



Εξώφυλλο

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
& ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών ΠΜΣ Πληροφορικής και Δικτύων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ
ΔΙΚΤΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ, ΤΗ
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΒΑΔΙΣΤΗ**

Μιχαήλ – Άγγελος Σάββαρης

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Δημόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος, 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

ΤΜΗΜΑ Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών ΠΜΣ Πληροφορικής και Δικτύων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΙΚΤΥΟ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ, ΤΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΝΟΣ
ΒΑΔΙΣΤΗ**

Μιχαήλ – Άγγελος Σάββαρης

Αμ: 35

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Δημόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος, 2020

**STUDY, CONSTRUCTION AND COLLECTION OF DATA FROM
SENSOR NETWORK FOR THE PURPOSE OF
DETERMINATION, RECORDING AND EVALUATION BASIC
MOVEMENT CHARACTERISTICS OF A WALKER**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 04/09/2020

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής
Δημήτριος Δημόπουλος,
Πανεπιστημιακός Υπότροφος
2. Μέλος επιτροπής
Αλέξανδρος Τζάλλας
Επίκουρος Καθηγητής
3. Μέλος επιτροπής
Νικόλαος Γιαννακέας,
Επίκουρος Καθηγητής

Ο Διευθυντής του ΠΜΣ

Χρυσόστομος Στύλιος,
Καθηγητής, Α' Βαθμίδας
Υπογραφή

© Σάββαρης Μιχαήλ Άγγελος, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Σάββαρης Μιχαήλ - Άγγελος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Δημόπουλο Δημήτριο, για την βοήθεια, τη καθοδήγηση και την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε καθ' όλο το χρονικό διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Οι συμβουλές του, οι οδηγίες του αλλά και οι κατευθύνσεις του συνέβαλαν στο μέγιστο για την επιτυχία κατά την άποψη μου ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, την οικογένεια μου και όλους τους καθηγητές του τμήματος, για την πολύτιμη γνώση που μου μεταλαμπάδευσαν και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν κάθε φορά που ζητήθηκε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παλαιότερα, οι αισθητήρες όπως είναι το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο και το μαγνητόμετρο ήταν πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές για να υπολογίσουν τον προσανατολισμό, την ταχύτητα και τη θέση. Η βαθμονόμηση των αισθητήρων ήταν μια επίπονη διαδικασία, τα πειράματα έπρεπε να πραγματοποιηθούν σε συνθήκες εργαστηρίου και το κόστος της υλοποίησης ήταν μεγάλο. Στη σημερινή εποχή, με την εξέλιξη της τεχνολογίας κατασκευάζονται και παράγονται μαζικά αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMU) μέσω της τεχνολογίας MEMS τα οποία έχουν πολύ χαμηλό κόστος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών όπως την ρομποτική, δορυφόρους, συστήματα GPS, συστήματα προσανατολισμού, συστήματα παρακολούθησης της βάρδισης. Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο προγραμματισμός και η αξιοποίηση των δυνατοτήτων μιας αδρανειακής μονάδας μέτρησης 9 βαθμών ελευθερίας και χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση και καταγραφή της βάρδισης. Με τα δεδομένα της βάρδισης και με κατάλληλους αλγόριθμους επιχειρήθηκε να βρεθεί η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η θέση, ο προσανατολισμός και στοιχεία του κύκλου βάρδισης όπως το μήκος και ο χρόνος βάρδισης. Τα παραπάνω δεδομένα βρέθηκαν μέσω τριών διαφορετικών πειραμάτων που υλοποίησε ο βαδιστής, 1) φυσιολογική βάρδιση, 2) αργή βάρδιση, 3) ταχεία βάρδιση. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα γραφήματα συγκεντρωτικά και γίνεται σύγκριση και αξιολόγηση των δεδομένων που συλλέξαμε καθώς και τα τελικά συμπεράσματα για το κάθε πείραμα.

Λέξεις-κλειδιά: Επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο, μαγνητόμετρο, IMU, αισθητήρες.

ABSTRACT

In the past, sensors such as accelerometer, gyroscope and magnetometer were very difficult to be used in applications to calculate orientation, velocity and position. The calibration of the sensors was a laborious process, the experiments had to be performed in laboratory conditions and the cost of implementation was high. Nowadays with the evolution of technology inertial measurement units (IMU) are manufactured and mass produced through MEMS technology which have a very low cost and can be used in a variety of applications such as robotics, satellites, GPS systems, orientation systems, tracking systems of gait. The object of the present work is the programming and utilization of the possibilities of an inertial unit of measurement of nine degrees of freedom and low cost for the monitoring and recording of gait. With the gait data and appropriate algorithms, tried to find the acceleration, velocity, position, orientation and elements of the gait cycle such as gait length and time. The above data were found through three different experiments performed by the walker, 1) normal gait, 2) slow gait, 3) fast gait. Finally, in the seventh chapter of the work, the graphs are presented as a summary and the data we collected are compared and evaluated, as well as the final conclusions for each experiment.

