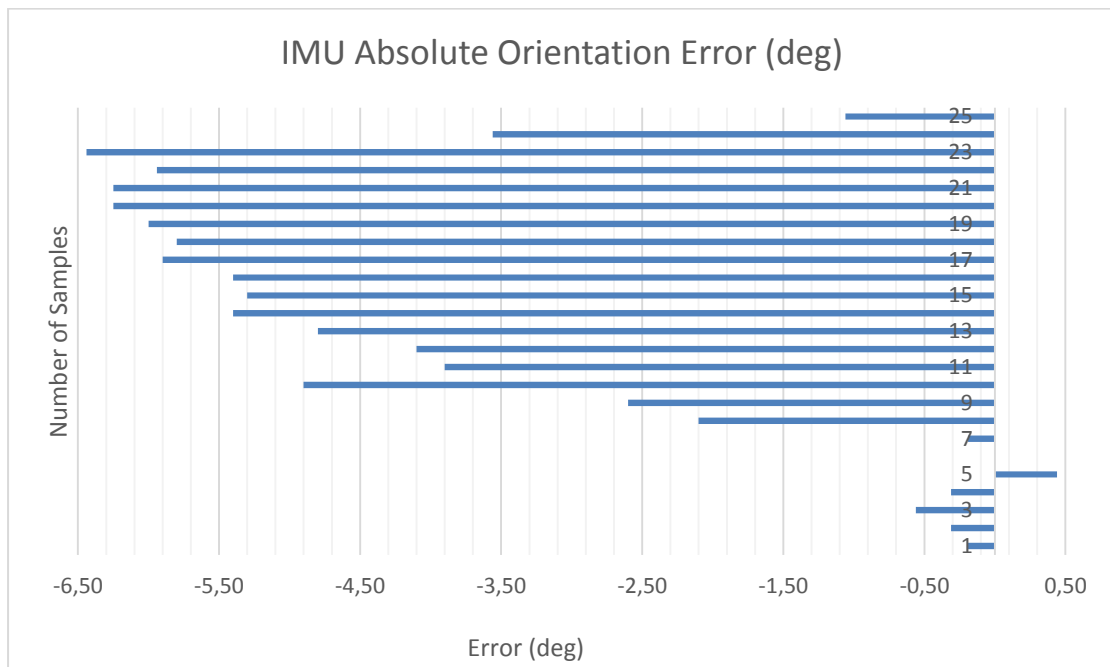
Εικόνα 6-5. Εξαγωγή των τιμών του προσανατολισμού.

Πίνακας 6-2. Οι τιμές προσανατολισμού από την IMU και το σφάλμα από τον απόλυτο προσανατολισμό.

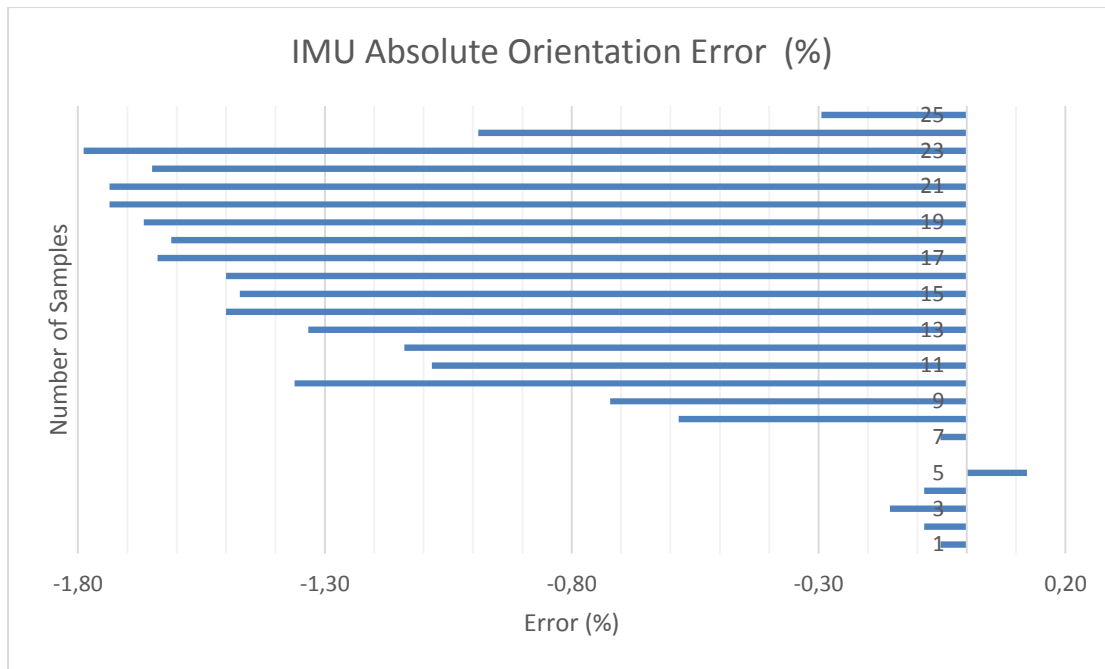
Sample Numbers	Absolute Base Orientation (deg)	Yaw from IMU (deg)	Error (deg) [Abs-Yaw]	Error (%)
1	0,00	0,19	-0,19	-0,05
2	-20,00	-19,69	-0,31	-0,09
3	-30,00	-29,44	-0,56	-0,16
4	-45,00	-44,69	-0,31	-0,09
5	-60,00	-60,44	0,44	0,12
6	-70,00	-70,00	0,00	0,00
7	-90,00	-89,81	-0,19	-0,05
8	-110,00	-107,90	-2,10	-0,58
9	-120,00	-117,40	-2,60	-0,72
10	-135,00	-130,10	-4,90	-1,36
11	-150,00	-146,10	-3,90	-1,08
12	-160,00	-155,90	-4,10	-1,14
13	-180,00	-175,20	-4,80	-1,33
14	160,00	165,30	-5,40	-1,50
15	150,00	155,30	-5,30	-1,47
16	135,00	140,40	-5,40	-1,50
17	120,00	125,90	-5,90	-1,64
18	110,00	115,80	-5,80	-1,61
19	90,00	96,00	-6,00	-1,67
20	70,00	76,25	-6,25	-1,74
21	60,00	66,25	-6,25	-1,74
22	45,00	50,94	-5,94	-1,65
23	30,00	36,44	-6,44	-1,79
24	20,00	23,56	-3,56	-0,99
25	0,00	1,06	-1,06	-0,29



Εικόνα 6-6. Ο προσανατολισμός της βάσης και οι ενδείξεις της IMU σε όλο το εύρος (360°).



Εικόνα 6-7. Το σφάλμα που προέκυψε σε μοίρες.



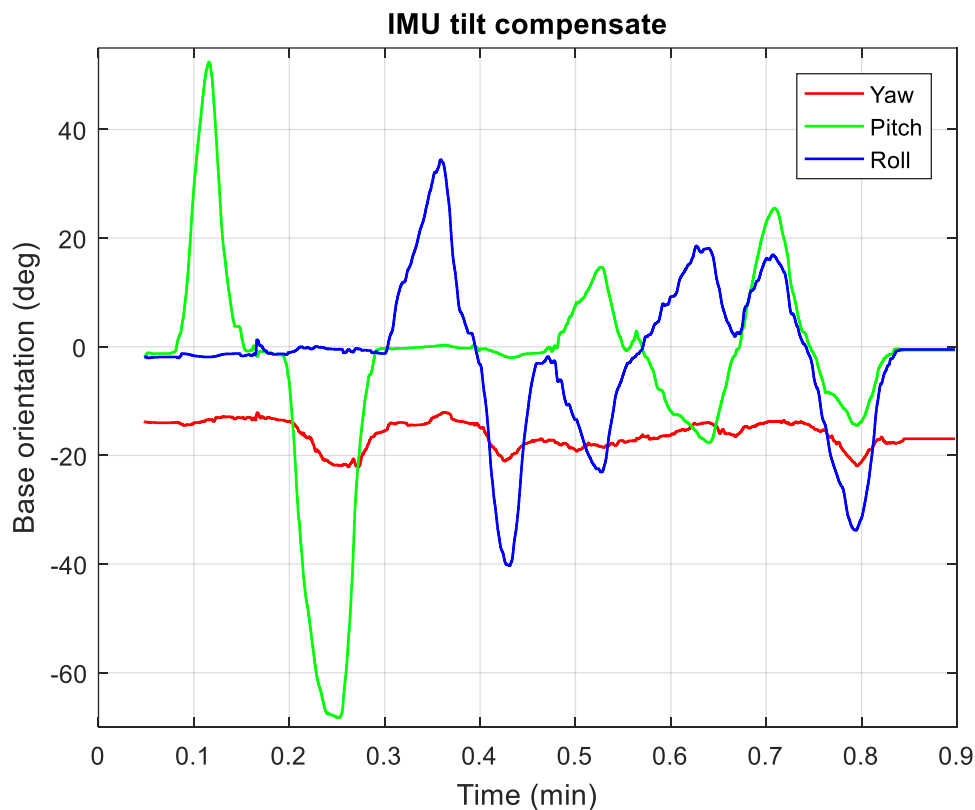
Εικόνα 6-8. Το ποσοστό του σφάλματος.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι υπάρχει σφάλμα στον προσανατολισμό της πυξίδας, του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από τον προσανατολισμό της βάσης. Στους 12 από το σύνολο των 25 διαφορετικών προσανατολισμών που δοκιμάστηκαν το σφάλμα ξεπερνάει τις -4° ενώ το μέγιστο σφάλμα που καταγράφηκε ήταν $-6,44^\circ$ και αντιστοιχεί στο $-1,79\%$ των 360° που μετράει η πυξίδα. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη και το ενδεχόμενο σφάλμα που ίσως να εμπεριέχεται στις παραπάνω μετρήσεις είτε από το χειριστή (σφάλμα ευθυγράμμισης – τοποθέτησης) είτε από το σχεδιασμό των απόλυτων συντεταγμένων (Εικόνα 6-1).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ζωγραφιές στο πάτωμα είχαν γίνει σε σχέση με τον πραγματικό Βορρά καθώς επίσης και ότι στο συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν συμπεριλαμβανόταν η διόρθωση της μαγνητικής απόκλισης ($+4,2^\circ$). Έτσι έγινε και η διαπίστωση ότι η IMU βρίσκει τον μαγνητικό Βορρά και όχι τον πραγματικό όπως διαφημίζεται από κάποιες εταιρίες. Αφού συμπεριληφθεί στο πρόγραμμα η μαγνητική απόκλιση το τελικό σφάλμα της IMU για τη εύρεση του πραγματικού Βορρά εκτιμάται ότι δεν θα ξεπερνάει τις $\pm 2,5^\circ$ ενώ το εύρος δέσμης της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε (Εικόνα 3-31) κυμαίνεται από $\pm 12,5^\circ$ έως $\pm 15^\circ$.

6.1.3 Αντιστάθμιση κλίσης πυξίδας (Compass Tilt Compensate)

Ο επόμενος έλεγχος αφορά την αντιστάθμιση κλίσης της πυξίδας του οποίου τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-9. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο έλεγχος αυτός έγινε χωρίς την ύπαρξη κάποιας βάσης ή μηχανισμού που να δίνει συγκεκριμένη κλίση στην κατασκευή χωρίς να αλλάζει ο προσανατολισμός της. Έγινε δίνοντας κλίση στο μηχανισμό χειροκίνητα προσπαθώντας, την όσο το δυνατόν καλύτερη διατήρηση του προσανατολισμού. Στην αρχή δόθηκε κλίση σε κάθε άξονα X και Y ξεχωριστά ενώ στη συνέχεια δόθηκε και στους δύο ταυτόχρονα.