Keywords: accelerometer, gyroscope, magnetometer, IMU, sensors.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ	Error! Bookmark not defined.
ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRACT.....	Error! Bookmark not defined.
1. Εισαγωγή.....	Error! Bookmark not defined. 7
1.1 Ανθρώπινη βάδιση	Error! Bookmark not defined. 7
1.2 Κύκλος βάδισης.....	Error! Bookmark not defined. 8
2. Μικροελεγκτές	20
2.1 Το Arduino	20
2.2 Περιγραφή της πλακέτας Arduino	21
2.3 Το πρωτόκολλο I2C	23
3. Sensors	24
3.1. Τεχνολογία MEMS	24
3.2. Επιταχυνσιόμετρο	25
3.2.1. Αναλογικό επιταχυνσιόμετρο.....	28
3.2.2. Ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο.....	29
3.3. Γυροσκόπιο	30
3.3.1. Μέτρηση γυροσκοπίου.....	33
3.4. Μαγνητόμετρο	34
3.4.1. Μαγνητικό πεδίο της Γης.....	37
3.4.2. Παραμορφώσεις του μαγνητικού πεδίου	37
4. Προσδιορισμός Προσανατολισμού	40
4.1. Γωνίες Euler	40

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

4.2. Quaternions	43
4.3. Πίνακας στροφής.....	44
5. Αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU)	47
5.1. Gravity BNO055 + BMP280 Intelligent 10DOF AHRS.....	47
5.2. IMU BNO055.....	48
5.3 Kalman filter	53
5.4 Moving Average filter.....	53
6. Πειραματική διαδικασία.....	55
6.1. Βιβλιοθήκες.....	56
6.2. Βασικές Συναρτήσεις	56
6.3. Διάγραμμα Ροής.....	58
6.4. Υλοποίηση - Αποτελέσματα	59
7. Ανάλυση - Συμπεράσματα	77
7.1 Μελλοντικές επεκτάσεις	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑ ARDUINO	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑ MATLAB.....	91
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 χρονικές περίοδοι βημάτων για κάθε σενάριο	81
Πίνακας 2 Μήκος βημάτων για κάθε σενάριο	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Ο κύκλος βάδισης με τα δύο στάδια φάσης: (1-4) στάδιο στήριξης, (5-8) στάδιο αιώρησης (Weijun Tao, 2012).....	18
Εικόνα 2 Περιγραφή της πλακέτας Arduino UNO (Καλοφώλιας, 2017)	21
Εικόνα 3 Γραφική Απεικόνιση του I2C πρωτοκόλλου (Παπάζογλου & Λιώνης, 2015)	23
Εικόνα 4 Λειτουργία επιταχυνσιόμετρου ενός άξονα (Wikipedia, 2012).....	26
Εικόνα 5 Στάδιο ακινησίας της σφαίρας (Πατώνης, 2012).....	26
Εικόνα 6 Πρόσκρουση σφαίρας στον άξονα -x λόγω κίνησης του πλαισίου (Πατώνης, 2012)	27
Εικόνα 7 Πρόσκρουση σφαίρας στον άξονα -z λόγω ύπαρξης της δύναμης του βαρυτικού πεδίου (Πατώνης, 2012)	27
Εικόνα 8 Πρόσκρουση σφαίρας σε δύο άξονες ταυτόχρονα (Πατώνης, 2012)	28
Εικόνα 9 Το γυροσκόπιο παραμένει όρθιο λόγω διατήρησης της στροφορμής (Πατώνης, 2012)	31
Εικόνα 10 Αρχή λειτουργίας ενός Γυροσκοπίου (Πατώνης, 2012)	31
Εικόνα 11 Γυροσκόπιο τεχνολογίας MEMS (Πατώνης, 2012).....	32
Εικόνα 12 Συνδυασμός αισθητήρων MEMS πάνω σε μία πλακέτα (Πατώνης, 2012)	33
Εικόνα 13 Γυροσκόπιο μηχανισμού Gimbal (Πατώνης, 2012).....	33
Εικόνα 15 Μαγνητόμετρο (Wikipedia, 2020).....	34
Εικόνα 16 Μαγνητικό πεδίο της Γης (Πατώνης, 2012)	35
Εικόνα 17 Η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης (Πατώνης, 2012).....	35
Εικόνα 18 Γωνίες roll και pitch ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Πατώνης, 2012).....	36
Εικόνα 19 Παραμόρφωση μαγνητικού πεδίου από αντικείμενο που εκπέμπει μαγνητικά πεδία (Πατώνης, 2012).....	37
Εικόνα 20 Μετρήσεις μαγνητόμετρου χωρίς παραμορφώσεις (Πατώνης, 2012)	38
Εικόνα 21 παραμόρφωση σκληρού σιδήρου (Πατώνης, 2012).....	38

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 22 Παραμόρφωση σκληρού και μαλακού σιδήρου ταυτόχρονα (Πατώνης, 2012)	39
Εικόνα 23 Γωνίες περιστροφής Yaw, Roll, Pitch (Πατώνης, 2012)	40
Εικόνα 24 Γωνίες περιστροφής γυροσκοπίου τύπου Gimbal (Πατώνης, 2012)	41
Εικόνα 25 Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z (Yaw) (Πατώνης, 2012)	41
Εικόνα 26 Γωνία γύρω από τον άξονα Y (Pitch) (Πατώνης, 2012)	42
Εικόνα 27 Περιστροφή γύρω από τον άξονα X (Roll) (Πατώνης, 2012).....	42
Εικόνα 28 Μετασχηματισμός διανύσματος από το ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο (Πατώνης, 2012).....	45
Εικόνα 29 gravity BNO055 + BMP280 10DOF AHRS (DFrobot, wiki.dfrobot.com).....	48
Εικόνα 30 Αρχιτεκτονική BNO055 . (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).....	49
Εικόνα 31 λειτουργίες Operating Mode (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).....	51
Εικόνα 32 default settings (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).....	51
Εικόνα 33 Μονάδες μέτρησης των sensors (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).....	52
Εικόνα 34 συμβάσεις περιστροφών γωνιών (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).....	52
Εικόνα 35 Block Diagram του συστήματος	55
Εικόνα 36 Σύστημα ενσωματωμένο στο βαδιστή	55
Εικόνα 37 Διάγραμμα ροής συνάρτησης setup ()	58
Εικόνα 38 Διάγραμμα Ροής συνάρτησης loop ().....	59
Εικόνα 39 CoolTermWin	60
Εικόνα 40 εκτύπωση μηνύματος σωστής λειτουργίας IMU	60

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 41 Γράφημα επιτάχυνσης με τη δύναμη της βαρύτητας.....	61
Εικόνα 42 Γράφημα γραμμικής επιτάχυνσης.....	61
Εικόνα 43 Γράφημα 1. Αρχικό σήμα Γράφημα 2. Τελικό σήμα	63
Εικόνα 44 Επιταχύνσεις χωρίς φίλτρο για τους 3 άξονες	63
Εικόνα 45 Γραφική απεικόνιση επιταχύνσεων στους 3 άξονες με φίλτρο κυλιόμενου μέσου	64
Εικόνα 46 Γραφική παράσταση ταχύτητας και θέσης.....	65
Εικόνα 47 Απεικόνιση των κορυφών toe off και heel strike	66
Εικόνα 48 χρονική διάρκεια κάθε βήματος σε sec	66
Εικόνα 49 Μήκος βήματος σε m	66
Εικόνα 50 Γράφημα 1. Αρχικό σήμα Γράφημα 2. Διαμορφωμένο σήμα.....	67
Εικόνα 51 Σήμα επιτάχυνσης στους άξονες X, Y, Z χωρίς φίλτρο	67
Εικόνα 52 Σήμα επιτάχυνσης στους άξονες X, Y, Z με φίλτρο	68
Εικόνα 53 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας και θέσης.....	69
Εικόνα 54 Γραφική απεικόνιση toe off και heel strike.....	69
Εικόνα 55 Χρονική περίοδος βήματος (sec)	70
Εικόνα 56 Μήκος βήματος σε (m)	70
Εικόνα 57 Γράφημα 1. Αρχικό σήμα / Γράφημα 2. Διαμορφωμένο σήμα	71
Εικόνα 58 Επιτάχυνσης 3 αξόνων χωρίς φίλτρο	71
Εικόνα 59 Επιτάχυνση 3 αξόνων με φίλτρο.....	72
Εικόνα 60 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας και θέσης.....	72
Εικόνα 61 Εμφάνιση toe off και heel strike	73
Εικόνα 62 χρόνο βάρδισης βημάτων (sec)	73
Εικόνα 63 Μήκος βάρδισης βημάτων (m)	74

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 64 Περιστροφή γωνίας roll	74
Εικόνα 65 Περιστροφή γωνίας pitch.....	75
Εικόνα 66 Περιστροφή γωνίας yaw	76
Εικόνα 67 Γράφημα επιτάχυνσης φυσιολογικής βάρδισης.....	77
Εικόνα 68 Γράφημα επιτάχυνσης αργού βηματισμού.....	77
Εικόνα 69 Γράφημα επιτάχυνσης ταχείας βάρδισης.....	77
Εικόνα 70 Γράφημα ταχύτητας φυσιολογικής βάρδισης	78
Εικόνα 71 Γράφημα ταχύτητας αργής βάρδισης.....	78
Εικόνα 72 Γράφημα ταχύτητας ταχείας βάρδισης	78
Εικόνα 73 Γράφημα θέσης φυσιολογικής βάρδισης	79
Εικόνα 74 Γράφημα θέσης αργής βάρδισης.....	79
Εικόνα 75 Γράφημα θέσης ταχείας βάρδισης	79
Εικόνα 76 Τελικό σύστημα	99
Εικόνα 77 Τελικό σύστημα ενσωματωμένο στον βαδιστή.....	99

Κεφάλαιο 1^ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

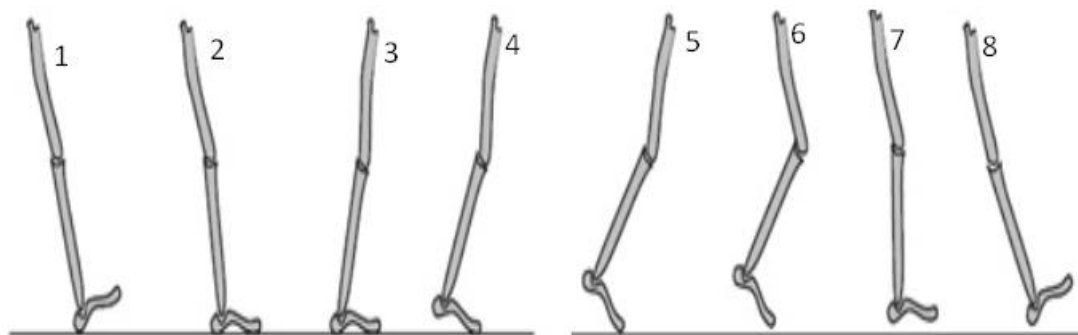
Η βάδιση είναι μία λειτουργική ικανότητα που επιδρά σημαντικά στην ποιότητα ζωής ενός ανθρώπου. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά εργαλεία, πειράματα σε εργαστήρια και μελέτες για την ανάλυση της. Όμως πολλές φορές η κίνηση σε ένα ειδικά διαμορφωμένο εργαστήριο δεν αντικατοπτρίζει την σωστή κίνηση ενός ατόμου όπως θα φανεί στο φυσικό περιβάλλον καθημερινά. Η επιστήμη που μελετά την ανθρώπινη βάδιση ονομάζεται ανάλυση βάδισης. Η ανάλυση βάδισης τμηματοποιείται σε μεθόδους που μετράνε την κίνηση στο χώρο, την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μεταβολή της κίνησης, την λειτουργικότητα των μυών, τις δυνάμεις που ασκούνται στο έδαφος κατά την κίνηση. Μέσω αυτής της διαδικασίας οι ερευνητές έχουν διαμορφώσει ειδικές ορολογίες για τη μελέτη της βάδισης. [1]