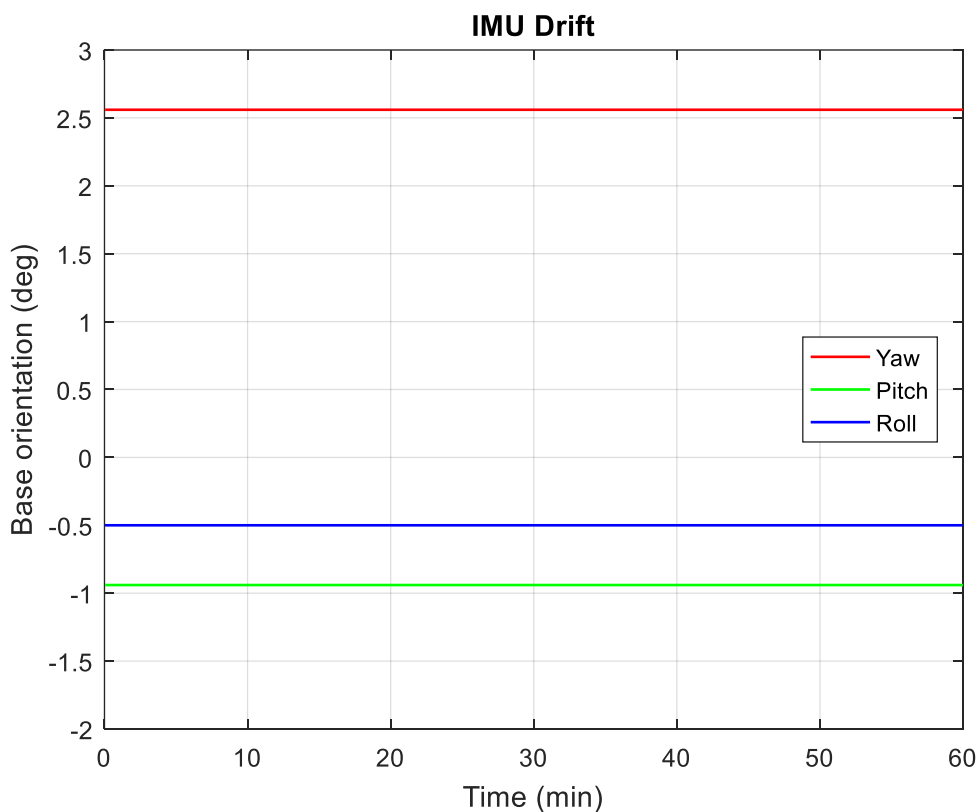
Εικόνα 6-9. Έλεγχος αντιστάθμισης κλίσης της πυξίδας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το yaw μεταβάλλεται έως και 6° – 7° κάποιες στιγμές, αλλά λόγω του χειροκίνητου τρόπου διεξαγωγής του πειράματος δεν μπορεί να ληφθεί σοβαρά υπόψη μία τόσο μικρή μεταβολή. Με αυτά τα δεδομένα κρίνεται ικανοποιητική η αντιστάθμιση κλίσης της πυξίδας.

6.1.4 Παρεκτροπή πυξίδας (Compass drift)

Οι περισσότερες αδρανειακές μονάδες (IMU) παρουσιάζουν μία παρεκτροπή της πυξίδας κάποιες μοίρες (drift) με την πάροδο του χρόνου. Το drift προκύπτει από σφάλματα που συσσωρεύονται κατά την ολοκλήρωση της γωνιακής ταχύτητας.

Ο έλεγχος για το drift της IMU έγινε καταγράφοντας τις ενδείξεις της για μία ώρα έχοντας τελείως ακίνητο το μηχανισμό. Λήφθηκαν περίπου 600.000 μετρήσεις και οι τιμές των γωνιών (yaw, pitch, roll) δεν άλλαξαν καθόλου (2,56, -0,94, -0,5) όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνα 6-10.



Εικόνα 6-10. Έλεγχος για drift.

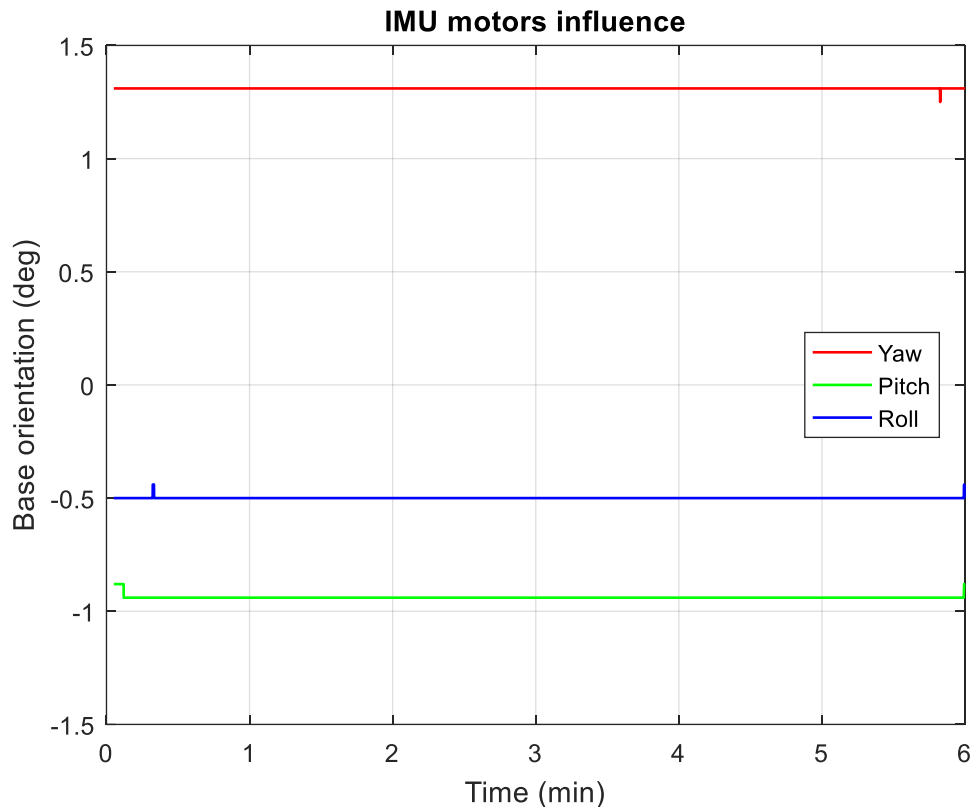
Έγινε και ένας δεύτερος αρκετά μικρότερος σε διάρκεια έλεγχος για την περίπτωση που είχε γίνει κάποιο λάθος κατά την καταγραφή του πρώτου ελέγχου αλλά και ο δεύτερος έδειξε αντίστοιχα αποτελέσματα. Οπότε μπορεί να ειπωθεί ότι η IMU με τους αλγόριθμους

6.1.5 Επιρροή της πυξίδας σε μεταβολή μαγνητικού πεδίου

Τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούν οι IMU είναι όργανα αρκετά ευαίσθητα στην μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Άρα οποιαδήποτε μεταβολή του μαγνητικού πεδίου θα επηρεάσει τις ενδείξεις των μαγνητόμετρων ακριβώς όπως θα έκανε και σε μία συμβατική πυξίδα. Κάτι λοιπόν που θα μπορούσε να επηρεάσει την ένδειξη της IMU είναι το κινούμενο μέρος της ίδιας της κατασκευής (λόγω των ηλεκτρομαγνητών που φέρουν οι κινητήρες) ή η προσέγγιση ξένου μαγνητικού υλικού στην IMU.

Για να διαπιστωθεί λοιπόν αν επηρεάζεται και σε ποιο βαθμό η ένδειξη της πυξίδας από εξωτερικά μαγνητικά πεδία έγιναν τρία διαφορετικά πειράματα χωρίς να κουνηθεί η βάση του συστήματος στόχευσης. Στο πρώτο πείραμα δοκιμάστηκε αν η κίνηση του μηχανισμού, κρατώντας την βάση σταθερή, επηρεάζει την ένδειξη της πυξίδας (λόγω της αλλαγής στη θέση των κινητήρων). Στο δεύτερο πείραμα δοκιμάστηκε κατά πόσο επηρεάζεται η έξοδος της IMU όταν λίγο μετά την έναρξη λειτουργίας της τυχαία την προσεγγίσουν μαγνητικά υλικά ενώ στο τρίτο δοκιμάστηκε κατά πόσο επηρεάζεται αν ενεργοποιηθεί ενώ έχει ήδη αλλάξει το μαγνητικό πεδίο.

Για τον έλεγχο της επιρροής της IMU από τους κινητήρες κατά τη λειτουργία του μηχανισμού, γράφτηκε ένα πρόγραμμα στον δευτερεύων ελεγκτή που ανά 10 sec κινούσε τον κινητήρα της πρώτης άρθρωσης 10°, της δεύτερης 30° και της τρίτης 45°, για μία περιστροφή της πρώτης άρθρωσης 360° (δηλαδή συνολικά 36 κινήσεις). Αυτό γίνονταν ανεξάρτητα από τον πρωτεύων ελεγκτή ο οποίος με σειριακή επικοινωνία έστελνε τις μετρήσεις της IMU μαζί με το χρόνο στον υπολογιστή. Η βάση του μηχανισμού που φέρει πάνω της την IMU καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος παρέμεινε ακίνητη και τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-11.

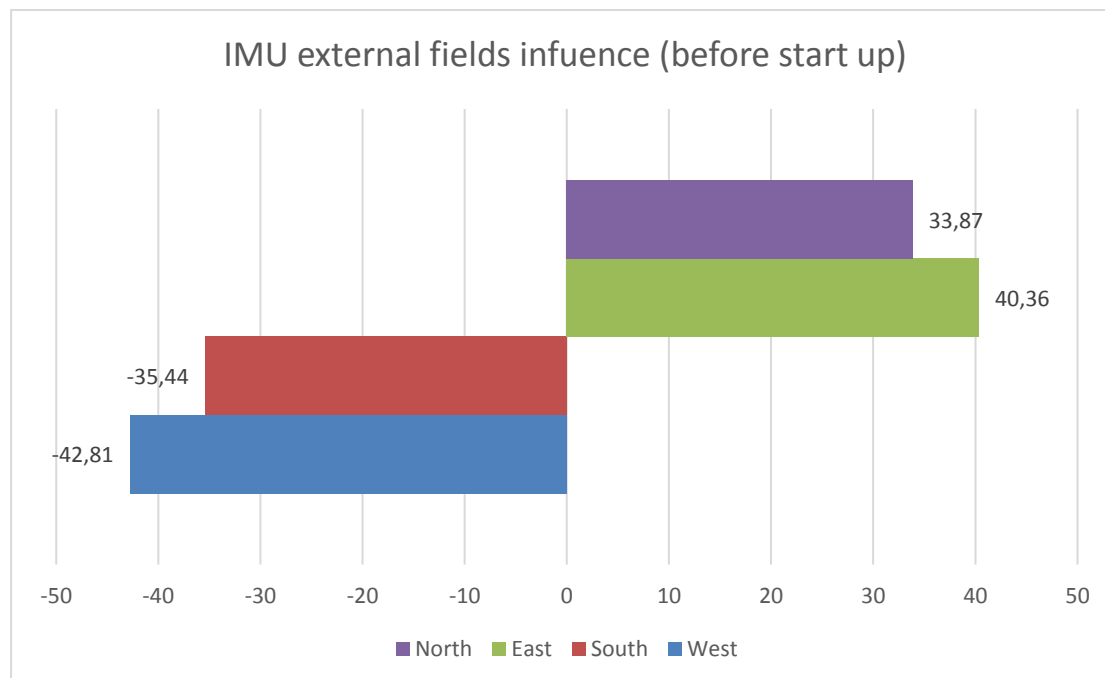


Εικόνα 6-11. Έλεγχος επιρροής της πυξίδας από τους κινητήρες.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η IMU δεν επηρεάζεται από την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου λόγω της κίνηση των κινητήρων γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Z του μηχανισμού. Επίσης παρατηρήθηκε ότι δεν επηρεάζεται ούτε από τους κραδασμούς που δημιουργούνται από την απότομη κίνηση των κινητήρων ανά 10sec.

Ο έλεγχος για τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία έγινε με ακίνητο το μηχανισμό και πλησιάζοντας μία πένσα αρχικά από την δυτική μεριά της IMU και κινώντας την δεξιόστροφα 90° περίπου ανά 5sec για μία πλήρη περιστροφή. Στην συνέχεια έγινε ακριβώς η ίδια κίνηση και με ένα smartphone σε απόσταση σχεδόν 2 cm από την IMU. Το αποτέλεσμα αυτού του πειράματος είναι ότι η IMU δεν επηρεάζεται από εξωτερικά μαγνητικά πεδία όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα.

Μετά την τοποθέτηση της πένσας ακολουθούσε η τροφοδότηση της IMU με ρεύμα και η εκτύπωση της τιμής της γωνίας γ_{aw} στην οθόνη του υπολογιστή. Έτσι προέκυψε το διάγραμμα της Εικόνα 6-14 όπου φαίνονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 6-14. Η επιρροή της πυξίδας τοποθετώντας την πένσα στα 4 σημεία του ορίζοντα.

Αφού η βάση του μηχανισμού ήταν προσανατολισμένη στο Βορρά άρα και η τιμή της γωνίας γ_{aw} αναμένονταν να ήταν κοντά στις 0° . Αντίθετα όμως όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της Εικόνα 6-14 η παρουσία της πένσας επέφερε μεταβολή του μαγνητικού πεδίου με αποτέλεσμα την παρεκτροπή της πυξίδας αρκετές μοίρες από το Βορρά.