1.1 Ανθρώπινη βάδιση

Ανάλυση βάδισης είναι η συστηματική μελέτη της ανθρώπινης κίνησης. Αυτός ο τύπος ανάλυσης περιλαμβάνει τη καταγραφή, τη μέτρηση και την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών που διέπουν την ανθρώπινη μετακίνηση. Μέσω της ανάλυσης βάδισης μπορούν να αναγνωριστούν η φάση βάδισης, οι κινηματικές και κινητικές παράμετροι ενός ανθρώπου. Με αυτό το τρόπο μπορούν να προσδιοριστούν περιστατικά που οφείλονται στην βάδιση αλλά και να αναλυθούν οι μυοσκελετικές λειτουργίες. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στον αθλητισμό, στην αποκατάσταση και στην διάγνωση της υγείας. Για παράδειγμα μέσω της καταγραφής της βάδισης στην ορθοπεδική παρακολουθείται η πρόοδος θεραπείας των ασθενών, στον αθλητισμό μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να γίνει αξιολόγηση και πρόληψη πολλών μυϊκών τραυματισμών. Σύμφωνα με έρευνες το ενδιαφέρον της βάδισης ξεκινάει από τα τέλη του 19 αιώνα. Σήμερα είναι η θεμελιώδης μέθοδος της βιοϊατρικής μηχανικής για την ανθρώπινη κίνηση και όλο και περισσότεροι ερευνητές και γιατροί εργάζονται σε αυτό το τομέα. [2]

1.2 Κύκλος βάδισης

Το ανθρώπινο περπάτημα είναι μια περιοδική κίνηση των ποδιών του σώματος και περιλαμβάνει μία ακολουθία από επαναλαμβανόμενες κινήσεις. Η φάση βάδισης ή αλλιώς όπως ονομάστηκε ο κύκλος βάδισης, είναι η περίοδος ενός ολοκληρωμένου βήματος. Πιο συγκεκριμένα ο κύκλος βάδισης αποτελείται από δύο κύρια στάδια. Το στάδιο της στήριξης (stance phase) που καταλαμβάνει το 60% και το στάδιο αιώρησης ή ταλάντευσης (swing phase) όπως αποκαλείται το οποίο καταλαμβάνει το υπόλοιπο 40% της περιόδου του βήματος. Αυτά τα δύο στάδια χωρίζονται σε οκτώ δευτερεύουσες φάσεις. Την αρχική επαφή, την μέση στήριξη, τη μέση φάση στήριξης, τη τερματική φάση στήριξης, τη φάση προ – αιώρησης, την επιτάχυνση, τη μέση αιώρηση και την επιβράδυνση.



Εικόνα 1 Ο κύκλος βάδισης με τα δύο στάδια φάσης: (1-4) στάδιο στήριξης, (5-8) στάδιο αιώρησης
(Weijun Tao, 2012)

Στο στάδιο στήριξης έχουμε τις τέσσερις πρώτες φάσεις,

- (1) Αρχική επαφή (Initial Contact): Αυτή η φάση περιλαμβάνει την στιγμή που η φτέρνα ακουμπάει το πάτωμα, ενώ τα δάχτυλα βρίσκονται στον αέρα.
- (2) Μέση στήριξη (Loading Response): Σε αυτή τη φάση ολόκληρο το πόδι βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος.
- (3) Μέση φάση στήριξης (Mid Stance): Είναι το διάστημα που το σώμα στηρίζεται στο ένα άκρο. Η μέση φάση στήριξης ξεκινά όταν το άλλο πόδι ανυψώνεται και συνεχίζεται έως ότου ευθυγραμμιστεί το σώμα προς τα εμπρός.
- (4) Τερματική φάση στήριξης (Terminal Stance): Είναι η φάση όπου ξεκινά να σηκώνεται η φτέρνα από το έδαφος και συγχρόνως το άλλο πόδι ακουμπάει το έδαφος.

Στο στάδιο αιώρησης έχουμε τις εξής φάσεις,

- (5) Φάση προ – αιώρησης (Pre – Swing): Είναι η φάση που ενώνει το στάδιο στήριξης με το στάδιο αιώρησης. Σε αυτή τη φάση τα δάχτυλα σηκώνονται από το έδαφος και το πόδι βρίσκεται στον αέρα.
- (6) Επιτάχυνση (Initial Swing): Σε αυτή τη φάση το πόδι ανυψώνεται και αρχίζει να κινείται στον αέρα.
- (7) Μέση αιώρηση (Mid Swing): Αυτή η φάση ξεκινά καθώς το αιωρούμενο άκρο βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το άκρο στάσης.
- (8) Επιβράδυνση (Terminal Swing): Είναι η τελική φάση της αιώρησης στην οποία το άκρο επιβραδύνει και ετοιμάζεται να έρθει σε επαφή με το έδαφος.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση των φάσεων βάρδισης και των βασικών καθηκόντων της κίνησης των άκρων, οι φάσεις βάρδισης μπορούν να ανιχνευθούν αποτελεσματικά αφού βρεθούν οι προσανατολισμοί των τμημάτων του ποδιού. [2], [3]

Κεφάλαιο 2^ο

2. Μικροελεγκτές

Η καρδιά κάθε κλασσικού υπολογιστικού συστήματος είναι ο μικροεπεξεργαστής και η βασική του λειτουργία είναι η εκτέλεση εντολών. Όμως ο επεξεργαστής δεν μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα αφού χρειάζεται να αλληλοεπιδρά με διάφορα περιφερειακά συστήματα όπως σκληρός δίσκος, μνήμες, πληκτρολόγιο, οθόνη κ.α. για να αξιοποιηθεί από τον χρήστη. Αντίθετα ο μικροελεγκτής είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που περιέχει όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω και μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα. Περιέχει μνήμη, περιφερειακά εισόδους / εξόδους αλλά και έχει την δυνατότητα να αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον, να δέχεται ερεθίσματα από αυτό μέσω αισθητήρων, διακοπών και μπορεί να τα μετατρέπει σε ηλεκτρική τάση για την ενεργοποίηση leds, μοτέρ κτλ. Για παράδειγμα ένα κλιματιστικό μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω ενός τηλεκοντρόλ από τον χρήστη. Με τους αισθητήρες θερμοκρασίας που διαθέτει μπορεί να ρυθμίσει την θερμοκρασία και μέσω του μικροελεγκτή ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τον ανεμιστήρα. [4]

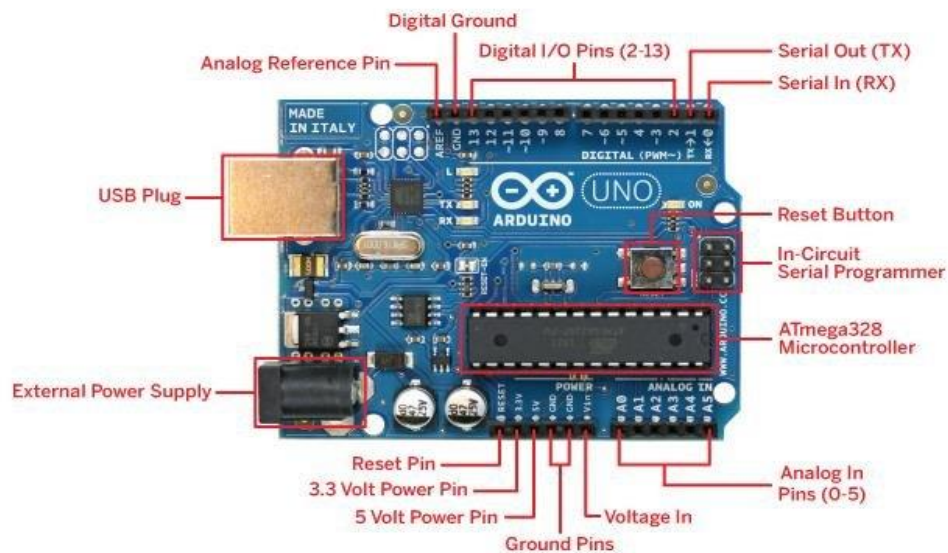
2.1 Το Arduino

Το Arduino αναπτύχθηκε από έναν φοιτητή στην πόλη της Ιβρέα στην Ιταλία το 2003 στα πλαίσια μιας εργασίας. Το πρότζεκτ αυτό ονομαζόταν wiring project και ήταν η υλοποίηση ενός συστήματος που βασιζόταν σε μικροελεγκτή για να προσφέρεται για γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών. Το Arduino πήρε το όνομα του από τον στρατιωτικό διοικητή Arduino και μετέπειτα βασιλιά της Ιταλίας. Στόχος του Arduino ήταν να χρησιμοποιηθεί από ανθρώπους μη σχετικούς με την τεχνολογία και να είναι εύκολο στην χρήση για φοιτητές, μηχανικούς και χομπίστες. Σήμερα το Arduino είναι μία ηλεκτρονική πλατφόρμα ευρέως γνωστή η οποία διαθέτει ένα μικροελεγκτή της ATMEL AVR ενώ έχουν βγει πολλαπλές εκδόσεις με διαφορετικούς μικροελεγκτές και περιφερειακά. Η γλώσσα προγραμματισμού είναι η Wiring, μία παραλλαγή της C++ ενώ με την προσθήκη βιβλιοθηκών υποστηρίζονται πολλές λειτουργίες και δυνατότητες. Το περιβάλλον ανάπτυξης κώδικα είναι το Arduino IDE και βασίζεται στη γλώσσα Processing. Κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα που έχουν κάνει αυτή τη πλατφόρμα τόσο δημοφιλή είναι το χαμηλό κόστος, η συμβατότητα μεταξύ πολλών