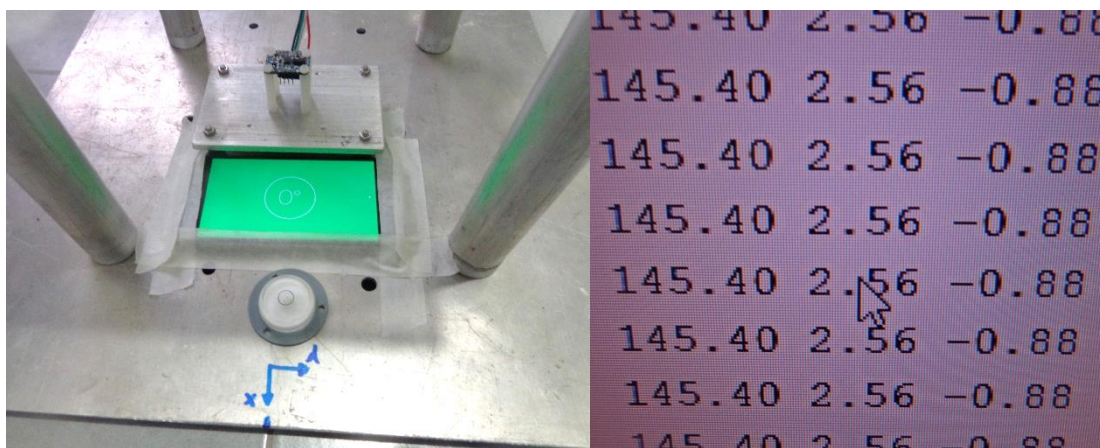
Αυτή η απόκλιση οφείλεται στο ότι κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης δεν υπήρχε εκεί η πένσα, άρα και το μαγνητικό πεδίο ήταν διαφορετικό. Οι συντελεστές βαθμονόμησης παραμένουν σταθεροί στην EEPROM του μικροελεγκτή και φορτώνονται στην εκκίνηση του προγράμματος. Έτσι τα παραπάνω αποτελέσματα κρίνονται φυσιολογικά αφού η IMU δεν 'γνώριζε' για την ύπαρξη της πένσας.

Από όλα τα παραπάνω η συγκεκριμένη IMU θεωρείται κατάλληλη για την συγκεκριμένη εφαρμογή εφόσον βέβαια πραγματοποιηθεί η απαραίτητη βαθμονόμηση της IMU πάνω στον πλωτήρα και στο γεωγραφικό σημείο από όπου θα κληθεί να 'θυμάται' τον πραγματικό Βορρά.

6.1.6 Έλεγχος ακρίβειας στις κλίσεις (roll, pitch)

Σκοπός του συγκεκριμένου ελέγχου είναι η διαπίστωση της ακρίβειας της αδρανειακής μονάδας (IMU) στις μετρήσεις που αφορούν την κλίση του σταθμού κατά τον άξονα X (Roll) και κατά τον άξονα Y (Pitch).

Για την πραγματοποίηση αυτού του ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ένα Smartphone με ακρίβεια $\pm 1^\circ$, ως κλισιόμετρο αναφοράς. Το Smartphone στερεώθηκε στην βάση του συστήματος σταθερής στόχευσης ευθυγραμμισμένο με την αδρανειακή μονάδα (IMU). Στη συνέχεια με την βοήθεια αλφαδιού έγινε το αλφάδιασμα της βάση του συστήματος (Εικόνα 6-15, αριστερά). Οι τιμές των γωνιών roll και pitch εκτυπώνονταν μέσω της σειριακής θύρας στην οθόνη του υπολογιστή (Εικόνα 6-15, δεξιά). Έπειτα δίδονταν χειροκίνητα σταθερές κλίσεις στο μηχανισμό και καταγράφονταν οι μετρήσεις από το Smartphone και από την οθόνη του υπολογιστή στο Πίνακα 6-3.



Εικόνα 6-15. Αριστερά: Τα όργανα για το αλφάδιασμα της βάσης. Δεξιά: Οι γωνίες yaw, pitch και roll από την IMU.

Πίνακας 6-3. Σύγκριση των τιμών roll και pitch μεταξύ του Smartphone και της IMU.

Roll (deg)			Pitch (deg)		
Smartphone	IMU	Error	Smartphone	IMU	Error
0	0.88	0.88	0	2.56	2.56
-5	-5.5	0.5	-5	-2.56	-2.56
-10	-10.5	0.5	-10	-8.25	-1.75
-15	-15.31	0.31	-15	-13.06	-1.94
-20	-20.31	0.31	-20	-18.44	-1.56
-25	-24.56	-0.44	-25	-22.30	-2.7
-30	-29.37	-0.63	-30	-26.37	-3.63
-35	-34.25	-0.75	-35	-32.63	-3.37
-40	-38.31	-1.69	-40	-36.63	-3.37
-45	-43.45	-1.55	-45	-42.13	-2.87
5	4.06	-0.96	5	7.25	2.25
10	9.31	-0.69	10	11.75	1.75

15	14	-1	15	16	1
20	18.69	-1.31	20	20.62	0.62
25	24.06	-0.94	25	25.19	0.19
30	29.19	-0.81	30	30.25	0.25
35	34.25	-0.75	35	35.75	0.75
40	39.56	-0.04	40	40	0
45	45.38	0.38	45	44.94	-0.06

Από τις τιμές του σφάλματος που φαίνεται στον πίνακα προκύπτει ότι η ακρίβεια κατά τον άξονα Χ (γωνία roll) είναι $\pm 1,5^\circ$ περίπου ενώ κατά τον άξονα Υ (γωνία pitch) είναι περίπου $\pm 2,5^\circ$. Δεδομένου των συνθηκών (χειροκίνητη κλίση) αλλά και των οργάνων (ακρίβειας $\pm 1^\circ$) που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό τον έλεγχο, η ακρίβεια της IMU στις κλίσεις θεωρείται ικανοποιητική για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

6.1.7 Απόδοση φίλτρου

Θεωρείτε σύνηθες, σε IMU ο θόρυβος στα δεδομένα πράγμα που προκύπτει κατά κύριο λόγο από τα επιταχυνσιόμετρα. Έτσι, για την εξομάλυνση του θορύβου, χρησιμοποιούνται διάφορα φίλτρα (Complementary, Kalman, moving average, etc) ανά περίπτωση, με διαφορετικά αποτελέσματα. Η χρησιμοποίηση τέτοιων φίλτρων εξομαλύνει το θόρυβο αλλά ταυτόχρονα μειώνει και την ταχύτητα απόκρισης. Για αυτό η σωστή επιλογή του φίλτρου δεν είναι εύκολη υπόθεση.

Από τον προηγούμενο έλεγχο για την παρεκτροπή της πυξίδας και συγκεκριμένα στο διάγραμμα της Εικόνα 6-10 φαίνεται ξεκάθαρα ότι η IMU χρησιμοποιεί ένα πολύ αποτελεσματικό φίλτρο για την εξομάλυνση του θορύβου.

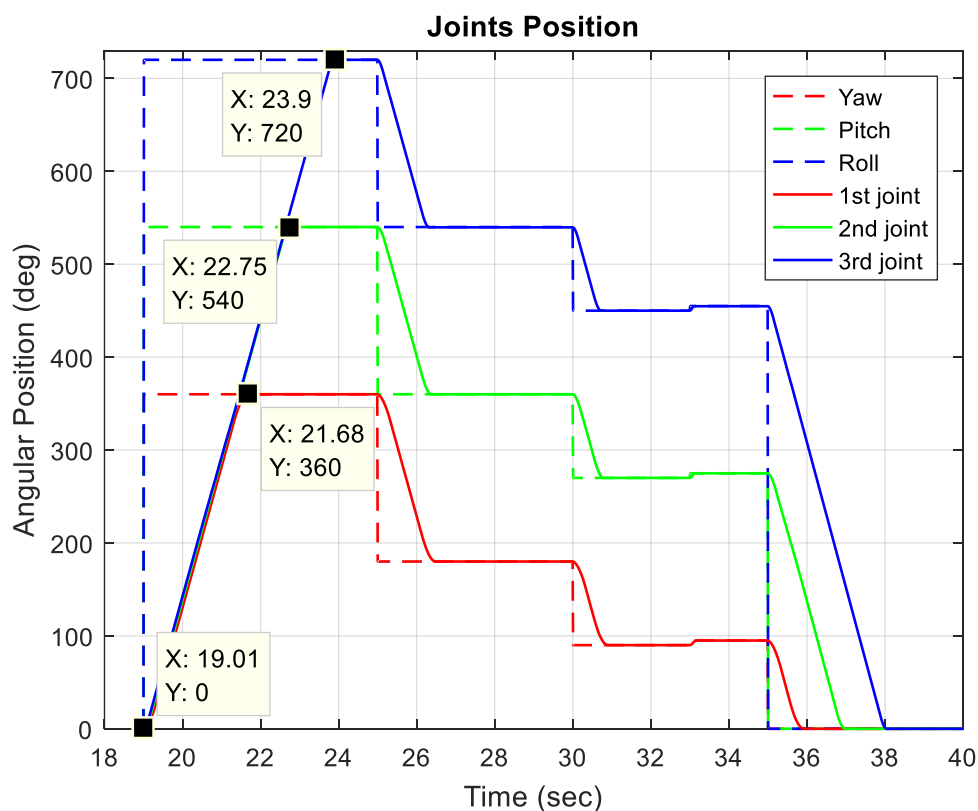
Η ταχύτητα απόκρισης του φίλτρου δεν μπόρεσε να δοκιμαστεί με ακρίβεια, ούτε να καταγραφεί, καθώς δεν υπήρχαν τα υλικοτεχνικά μέσα. Δοκιμάστηκε όμως χειροκίνητα βάζοντας τον μηχανισμό να στοχεύσει κουνώντας την βάση του. Η ταχύτητα απόκρισης του φίλτρου κρίθηκε ικανοποιητική για την εφαρμογή με βάση την οπτική παρατήρηση του χρήστη.

6.2 Έλεγχος της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος

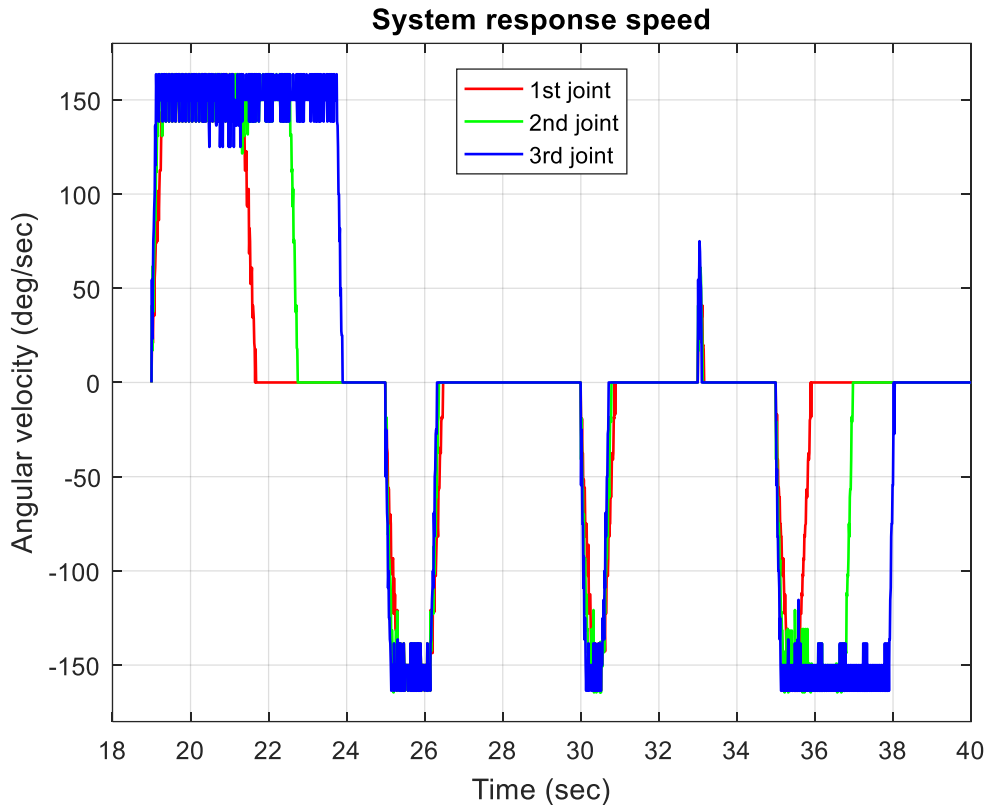
Για τον έλεγχο της ταχύτητας απόκρισης των αρθρώσεων γράφτηκε ένα καινούργιο πρόγραμμα στον Master ελεγκτή. Το πρόγραμμα αυτό στέλνει (όπως και το κανονικό πρόγραμμα) περίπου ανά 10 msec στον Slave ελεγκτή τις 3 τιμές που αφορούν τις επιθυμητές γωνίες των αρθρώσεων. Για να είναι εύκολα διακριτά τα αποτελέσματα δόθηκαν διαφορετικές τιμές γωνιών σε κάθε άρθρωση οι οποίες μεταβάλλονταν ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Οι αρχικές τιμές των γωνιών που δόθηκαν ήταν 360° , 540° , 720° για την 1^η, 2^η και 3^η άρθρωση αντίστοιχα. Μετά από 7 sec δόθηκε βηματική απόκριση -180° σε όλες τις αρθρώσεις. Ακολούθησαν -90° και 5° μετά από 5 και 3 sec, αντίστοιχα. Στο τέλος δόθηκαν μηδενικές τιμές στις αρθρώσεις ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί οπτικά αν υπήρξε απώλεια βημάτων κατά την εκτέλεση του πειράματος.

Στο διάγραμμα της Εικόνα 6-16 διακρίνονται οι γωνίες που στέλνει ο master ελεγκτής (yaw, pitch, roll) και η θέση της κάθε άρθρωσης από τον slave ελεγκτή ενώ στο διάγραμμα της Εικόνα 6-17 φαίνεται η ταχύτητα της κάθε άρθρωσης.