λειτουργικών συστημάτων (Linux, Windows, Mac), η απλότητα του λογισμικού του ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται εύκολα από αρχάριους χρήστες και το επεκτάσιμο λογισμικό ανοιχτού κώδικα το οποίο σημαίνει ότι οποιοσδήποτε μπορεί να βρει τμήματα κώδικα στο διαδίκτυο, να τα μελετήσει, να τα τροποποιήσει και να τα χρησιμοποιήσει σύμφωνα με τις ανάγκες του. [4]

2.2 Περιγραφή της πλακέτας Arduino

Η πλακέτα Arduino διαθέτει έναν μικροελεγκτή της ATMEL τον ATmega328P ο οποίος είναι η καρδιά της ηλεκτρονικής πλατφόρμας. Είναι ένας 8 μπιτος ελεγκτής και παρέχει 6 αναλογικές εισόδους και 14 ψηφιακές εισόδους – εξόδους. Η πλακέτα συνδέεται μέσω USB καλωδίου με τον υπολογιστή για την μεταφορά δεδομένων.



Εικόνα 2 Περιγραφή της πλακέτας Arduino UNO (Καλοφώλιας, 2017)

Ο χρήστης μπορεί να προγραμματίσει και να μεταφορτώσει τον κώδικα του από τον υπολογιστή στον μικροελεγκτή μέσω του usb. Η πλακέτα μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε από μπαταρία, είτε από το καλώδιο usb. Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν την πλακέτα Arduino είναι τα παρακάτω:

- ATmega328: Είναι ο μικροελεγκτής που διαθέτει η πλακέτα Arduino. Στη συγκεκριμένη εικόνα είναι αποσπώμενος και μπορεί να αφαιρεθεί.
- Ψηφιακές θύρες εισόδου / εξόδου: Όπως φαίνεται στην εικόνα, βρίσκονται στο πάνω μέρος της πλακέτας και η αρίθμηση ξεκινάει από το 0 - 13.

- Αναλογικές θύρες εισόδου: Βρίσκονται στο κάτω μέρος της πλακέτας και λειτουργούν μόνο ως είσοδοι. Η αρίθμηση τους ξεκινάει από το 0 έως το 6.
- Θύρα USB: Χρησιμοποιείται για την αποστολή δεδομένων, την μεταφόρτωση του κώδικα αλλά και την τροφοδοσία όλης της πλακέτας.
- Εξωτερική τροφοδοσία: Εκτός από την θύρα usb η πλακέτα περιέχει και μία θύρα barrel power jack όπου μπορεί να τροφοδοτήσει την πλακέτα μας από 5 έως 12 V. Η πλακέτα διαθέτει σταθεροποιητή τάσης και για αυτό το λόγο μπορεί να δεχτεί τάσεις μεγαλύτερες των 5 V.
- Κουμπί reset: Στην επιφάνεια της πλακέτας υπάρχει κουμπί reset. Χρησιμοποιείται για την επανεκκίνηση του μικροελεγκτή.
- Ακροδέκτες ISP: Από αυτούς τους ακροδέκτες μπορεί να προγραμματιστεί ο μικροελεγκτής μέσω ISP.
- Leds: Στην επιφάνεια της πλακέτας υπάρχουν led Tx & Rx τα οποία αναβοσβήνουν όταν γίνεται αποστολή ή λήψη δεδομένων μεταξύ της πλακέτας και του υπολογιστή, led εκκίνησης της πλακέτας καθώς και ένα ενσωματωμένο led που είναι συνδεδεμένο με το ψηφιακό pin 13 και υπάρχει στην πλακέτα για δοκιμή, αν δεν υπάρχει πρόσθετος εξοπλισμός από τον χρήστη.
- Τάσεις: Η πλακέτα διαθέτει ακροδέκτες τάσης 3.3 V, 5V και pin Vin όπου μπορούμε να τροφοδοτήσουμε το σύστημα μας με τάση διαφορετική από τα υπόλοιπα pin τάσης που υπάρχουν.

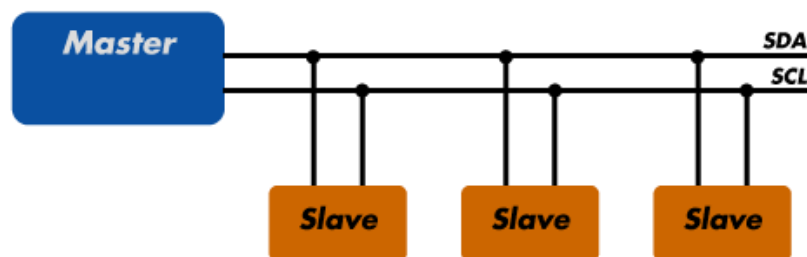
Τα βασικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή είναι [5], [12]:

- Μικροελεγκτής 8 bit RISC αρχιτεκτονικής
- 10 bit ADC
- Τάση λειτουργίας: 5V
- Digital I/O: 14
- Analog Inputs: 6
- PWM pins: 6
- Κατανάλωση ρεύματος ανά ακροδέκτη: 20 mA
- Κατανάλωση ρεύματος ανά ακροδέκτη με τάση λειτουργίας 3.3V: 50mA
- Flash memory: 32 KB

- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Ταχύτητα ρολογιού: 16 MHz
- Πρωτόκολλα I2C, SPI, UART

2.3 Το πρωτόκολλο I2C

Το I2C (Inter – Integrate Circuit) είναι ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας που δημιουργήθηκε από τη Philips Semiconductor και το πλεονέκτημα του είναι ότι μπορεί μία συσκευή να λειτουργήσει ως Master συσκευή και να αλληλοεπιδράσει με 127 Slave συσκευές θεωρητικά. Χρησιμοποιεί δύο αγωγούς αμφίδρομης επικοινωνίας. Το SDA και το SCL. Το SDA είναι ο αγωγός που χρησιμοποιείται για την μεταφορά των δεδομένων ενώ το SCL είναι η γραμμή του ρολογιού. Σημαντικό χαρακτηριστικό για να επικοινωνήσουν δύο συσκευές πρέπει να έχουν κοινή γείωση. Οι δύο αγωγοί SDA και SCL είναι τύπου ανοιχτού συλλέκτη (open collector). Αυτό σημαίνει ότι βγάζουν στην έξοδο λογικό 0 και όχι λογικό 1. Για να γίνει το αντίθετο πρέπει να συνδεθούν με δύο pull up αντιστάσεις. Το πλεονέκτημα της open collector συνδεσμολογίας είναι ότι μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους συσκευές διαφορετικής τάσης λειτουργίας. Όπως αναφέραμε και παραπάνω ο μικροελεγκτής ATmega328P διαθέτει πρωτόκολλο I2C και στην πλακέτα Arduino οι ακροδέκτες SDA και SCL αντιστοιχούν στις θύρες A4, A5. [5]



Εικόνα 3 Γραφική Απεικόνιση του I2C πρωτοκόλλου (Παπάζογλου & Λιώνης, 2015)

Κεφάλαιο 3^ο

3. Sensors

3.1. Τεχνολογία MEMS

Μικρό – Ηλεκτρο – Μηχανικά Συστήματα ή MEMS ονομάζεται η τεχνολογία που αποτελείται από μικροσκοπικές συσκευές όπως μηχανικές μικροδομές, μικροαισθητήρες, μικροενεργοποιητές οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να λαμβάνουν ερεθίσματα από το περιβάλλον και να αλληλοεπιδρούν με αυτό. Τα συστήματα MEMS ανιχνεύουν αλλαγές μέσα στο σύστημα μετρώντας μηχανικά, χημικά ή θερμικά φαινόμενα και συλλέγουν πληροφορίες τις οποίες διοχετεύουν μέσα στο κύκλωμα. Στην πραγματικότητα είναι έξυπνες μικροσυσκευές που σκέφτονται, αισθάνονται και ενεργούν για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MEMS είναι ότι παρέχουν μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, βελτίωση στην απόδοση, παρουσιάζουν μειωμένο φυσικό μέγεθος, βάρος, μικρότερο κόστος αγοράς και κατασκευής από άλλα συστήματα. Τα Μικρό – Ηλεκτρο – Μηχανικά Συστήματα κατηγοριοποιούνται σε έξι διακριτές εφαρμογές. Αυτές είναι:

- Αισθητήρες
- Ενεργοποιητές
- RF MEMS
- Οπτικά MEMS
- BIO MEMS
- Microfluidic (Μικρορευστά) MEMS

Αισθητήρες: Είναι μία κατηγορία MEMS που έχουν σχεδιαστεί για να λαμβάνουν ερεθίσματα από το περιβάλλον και να τα μετατρέπουν σε ηλεκτρική τάση. Τέτοιοι αισθητήρες μπορεί να είναι χημικοί, αδρανειακοί, θερμικοί και οπτικοί.

Ενεργοποιητές: Οι ενεργοποιητές οι οποίοι βρίσκονται μέσα στο ίδιο τσιπ πυριτίου είναι μία ομάδα μικροσυσκευών που έχουν σχεδιαστεί ώστε να λαμβάνουν το σήμα από τα ηλεκτρονικά μέρη του τσιπ και να παρέχουν ενέργεια σε άλλα μέρη ή συσκευές MEMS. Οι ενεργοποιητές

είναι ηλεκτροστατικοί ή θερμικοί.

RF MEMS: Είναι μία κατηγορία μικροσυσκευών που χρησιμοποιούνται για να μεταδίδουν σήματα υψηλής συχνότητας. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι κεραίες, μεταλλικοί διακόπτες επαφής, πυκνωτές.

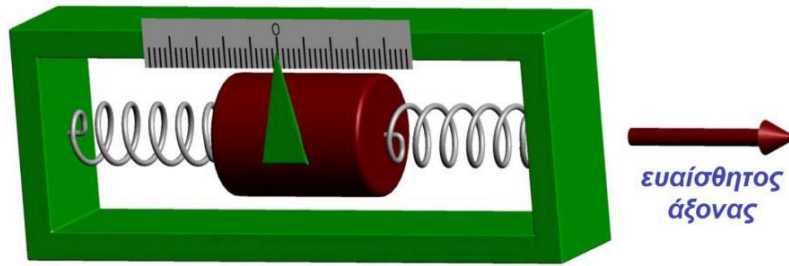
Οπτικά MEMS: Είναι μικροσυσκευές σχεδιασμένες να μεταδίδουν, να φιλτράρουν, να αντανακλούν και να ενισχύουν τα φωτόνια. Τέτοιες συσκευές είναι ανακλαστήρες και οπτικοί διακόπτες.