Εικόνα 6-16. Η γωνίες από τον master ελεγκτή και οι θέσεις των αρθρώσεων από τον slave ελεγκτή.



Εικόνα 6-17. Η γωνιακή ταχύτητα των αρθρώσεων.

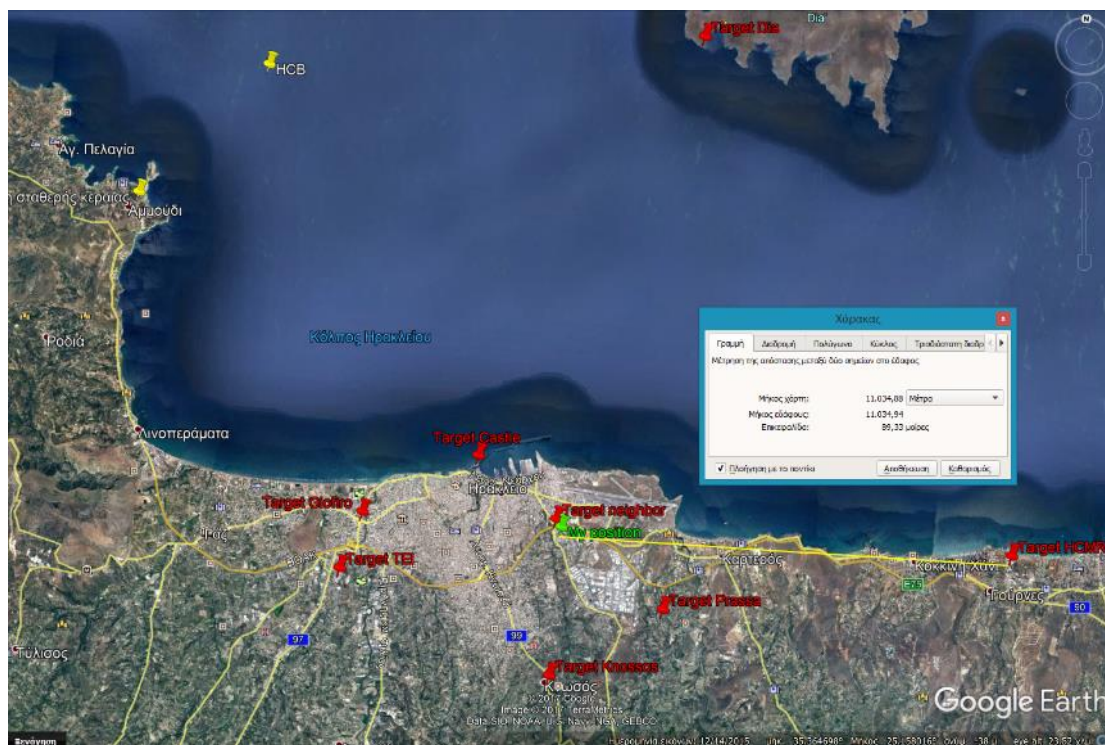
Τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψαν με την ρύθμιση μικροβημάτων σε όλους τους βηματικούς κινητήρες στο μισό βήμα. Με βάση και την σχέση μετάδοσης η 1^η και 2^η άρθρωση κινούνταν με $0,225 \text{ deg/step}$ ενώ η 3^η άρθρωση κινούνταν με $0,3 \text{ deg/step}$. Η αλλαγή της ρύθμισης μικροβημάτων από μισό βήμα σε ολόκληρο θα είχε ως αποτέλεσμα αφενός την αύξηση των κραδασμών και αφετέρου το διπλασιασμό της ταχύτητας περιστροφής. Αυξάνοντας την ταχύτητα περιστροφής αυξάνονται σημαντικά οι πιθανότητες απώλειας βημάτων και ιδιαίτερα κατά τις εναλλαγές κατεύθυνσης.

Εκτός από την ρύθμιση των μικροβημάτων, είχαν δηλωθεί στην βιβλιοθήκη AccelStepper οι ρυθμίσεις για την επιτάχυνση και τη μέγιστη ταχύτητα για κάθε κινητήρα. Για τους δύο πρώτους κινητήρες η μέγιστη ταχύτητα ήταν ορισμένη στα 800 steps/sec ενώ στον τρίτο κινητήρα ήταν 600 steps/sec . Η επιτάχυνση για τον πρώτο κινητήρα ήταν ορισμένη στα 2500 steps/sec^2 ενώ για τους άλλους δύο στα 4000 steps/sec^2 .

Η μέση ταχύτητα των αρθρώσεων που προκύπτει από το διάγραμμα της Εικόνα 6-17 για την 1^η άρθρωση είναι περίπου 135 deg/sec , για την 2^η άρθρωση 144 deg/sec και για την 3^η άρθρωση 147 deg/sec .

6.3 Έλεγχος αζιμουθιακής στόχευσης και απόστασης

Για τον έλεγχο της απόστασης - στόχευσης επιλέχθηκαν στο Google Earth 8 σημεία – στόχοι προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από το σταθερό σημείο όπου βρίσκονταν ο μηχανισμός και σε διάφορες αποστάσεις που κυμαίνονταν περίπου από 0,2 έως 12,5 Km. Στην Εικόνα 6-18 με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα σημεία – στόχοι ενώ με πράσινο χρώμα διακρίνεται η σταθερή θέση του μηχανισμού.



Εικόνα 6-18. Η θέση του μηχανισμού και τα σημεία – στόχοι που δοκιμάστηκαν.

Αρχικά αποθηκεύτηκαν οι συντεταγμένες όλων των σημείων στον μικροελεγκτή. Στη συνέχεια μεταβάλλοντας κάθε φορά τις συντεταγμένες του στόχου προέκυψε ο Πίνακας 6-4.

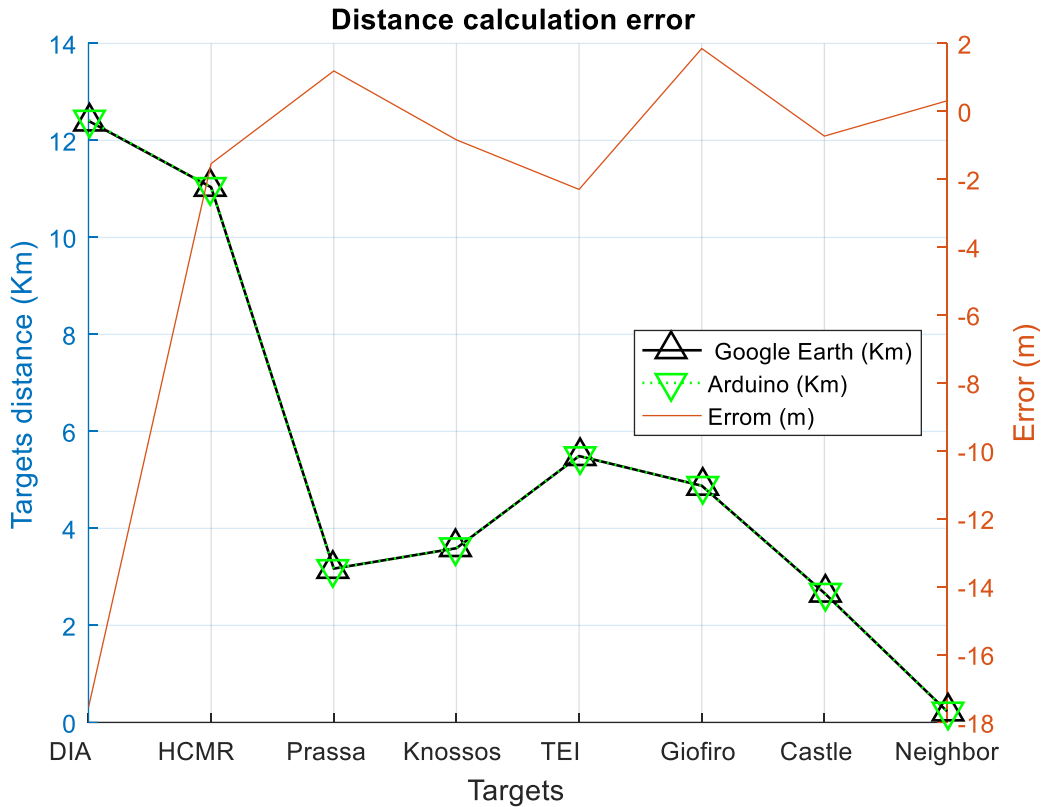
Ο μικροελεγκτής κατά την έναρξη της λειτουργίας του κάνει όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς για την στόχευση και καταγράφει μέσω της σειριακής θύρας τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Πίνακας 6-4. Από τους πίνακες αυτούς προέκυψαν και τα διαγράμματα των Εικόνα 6-19 και Εικόνα 6-20 τα οποία δείχνουν το σφάλμα στον υπολογισμό της απόστασης και το σφάλμα της αζιμουθιακής στόχευσης, αντίστοιχα.

Για την μέτρηση της απόστασης μεταξύ των σημείων και της γωνίας του διανύσματος που σχηματίζεται σε σχέση με τον πραγματικό Βορρά, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 'χάρακας' στο Google Earth όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-18. Το εργαλείο 'χάρακας' δίνει δύο αποστάσεις μεταξύ των δύο ορισμένων σημείων. Η μία είναι η απόσταση πάνω στο χάρτη η οποία και χρησιμοποιήθηκε και η άλλη είναι η απόσταση πάνω στο έδαφος. Ο ορισμός των

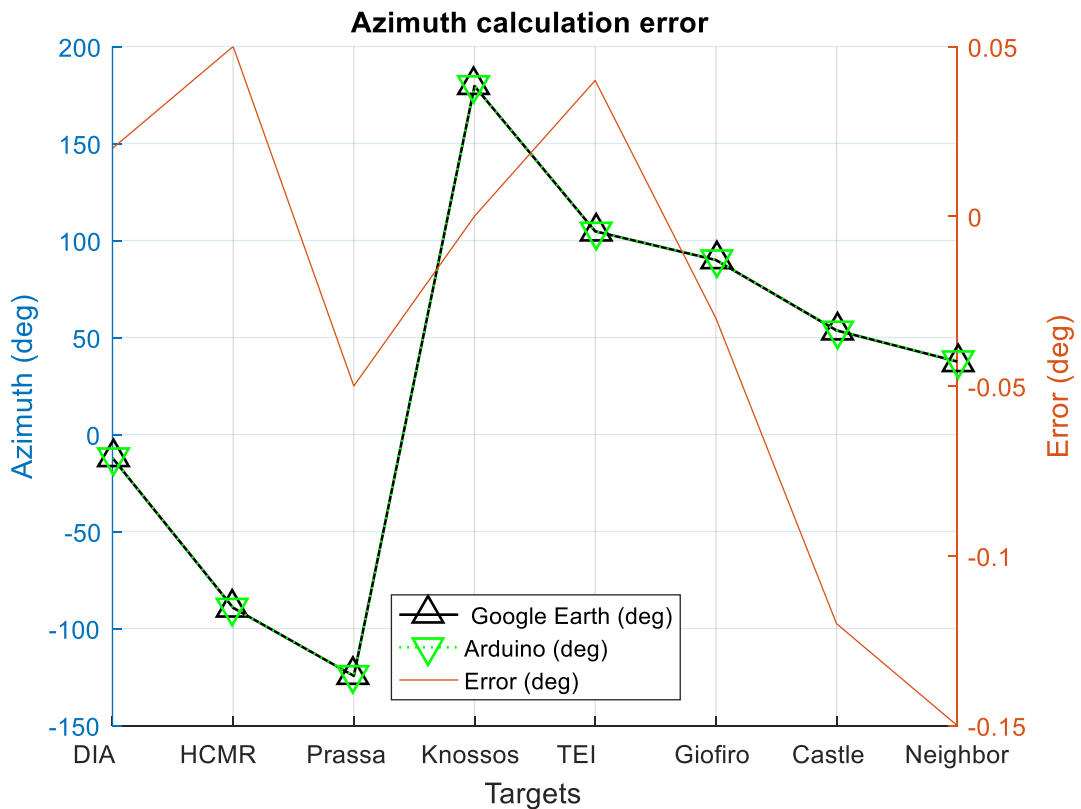
σημείων με το εργαλείο 'χάρακας' έγινε με το ποντίκι του υπολογιστή μετά από αρκετή μεγέθυνση. Μετά από επαναλαμβανόμενες προσπάθειες μέτρησης δύο σημείων με τον παραπάνω τρόπο, διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν διαφορές έως και 2 m.

Πίνακας 6-4. Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν.

Test 1 Target DIA	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	12403.33 m	-12.07 deg
Arduino	12420.89 m	-12.05 deg
Error	-17.56 m	0.02 deg
Test 2 Target HCMR	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	11034.88 m	-89.33 deg
Arduino	11036.42 m	-89.38 deg
Error	-1.54 m	0.05 deg
Test 3 Target Prassa	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	3171.71 m	-124.43 deg
Arduino	3170.52 m	-124.38 deg
Error	1.19 m	-0.05 deg
Test 4 Target Knossos	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	3592.13 m	179.61 deg
Arduino	3592.97 m	179.61 deg
Error	-0.84 m	0.00 deg
Test 5 Target TEI	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	5492.14 m	104.74 deg
Arduino	5494.44 m	104.70 deg
Error	-2.30 m	0.04 deg
Test 6 Target Giofiro	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	4880.43 m	89.96 deg
Arduino	4878.58 m	89.99 deg
Error	1.85 m	0.03 deg
Test 7 Target Castle	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	2667.51 m	53.65 deg
Arduino	2668.24 m	53.77 deg
Error	-0.73 m	0.12 deg
Test 8 Target Neighbor	Start_z = 0 m	Target_z =0 m
	Distance (LOS)	Azimuth
Google earth	230.31 m	37.61 deg
Arduino	230.00 m	37.76 deg
Error	0.31 m	0.15 deg



Εικόνα 6-19. Η πραγματική απόσταση και η υπολογισμένη ανά στόχο. Στον δεύτερο άξονα το σφάλμα σε μέτρα ανά στόχο.



Εικόνα 6-20. Το πραγματικό και το υπολογισμένο αζιμούθιο ανά στόχο. Στο δεύτερο άξονα το σφάλμα σε μοίρες ανά στόχο.

Η μέτρηση της απόστασης θεωρείται αρκετά ακριβής για την συγκεκριμένη εφαρμογή αφού το σφάλμα δεν ξεπερνάει τα 20 μέτρα σε μία απόσταση 12500 μέτρων. Επίσης θεωρείται ακριβής και το σφάλμα στη γωνία (αζιμούθιο) καθώς δεν ξεπερνάει τις $0,15^\circ$ για τις αποστάσεις που θα κληθεί να λειτουργήσει ο μηχανισμός σύμφωνα με τις δοκιμές που απεικονίζονται στους παραπάνω πίνακες.

6.4 Έλεγχος υψομετρικής στόχευσης

Στον προηγούμενο έλεγχο διαπιστώθηκε η ορθή μέτρηση της απόστασης και της αζιμουθιακής στόχευσης στο επίπεδο καθώς το υψόμετρο και της θέσης του μηχανισμού και του στόχου ήταν 0m. Αυτό έγινε για εύκολο έλεγχο με βάση τα εργαλεία που διαθέτει το Google Earth.

Επαναλαμβάνοντας την 8^η δοκιμή (Πίνακας 6-4, με στόχο τη Dia) και αλλάζοντας το υψόμετρο του στόχου διαπιστώθηκε η ακρίβεια της υψομετρικής στόχευσης. Το υψόμετρο του στόχου τέθηκε ίσο με 230 m, όσο και η απόσταση από το στόχο ώστε να προκύψει ένα ισοσκελές τρίγωνο για ευκολότερους υπολογισμούς.

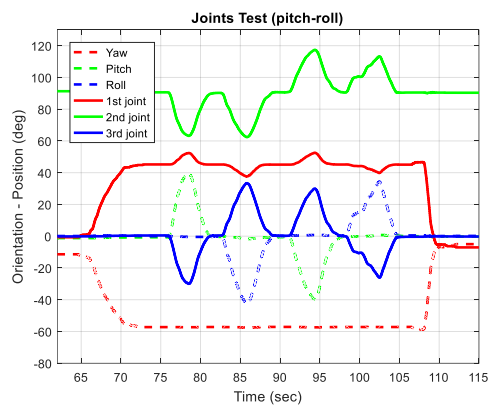
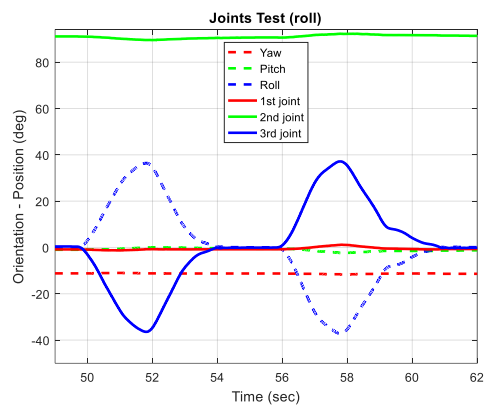
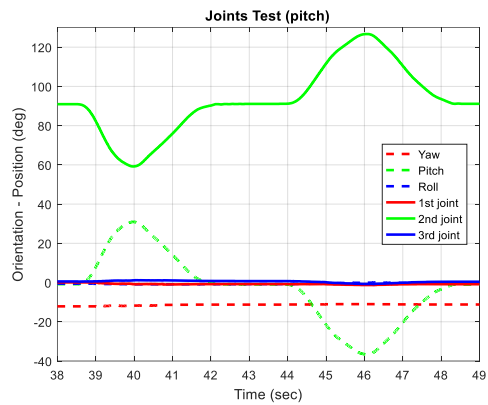
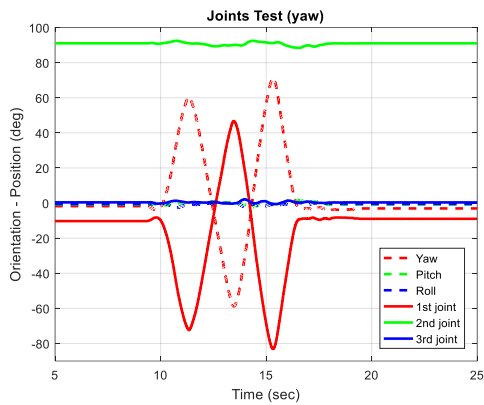
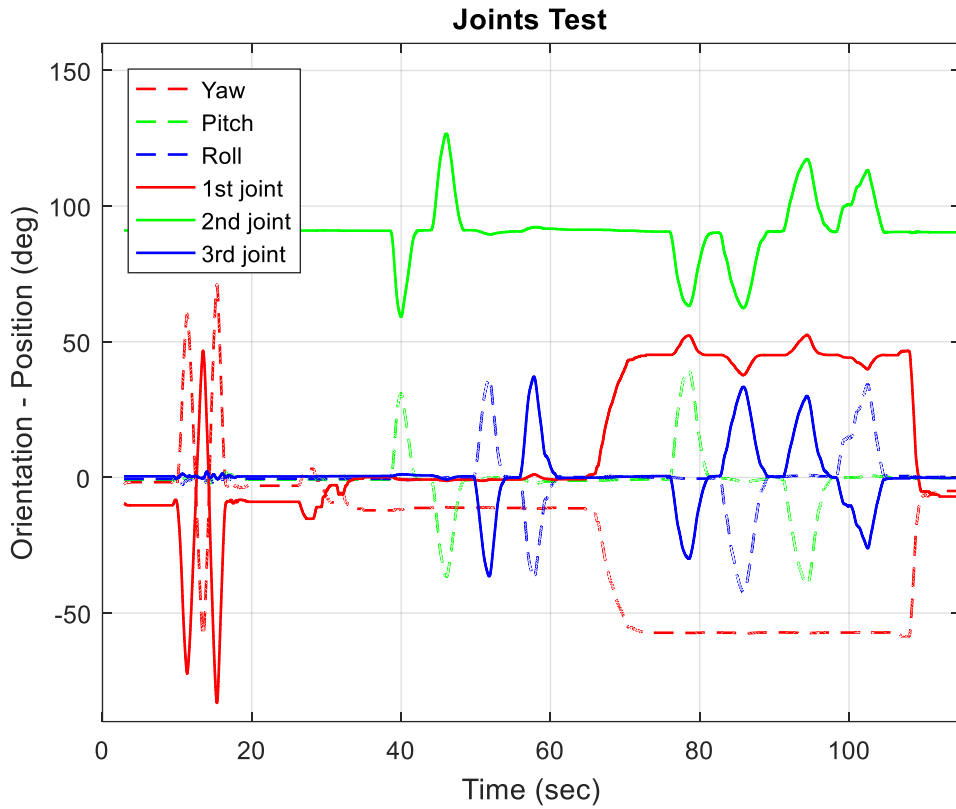
Μετά την φόρτωση του προγράμματος στον μικροελεγκτή η απόσταση σε ευθεία γραμμή βρέθηκε στα 325,27 m και η υψομετρική στόχευση στις 45° όπως και αναμενόταν αφού πρόκειται για ισοσκελές τρίγωνο και σύμφωνα με το πυθαγόρειο θεώρημα.

$$325.27 = \sqrt{230^2 + 230^2}$$

Οπότε θεωρείτε ότι τόσο η αζιμουθιακή (από τον προηγούμενο έλεγχο) όσο και η υψομετρική στόχευση λειτουργούν ικανοποιητικά για τις ανάγκες της εφαρμογής.

6.5 Έλεγχος διατήρησης στόχευσης

Στον έλεγχο αυτό φορτώθηκε στον μικροελεγκτή ένα πρόγραμμα με: σταθερή τη θέση του μηχανισμού, στόχο τη Dia, υψόμετρο εκκίνησης 32 m και υψόμετρο στόχου 5m (που βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματικότητα). Τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου φαίνονται στα διαγράμματα της Εικόνας 6-21 ενώ στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η διαδικασία και αναλύονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 6-21. Αποτελέσματα ελέγχου διατήρησης σκόπευσης.

Ο μηχανισμός κατά την εκκίνηση του προγράμματος ήταν προσανατολισμένος προς το Βορρά. Παρέμεινε αρχικά ακίνητος ώστε να είναι εύκολο να ελεγχθεί η σωστή αρχική στόχευση όλων των αρθρώσεων σύμφωνα και με τα δεδομένα του Πίνακα 6-4. Η πρώτη τιμή της IMU στο yaw ήταν -2.44° και η γωνία για την πρώτη άρθρωση ήταν -9.60° , οπότε και συμφωνεί με τα δεδομένα του Πίνακα 6-4. Οι τιμές της δεύτερης και της τρίτης άρθρωσης αντίστοιχα ήταν 91.02° και 0.42° ενώ οι τιμές από την IMU ήταν -0.81° και -0.56° , δηλαδή διαφορετικές από τον Πίνακα 6-4. Αυτές οι διαφορές με το προηγούμενο πείραμα ήταν αναμενόμενες λόγω αλλαγής της τιμής του υψομέτρου, αλλά δεν μπορεί να ελεγχθεί η ακρίβεια της μέτρησης καθώς προκύπτει από τις τιμές της IMU, από την υψομετρική διαφορά και την απόσταση μεταξύ των σημείων.

Στην συνέχεια έγινε χειροκίνητη περιστροφή του μηχανισμού κατά τον κατακόρυφο άξονα ώστε να διαπιστωθεί η αλλαγή της τιμής της πρώτης άρθρωσης. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-21 (από το 5° έως το 25° sec).

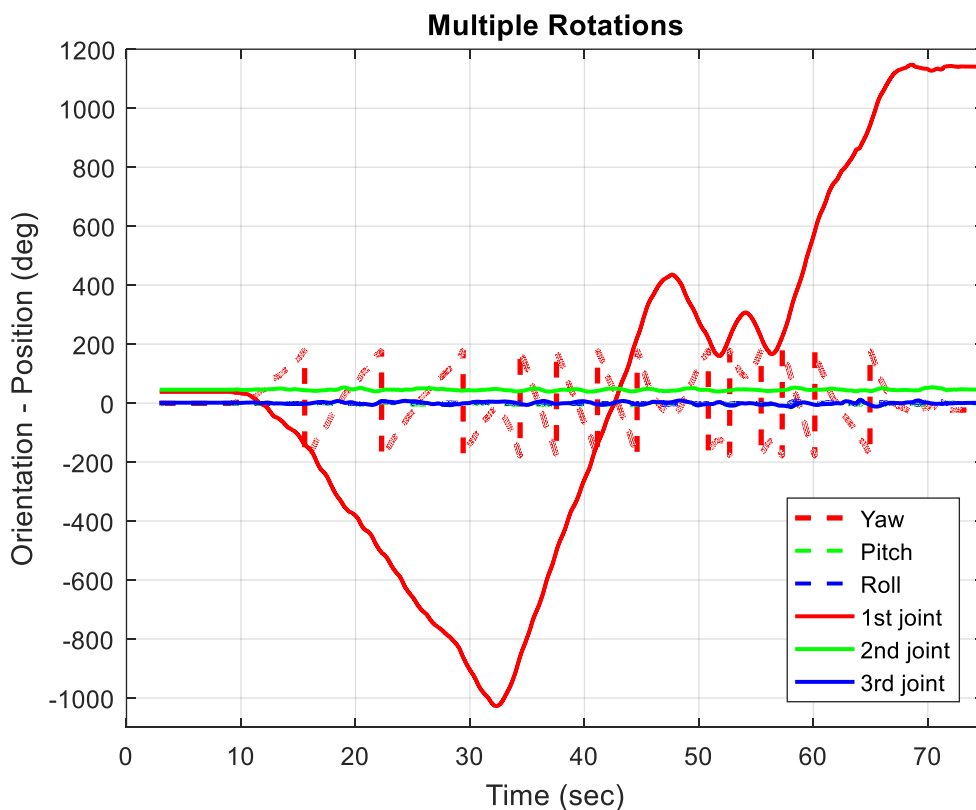
Μετά τον έλεγχο της πρώτης άρθρωσης η βάση του μηχανισμού προσανατολίστηκε προς το στόχο ώστε να μπορούν να ελεγχθούν εύκολα και οι υπόλοιπες αρθρώσεις. Έτσι με την κίνηση του μηχανισμού εμπρός – πίσω, δεξιά – αριστερά μπορεί να ελεγχθεί η δεύτερη και η τρίτη άρθρωση (Εικόνα 6-21 από 38° έως 62° sec) χωρίς να επηρεάζει η μία την κίνηση της άλλης άρθρωσης.

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω ελέγχων η βάση του μηχανισμού τοποθετήθηκε στις 45° από το στόχο με σκοπό μία συνδυασμένη κίνηση (και roll και pitch). Λόγω λοιπόν της τετράγωνης βάσης του μηχανισμού και την υπό γωνία 45° τοποθέτηση της, κινώντας τον μηχανισμό όπως και πριν δημιουργούσε την μεταβολή και των δύο γωνιών ταυτόχρονα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-21 (65° έως το 115° sec) με ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά την αντιστάθμιση κλίση της πυξίδας.

6.6 Έλεγχος αλγόριθμου Νότου - πολλαπλών περιστροφών

Για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του αλγόριθμου πολλαπλών περιστροφών εκτυπώνονταν η έξοδος της IMU και οι γωνίες των αρθρώσεων χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα του παραπάνω ελέγχου (κεφ. 6.5). Οι περιστροφές του μηχανισμού έγιναν χειροκίνητα και το αποτέλεσμα φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-22.

Στο παρακάτω διάγραμμα ο μηχανισμός έχει Νότιο προσανατολισμό όταν η γωνία yaw αλλάζει πρόσημο και φαίνονται οι κάθετες γραμμές. Η σωστή λειτουργία του αλγορίθμου φαίνεται από την χαρακτηριστική της πρώτης άρθρωσης η οποία δεν ακολουθεί την αλλαγή του πρόσημου της γωνίας yaw αλλά προσθέτει ή αφαιρεί 360° ανάλογα με την φορά των περιστροφών είχαν πραγματοποιηθεί. Έτσι η έξοδος του πρωτεύων ελεγκτή μετατρέπεται σε απόλυτη γωνιακή θέση από το σημείο εκκίνησης, όπως ακριβώς οδηγούνται και οι βηματικοί κινητήρες από την βιβλιοθήκη AccelStepper.



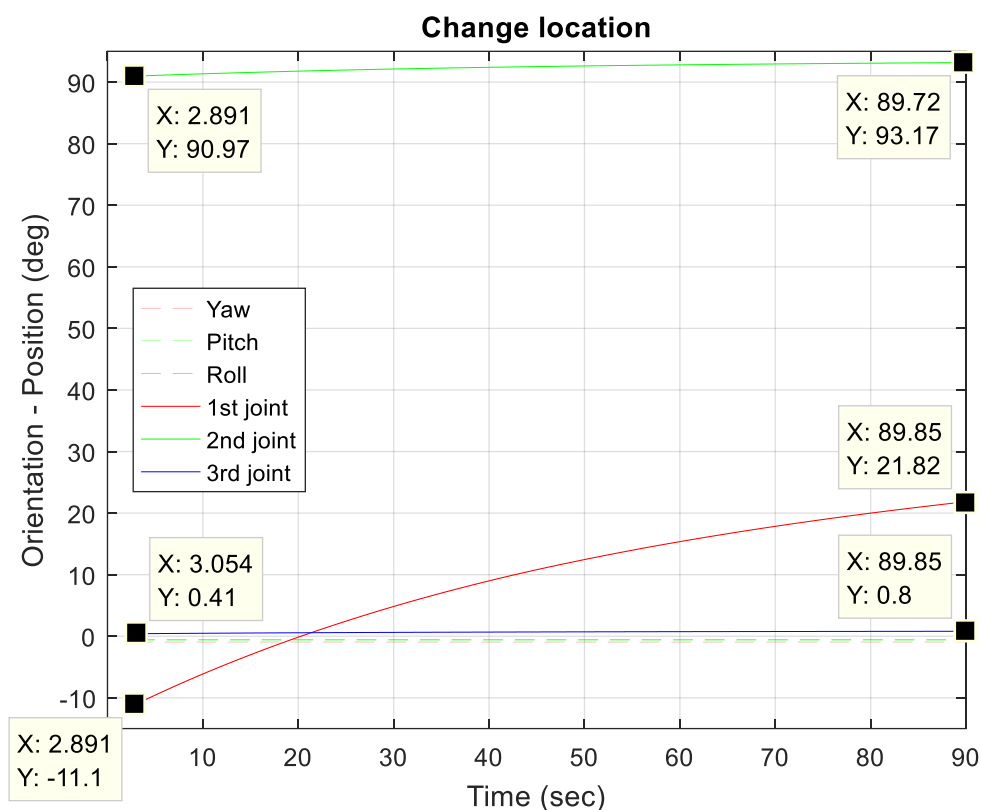
Εικόνα 6-22. Ο έλεγχος αλγόριθμού Νότου – πολλαπλών περιστροφών.

Μπορεί λοιπόν να ειπωθεί ότι ο αλγόριθμος αυτός αναγνωρίζει τον σύντομο δρόμο αφού χωρίς αυτόν ο μηχανισμός θα πραγματοποιούσε κίνηση 358° αντί για 2° όταν περνούσε από το Νότο και υπήρχε η αλλαγή στο πρόσημο (κεφ. 5.1.3). Επίσης ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να είναι κατάλληλος και για άλλες εφαρμογές καθώς 'θυμάται' τις περιστροφές που έχουν γίνει. Πχ σε ένα θαλάσσιο ROV για την μέτρηση των περιστροφών του καλωδίου διασύνδεσης του με το πλοίο στην επιφάνεια, ώστε να αποφευχθεί η πιθανή καταστροφή του λόγω περιστροφής.

6.7 Έλεγχος ανανέωσης της θέσης

Για αυτόν τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκε το προηγούμενο πρόγραμμα (κεφ. 6.5) με στόχο τη Dia προσθέτοντας όμως την ανανέωση της θέσης. Αφού δεν χρησιμοποιείται το grs (ο έλεγχος έγινε σε κλειστό χώρο), η μεταβολή της θέσης προσομοιώθηκε με την αφαίρεση 1m κατά τον X και Y άξονα και την πρόσθεση 0,1m κατά τον άξονα Z σε κάθε επανάληψη του ατέρμονα βρόγχου (περίπου ανά 7,7msec). Η βάση του μηχανισμού καθ' όλη την διάρκεια του ελέγχου παρέμεινε ακίνητη. Οπότε αφού οι τιμές της IMU παρέμεναν σταθερές προσομοιώνεται μόνο η μεταφορά του μηχανισμού χωρίς την αλλαγή του προσανατολισμού του (Εικόνα 6-24). Στο διάγραμμα της Εικόνα 6-24 λοιπόν φαίνεται η μεταβολή των αρθρώσεων που οφείλεται μόνο στην μεταβολή της θέσης χωρίς την αλλαγή προσανατολισμού.

Εικόνα 6-23. Η αρχική και η τελική θέση του μηχανισμού.



Εικόνα 6-24. Η αλλαγή της θέσης των αρθρώσεων κατά την 'θεωρητική' κίνηση του συστήματος στόχευσης.

Η μεταβολή σε X, Y, Z γινόταν ανά 7,7 msec που ήταν και η ταχύτητα εκτέλεσης του βρόγχου ελέγχου. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η 'προσομοιωμένη' ταχύτητα κίνησης του

μηχανισμού ήταν περίπου 130m/sec κατά τον X και κατά τον Y ενώ κατά τον άξονα Z ήταν 13m/sec. Η διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος ήταν 90 sec που μεταφράζεται σε μία απόσταση 11.7 Km κατά τον X και τον Y άξονα ενώ το υψόμετρο είναι 1170m. Άρα σύμφωνα με τους άξονες όπως έχουν οριστεί (X προς το Βορρά και Y προς τη δύση) η θέση του μηχανισμού μετά από 1.5 min θα βρίσκεται Νότιο - Ανατολικά του σημείου εκκίνησης και συγκεκριμένα στις -135° ενώ η απόσταση σύμφωνα με το Πυθαγόρειο θεώρημα είναι 16,588 km. Στην Εικόνα 6-23 φαίνεται η 'θεωρητικά' αρχική και η τελική θέση του μηχανισμού.

Στο διάγραμμα της Εικόνα 6-24 φαίνονται τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής όπου εύκολα διακρίνεται η αλλαγή της γωνίας της πρώτης άρθρωσης καθώς 'θεωρητικά' κινείται ο μηχανισμός. Διακρίνονται επίσης και η μεταβολή της δεύτερης και της τρίτης άρθρωσης.

Εφόσον υπάρχει μεταβολή και των τριών γωνιών του συστήματος θεωρείται επιτυχής ο έλεγχος της στόχευσης καθώς μεταβάλλεται η θέση του πλωτήρα.

6.8 Έλεγχος επίδρασης της μεταβλητής link

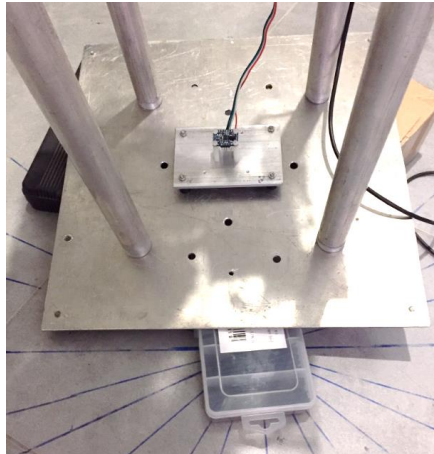
Με τη μεταβλητή link δηλώνεται η κάθετη απόσταση μεταξύ του πλαισίου W που αντιστοιχεί στο σημείο τομής των αξόνων του μηχανισμού και του πλαισίου B που αντιστοιχεί στο πλαίσιο αναφοράς του πλωτού σταθμού.

Για τον έλεγχο της επίδρασης της μεταβλητής link έγιναν δύο διαδοχικές δοκιμές με στόχο την Dia. Ο μηχανισμός είχε τοποθετηθεί υπό κλίση με την βοήθεια πρόχειρων υποστηριγμάτων όπως φαίνεται στη Εικόνα 6-25. Οι δοκιμές έγιναν αλλάζοντας την τιμή της μεταβλητής και ξαναφορτώνοντας το ίδιο πρόγραμμα στον μικροελεγκτή, χωρίς να κινηθεί καθόλου η βάση του μηχανισμού. Για να είναι εμφανή τα αποτελέσματα, τα οποία φαίνονται στον

Πίνακα 6-5, η τιμή της μεταβλητής από 0,86 m (που είναι η πραγματική) έγινε 10000 m.

Πίνακας 6-5. Αποτελέσματα ελέγχου επίδρασης της μεταβλητής link.

Real link=0.86 m	Yaw – 1 st Joint	Pitch – 2 nd Joint	Roll – 3 rd Joint
IMU readings	-2.13	9.19	6.50
Sending angles	-8.98	80.00	-4.90
Fake link=10 km	Yaw – 1 st Joint	Pitch – 2 nd Joint	Roll – 3 rd Joint
IMU readings	-3,19	9,19	6,44
Sending angles	-7,91	122,73	-6,83



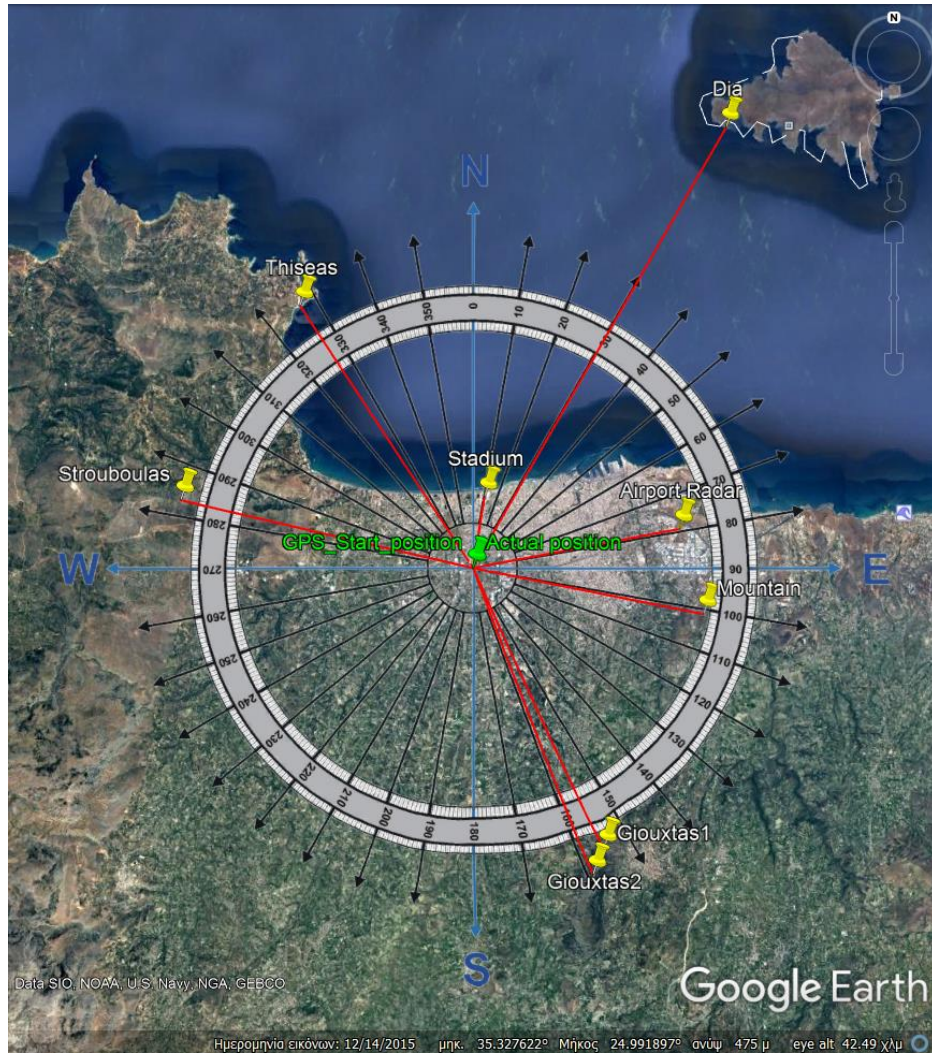
Εικόνα 6-25. Πρόχειρα υποστηρίγματα ώστε να δώσουν κλίση στην IMU.

Αισθητή μεταβολή φαίνεται στη γωνία της 2^{ης} άρθρωσης όπου χωρίς να έχει αλλάξει τίποτα άλλο εκτός από την τιμή της μεταβλητής link έχει μεταβληθεί σχεδόν 40°.

6.9 Δοκιμή σε εξωτερικό περιβάλλον

Για την αξιολόγηση του ρομποτικού συστήματος στόχευσης πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή σε εξωτερικό χώρο με πραγματικά σημεία – στόχους. Ένα βολικό σημείο με πανοραμική θέα στο οποίο και πραγματοποιήθηκε η εξωτερική δοκιμή είναι η οροφή των νέων κτιρίων του ΤΕΙ Κρήτης.

Για την δοκιμή αυτή επιλέχθηκαν οχτώ σημεία – στόχοι σε διάφορα σημεία του ορίζοντα και σε αποστάσεις που κυμαίνονταν από 2,2 έως 15,7 km, τα οποία ήταν ορατά με γυμνό μάτι (Εικόνα 6-26). Αφού καταγράφηκε το αζιμούθιο των σημείων – στόχων με την βοήθεια πυξίδας, βρέθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες τους από το Google Earth και περάστηκαν στο πρόγραμμα του master ελεγκτή. Ο πρώτος στόχος που επιλέχθηκε ήταν το στάδιο με σχεδόν βόρειο προσανατολισμό και ακολούθησαν οι υπόλοιποι στόχοι με δεξιόστροφη φορά.



Εικόνα 6-26. Η αρχική θέση του συστήματος στο ΤΕΙ Κρήτης και τα 8 σημεία – στόχοι της δοκιμής σε εξωτερικό χώρο.

Για την εύκολη διαπίστωση της ορθής στόχευσης του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα 2 κάμερες καταγράφοντας τη δοκιμή (Εικόνα 6-27). Μία κάμερα μικρού μεγέθους (GoPro) στερεώθηκε με δεματικά καλωδίων (cable ties) πάνω στην κεραία ώστε να μπορέσει να φανεί στην καταγραφή η επίτευξη του στόχου και η ικανότητα διατήρησής του. Με την δεύτερη κάμερα γινόταν η καταγραφή του χώρου και του μηχανισμού καθώς από την κάμερα που βρίσκεται πάνω στην κεραία (GoPro) δεν μπορούν να φανούν οι κλίσεις του μηχανισμού κατά την προσπάθεια του να διατηρήσει τη στόχευση. Πριν από την έναρξη της δοκιμής πραγματοποιήθηκε η διαδικασία βαθμονόμησης της IMU όπως ακριβώς περιγράφεται στο κεφ. 5.1.2.



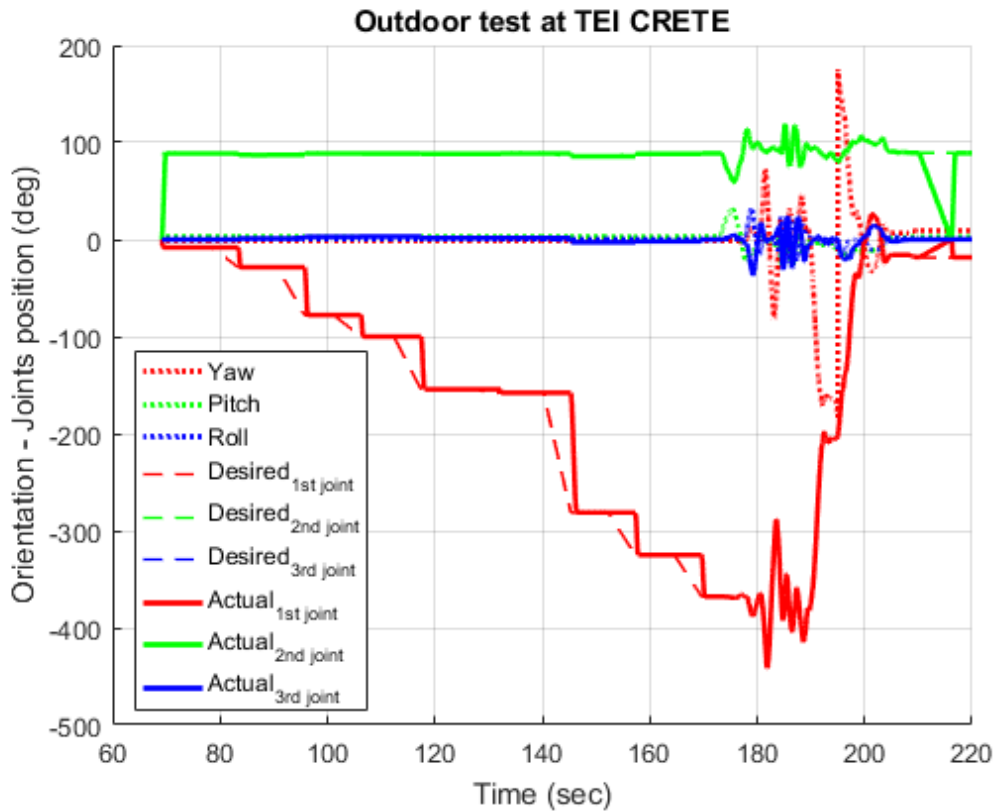
Εικόνα 6-27. Στιγμιότυπο από την εξωτερική δοκιμή του συστήματος στόχευσης στο χώρο του ΤΕΙ κρήτης.

Για την καταγραφή δεδομένων από τους ελεγκτές του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο υπολογιστές, ένας για κάθε ελεγκτή. Τα δεδομένα που καταγράφονταν σειριακά από τον master ελεγκτή ήταν: ο χρόνος από την εκκίνηση του προγράμματος με τη συνάρτηση millis() του Arduino, η γεωγραφική θέση από το GPS (το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και το υψόμετρο), η απόσταση του συστήματος (κατά τους άξονες X, Y και Z) από το σημείο εκκίνησης, ο προσανατολισμός του συστήματος (yaw, pitch και roll) από την αδρανειακή μονάδα (IMU) και τέλος, οι γωνίες που στέλνει ο master ελεγκτής προς τον slave για την ορθή στόχευση. Με την σειριακή αποστολή όλων αυτών των δεδομένων ο χρόνος του ατέρμονα βρόγχου ήταν κατά μέσο όρο 10 msec οπότε και η αποστολή των γωνιών στον slave ελεγκτή γινόταν με 100 Hz. Χωρίς την καταγραφή των

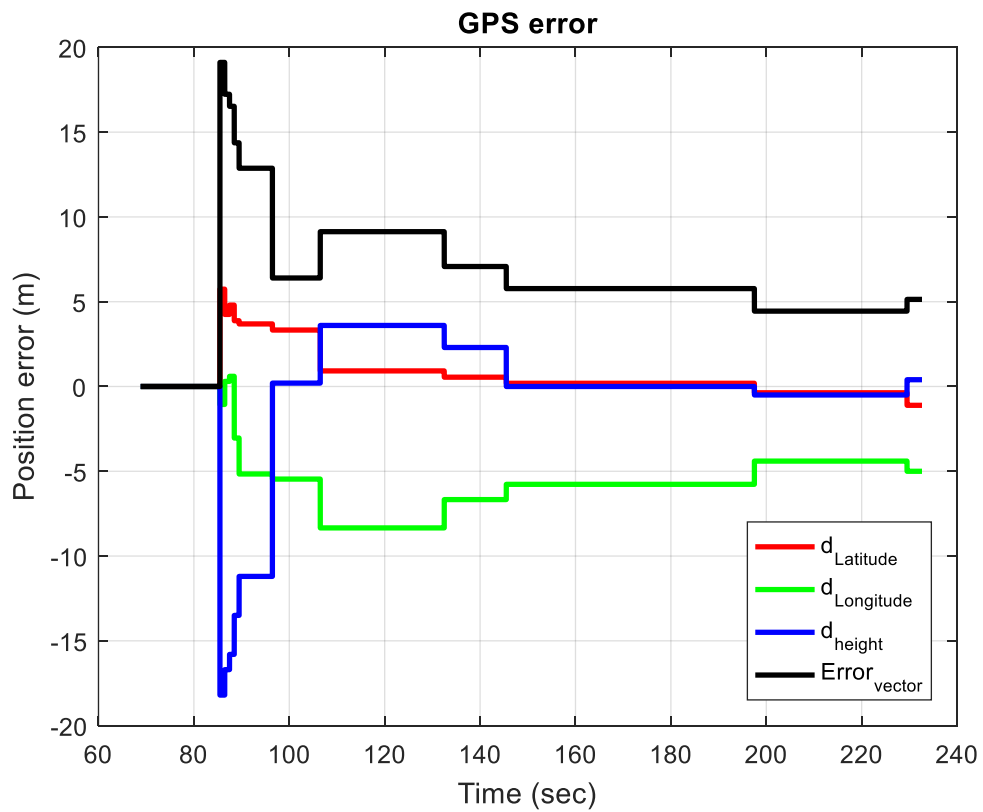
δεδομένων η συχνότητα αποστολής των γωνιών από τον master στο slave ελεγκτή φτάνει στα 217 Hz. Τα δεδομένα που καταγράφονταν σειριακά από τον slave ελεγκτή ήταν: ο χρόνος από την εκκίνηση του προγράμματος με τη συνάρτηση millis() του Arduino και οι γωνιακές θέσεις των τριών αρθρώσεων του συστήματος. Η γωνιακή θέση κάθε άρθρωσης σε μοίρες προκύπτει από την επιστροφή της συνάρτησης currentPosition() της βιβλιοθήκης AccelStepper πολλαπλασιασμένη με τις μοίρες ανά βήμα ($^{\text{deg}}/\text{step}$) του κάθε κινητήρα, ανά 10 msec. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει τον απόλυτο αριθμό βημάτων που 'θεωρεί' (λόγω μη ύπαρξη ανάδρασης) ότι βρίσκεται ο κινητήρας.

Από τα καταγεγραμμένα αρχεία προέκυψε το διάγραμμα της Εικόνα 6-28 στο οποίο φαίνονται οι επιθυμητές και οι πραγματικές γωνίες των αρθρώσεων για την ορθή στόχευση, καθώς και ο προσανατολισμός της βάσης του συστήματος από την αδρανειακή μονάδα (IMU). Επίσης καταγράφονταν η απόσταση του συστήματος από το σημείο εκκίνησης και έτσι προέκυψε το διάγραμμα της Εικόνα 6-29. Με δεδομένο ότι η θέση του συστήματος δεν άλλαξε καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής, στην πραγματικότητα στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται το σφάλμα των μετρήσεων από το GPS. Με την μαύρη γραμμή απεικονίζεται το μέτρο του διανύσματος σφάλματος.

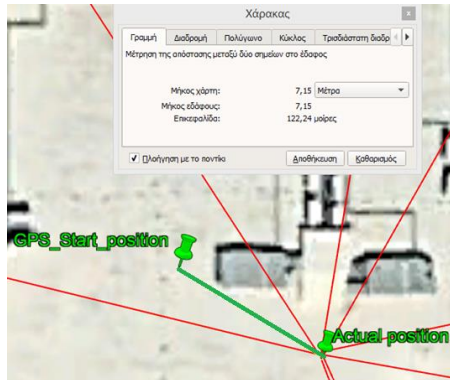
Εντοπίζοντας την πραγματική θέση της δοκιμής στο Google Earth και συγκρίνοντας την με την αρχική θέση από το GPS, προκύπτει μία αρχική διαφορά των 7 μέτρων (Εικόνα 6-30). Το υψόμετρο της αρχικής θέσης του μηχανισμού που φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-29 όπως προκύπτει από τα καταγεγραμμένα αρχεία είναι 93.5 m ενώ από το Google Earth το υψόμετρο στο TEI φαίνεται να είναι 65 m.



Εικόνα 6-28. Οι επιθυμητές και πραγματικές γωνίες των αρθρώσεων καθώς και οι μετρήσεις της IMU.



Εικόνα 6-29. Το σφάλμα του GPS για κάθε άξονα ξεχωριστά και το συνολικό σφάλμα.



Εικόνα 6-30. Το αρχικό σφάλμα θέσης όπως διαπιστώθηκε από το Google Earth.

Το σφάλμα του GPS στο υψόμετρο όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνα 6-29 αρχικά φτάνει κοντά στα 20 m και συνεχώς μειώνεται κατά την διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής. Το σφάλμα αυτό είναι υπολογισμένο από την αρχική θέση που 'ήξερε' ο master ελεγκτής ότι βρισκόταν το σύστημα με την πληροφορία που είχε από 6 δορυφόρους. Στη συνέχεια με τη εύρεση περισσότερων δορυφόρων φαίνεται η βελτίωση της ακρίβειας στη θέση. Παρατηρείται επίσης, ότι μετά από περίπου 2 λεπτά το σφάλμα σταθεροποιείται περίπου στα 5 m. Λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό σφάλμα των 7 m λόγω των 6 δορυφόρων και το γεγονός της μείωσης του σφάλματος με το πέρασμα του χρόνου επαληθεύεται η καλή ακρίβεια της συσκευής GPS ως αναφορά τις γεωγραφικές συντεταγμένες. Δυστυχώς δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο για την ακρίβεια στη μέτρηση του υψόμετρου. Αυτό όμως δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς στην συγκεκριμένη εφαρμογή το υψόμετρο δεν είναι τόσο κρίσιμη παράμετρος αφού η μεταβολή του είναι τόσο μικρή όσο και το ύψος του κυματισμού.

Στην διαδικασία του συγχρονισμού εκκίνησης των δύο ελεγκτών συμμετείχε ο ανθρώπινος παράγοντας και όπως ήταν αναμενόμενο υπάρχει μία μικρή διαφορά στο χρόνο εκκίνησης μεταξύ των δύο ελεγκτών. Το σφάλμα αυτό όπως αποδείχτηκε από τα καταγεγραμμένα αρχεία είναι 326 msec.

Στο διάγραμμα της Εικόνα 6-28 και συγκεκριμένα στα 216 sec φαίνεται ότι όλες οι αρθρώσεις γύρισαν στην αρχική τους θέση (στις 0°). Αυτό συνέβη όταν ενεργοποιήθηκε ο διπλής λειτουργίας διακόπτης (βαθμονόμησης – αρχικών σημείων) και ακολούθησε οπτικός έλεγχος απώλειας βημάτων του συστήματος. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από τα καταγεγραμμένα βίντεο της δοκιμής ο έλεγχος ήταν επιτυχής καθώς δεν είχαν χαθεί βήματα που σημαίνει ότι και η θέση των αρθρώσεων που φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 6-28 είναι η πραγματική. Επίσης από τα καταγεγραμμένα βίντεο μπορεί να διαπιστωθεί έως ένα βαθμό η ικανότητα του συστήματος σταθερής στόχευσης στην εύρεση και διατήρηση του στόχου.

Κεφάλαιο

7

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν την εργασία και προτείνονται οι μελλοντικές βελτιώσεις και αναβαθμίσεις του συστήματος στόχευσης.

7. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία είχε ως στόχο την ανάπτυξη και τον έλεγχο ενός πρωτότυπου αυτόνομου συστήματος με κατευθυντική κεραία, για χρήση σε παράκτιους αγκυροβολημένους πλωτούς ωκεανογραφικούς σταθμούς.

Από τις πειραματικές δοκιμές του συστήματος, οι οποίες αναφέρονται στο κεφάλαιο 6, προκύπτει ότι το σύστημα ρομποτικής στόχευσης είναι ικανό να εντοπίσει το στόχο και να διατηρεί τον προσανατολισμό της κεραίας προς αυτόν, υπό την επίδραση κυματισμού, με ακρίβεια που καλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Κάτι που δεν πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η δοκιμή της επικοινωνίας μεταξύ δύο κεραιών αρχικά στη στεριά και έπειτα μία πραγματική δοκιμή μετάδοσης του σήματος στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Μελλοντικά για να τοποθετηθεί το ρομποτικό σύστημα στόχευσης πάνω στο πλωτό σταθμό κρίνεται απαραίτητη η προστασία του από αέρα – νερό – σκόνη. Αυτό μπορεί να γίνει

καλύπτοντας όλο το σύστημα με ένα αυγοειδή πλαστικό κέλυφος (Εικόνα 1-5). Επίσης για να μπορεί το σύστημα να είναι και ενεργειακά αυτόνομο, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες. Για την αφύπνιση του συστήματος σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, η πιο απλή λύση θα ήταν η χρησιμοποίηση ενός ρολογιού πραγματικού χρόνου (Real Time Clock). Για την αφύπνιση του συστήματος από το χρήστη θα μπορούσε να προστεθεί μία πλακέτα GSM κινητής τηλεφωνίας. Με την αποστολή ενός μηνύματος από το χρήστη μπορούν να δοθούν και επιπλέον εντολές όπως: επανεκκίνηση, βαθμονόμηση, μεταβολή της τιμής της μαγνητικής απόκλισης κ.ά. Η πλακέτα GSM κινητής τηλεφωνίας σε συνδυασμό με το GPS προσδίδει μία επιπλέον λειτουργία στο υπάρχων σύστημα στόχευσης, καθώς θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως σύστημα συναγερμού του σταθμού σε περίπτωση που βγει εκτός κάποιας ορισμένης εμβέλειας, στέλνοντας ένα μήνυμα SMS στο χρήστη.

Για την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας περιστροφής συνιστάται η μείωση των περιστρεφόμενων μαζών. Μία σημαντική μείωση θα μπορούσε να επιτευχθεί εύκολα και με ελάχιστο κόστος μεταφέροντας τον κινητήρα της 1^{ης} άρθρωσης από το περιστρεφόμενο μέρος του μηχανισμού, στην βάση του. Η χρησιμοποίηση τυπωμένων κυκλωμάτων θα επιφέρει την μείωση των καλωδίων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χώρου. Έπειτα από τις δύο παραπάνω βελτιώσεις θα είναι εφικτή η μείωση των διαστάσεων του μηχανισμού με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του περιστρεφόμενου βάρους.

Σίγουρα αρκετές βελτιώσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με την αλλαγή εξαρτημάτων (hardware) αλλά εκτιμάται ότι με την εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων το σύστημα ρομποτικής στόχευσης θα μπορούσε να είναι επιχειρησιακό.

8. Βιβλιογραφία

- [1] “Underwater gliders for European ocean observation.” [Online]. Available: <http://auvac.org/newsitems/view/1954>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [2] “EuroGOOS.” [Online]. Available: <http://eurogoos.eu/>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [3] “Poseidon System.” [Online]. Available: <http://poseidon.hcmr.gr/>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [4] “HCMR Hellenic Centre for Marine Research.” [Online]. Available: <http://www.hcmr.gr/en/>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [5] Frye Daniel, Doherty Ken, and Hinton Al, “Design and Evaluation of a Directional Antenna for Ocean Buoys,” Massachusetts, 1997.
- [6] “iMAR - iPSC-ANTRAD-301.” [Online]. Available: http://imar.de/downloads/IPSC_ANTRAD_301.pdf. [Accessed: 03-Nov-2017].
- [7] “iMAR - iPSC-ANTRAD-302.” [Online]. Available: http://imar.de/downloads/IPSC_ANTRAD_302.pdf. [Accessed: 03-Nov-2017].
- [8] “The complete guide to FPV antennas for your drone.” [Online]. Available: <http://www.dronetrest.com/t/the-complete-guide-to-fpv-antennas-for-your-drone/1473>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [9] “Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) | Air-Stream.” [Online]. Available: <https://www.air-stream.org/technical-references/effective-isotropic-radiated-power-eirp>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [10] Cisco, “Omni Antenna vs . Directional Antenna,” 2007.
- [11] Κ. Κεραίες, “Συστήματα Συστήματα Μετάδοσης Μετάδοσης Πληροφορίας Πληροφορίας.” [Online]. Available: <http://xanthippi.ceid.upatras.gr/courses/its/Presentations/antennas.pdf>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [12] “Long-range Wi-Fi.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Long-range_Wi-Fi#2.4.C2.A0GHz_interference. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [13] “Tegola -- Rural Broadband in Scotland.” [Online]. Available: <http://www.tegola.org.uk/>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [14] “Line-of-sight propagation (LOS).” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Line-of-sight_propagation. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [15] R. Busi, *High-altitude VHF and UHF Broadcasting Stations*. Brussels: European Broadcasting Union, 1968.
- [16] “Antennas wave and propagation.” [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/ishanegi35/antennas-wave-and-propagation>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [17] V. Koch and I. Okanagan, “Rotations in 3D Graphics and the Gimbal Lock,” 2016.
- [18] “RS 191-8356.” [Online]. Available: <http://gr.rsdelivers.com/product/rs-pro/dsh56es8ea4100000/rs-pro-hybrid-stepper-motor-18-494mm-12-v-dc-600/1918356>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [19] “RS 191-8340.” [Online]. Available: <http://gr.rsdelivers.com/product/rs->

- pro/dsh56es8da410000/rs-pro-hybrid-stepper-motor-18-494mm-12-v-dc-480/1918340. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [20] "RS 191-8299." [Online]. Available: <http://gr.rsdelivers.com/product/rs-pro/dsh40es6ba1k40050/rs-pro-hybrid-stepper-motor-18-100mm-12-v-dc-400/1918299>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [21] "Stepper Motor Drives Information | Engineering360." [Online]. Available: http://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/controls_drives/stepper_motor_drives. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [22] "Pololu - A4988 Stepper Motor Driver Carrier." [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/1182>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [23] "Everything You Ever Wanted To Know About GPS But Were Afraid To Ask." [Online]. Available: <http://blog.prosig.com/2010/04/12/everything-you-ever-wanted-to-know-about-gps-but-were-afraid-to-ask/>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [24] "SparkFun Venus GPS Logger - SMA Connector - GPS-10920 - SparkFun Electronics." [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10920>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [25] "What is SBAS? | EGNOS Portal." [Online]. Available: <https://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-sbas>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [26] "HOME | EGNOS User Support." [Online]. Available: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/. [Accessed: 03-Nov-2017].
- [27] "Inductive Proximity Sensors | Technical Guide | Automation Controls." [Online]. Available: https://www3.panasonic.biz/ac/e/service/tech_support/fasys/tech_guide/proximity/index.jsp. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [28] "Slip Rings | How Does a Slip Ring Work • PowerbyProxi." [Online]. Available: <https://powerbyproxi.com/slip-ring/>. [Accessed: 03-Nov-2017].
- [29] "Slip Ring - 12 wires, AWG28." [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1196>. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [30] "Slip ring - 12 wires, AWG16." [Online]. Available: <http://www.dx.com/p/high-current-capsule-slip-ring-12-circuits-5a-circuit-for-wind-turbine-449764#.WfpEhVuCyXJ>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [31] "American Wire Gauge Chart and AWG Electrical Current Load Limits table with skin depth frequencies and wire breaking strength." [Online]. Available: https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [32] "PoE(Power over Ethernet) : OSHW Alchemist." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_over_Ethernet. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [33] "Nanobeam M." [Online]. Available: https://dl.ubnt.com/datasheets/nanobeam/NanoBeam_DS.pdf. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [34] J. J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control, Third Edition*, Third Edit. Pearson Educational International, 2005.
- [35] "Εισαγωγή στο Arduino | deltaHacker." [Online]. Available: <https://deltahacker.gr/arduino-intro/>. [Accessed: 03-Nov-2017].
- [36] S. Devin, "NeoGPS." [Online]. Available: <https://github.com/SlashDevin/NeoGPS>.

- [Accessed: 02-Nov-2017].
- [37] “Decimal degrees.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Decimal_degrees. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [38] “Haversine formula.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula#The_law_of_haversines. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [39] “Calculating accurate length in meters for lat , long coordinate systems - FME Knowledge Center.” [Online]. Available: <https://knowledge.safe.com/articles/725/calculating-accurate-length-in-meters-for-lat-long.html>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [40] “Overview | Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor | Adafruit Learning System.” [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor/overview>. [Accessed: 07-Nov-2017].
- [41] N. Bowditch and United States. National Imagery and Mapping Agency., *The American practical navigator : an epitome of navigation*. The Agency, 2002.
- [42] K. J. Lohmann, C. M. F. Lohmann, and N. F. Putman, “Magnetic maps in animals: nature’s GPS.,” *J. Exp. Biol.*, vol. 210, no. Pt 21, pp. 3697–705, Nov. 2007.
- [43] “Find the Magnetic Declination at your location.” [Online]. Available: <http://www.magnetic-declination.com/>. [Accessed: 04-Nov-2017].
- [44] “AccelStepper: AccelStepper library for Arduino.” [Online]. Available: <http://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/>. [Accessed: 02-Nov-2017].