Microfluid MEMS: Είναι ένα σύνολο μικροδιαύλων χαραγμένες στο πυρίτιο που συνδέονται μεταξύ τους για τον έλεγχο υγρών ή αερίων, δημιουργώντας έτσι βαλβίδες, αντλίες κ.α.

Bio MEMS: Τα βιολογικά MEMS είναι μηχανικά μέρη και τεχνολογίες μικροκατασκευής που χρησιμοποιούνται σε βιολογικές εφαρμογές. Είναι σχεδιασμένα ώστε να λαμβάνουν βιολογικά δείγματα. Μερικές κύριες εφαρμογές των Bio MEMS είναι η ανάλυση κυττάρων, η γονιδιωματική και η μοριακή διάγνωση. [6]

3.2. Επιταχυνσιόμετρο

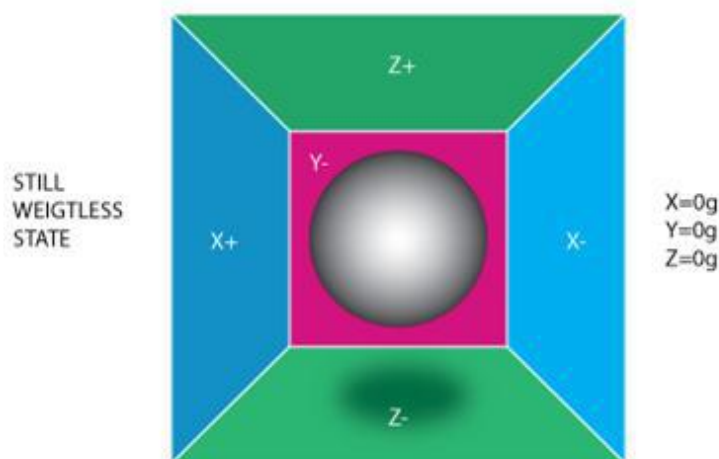
Η αρχή λειτουργίας του επιταχυνσιόμετρου βασίζεται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα $\gamma = F/m$, όπου γ η επιτάχυνση του σώματος, F είναι η φυσική δύναμη και m είναι η μάζα του σώματος που εφαρμόζεται η δύναμη. Συνεπώς το επιταχυνσιόμετρο είναι ένας αισθητήρας που μπορεί να μετράει την δύναμη που ασκείται σε αυτό και να υπολογίζει την αδρανειακή επιτάχυνση. Η επιτάχυνση μετριέται σε m/sec^2 όπως ορίζει το διεθνές σύστημα μονάδων μέτρησης (International System of Units - SI). Ενώ για να τονιστεί η διαφορά της επιτάχυνσης σε ελεύθερη πτώση με την απλή επιτάχυνση (ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας) αναφέρεται ο όρος g από το g – force όπου είναι η επιτάχυνση λόγω της βαρύτητας της γης. Το $1 g$ αντιστοιχεί σε $9,80665 m/sec^2$. Η δύναμη της βαρύτητας λειτουργεί ως εξής, αν ένα σώμα βρίσκεται ακίνητο (με γνωστή μάζα) τότε η μόνη δύναμη που ασκείται σε αυτό είναι η δύναμη της έλξης του βαρυτικού πεδίου της γης. Συνεπώς η επιτάχυνση που προκύπτει είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ισούται με $1g = 9,81 m/sec^2$. Αν το σώμα κινείται τα πράγματα είναι περισσότερο πολύπλοκα. Σε ελεύθερη πτώση η επιτάχυνση πρέπει να είναι μηδενική, ενώ αν επιταχυνθεί προς μία κατεύθυνση τότε η επιτάχυνση που θα λάβουμε θα είναι η επιτάχυνση της κίνησης συν την επιτάχυνση της βαρύτητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να διακριθεί μόνο η επιτάχυνση της κίνησης.



Εικόνα 4 Λειτουργία επιταχυνσιόμετρου ενός άξονα (Wikipedia, 2012)

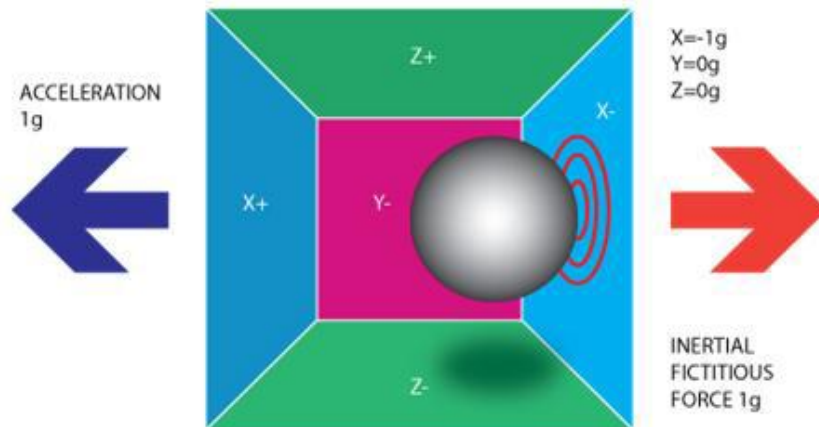
Επιπλέον τα επιταχυνσιόμετρα παρέχουν ακριβείς μετρήσεις σε μακροχρόνια βάση ενώ βραχυπρόθεσμα παρατηρούνται προβλήματα λόγω θορύβου.

Ένα καλό σενάριο για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία του επιταχυνσιόμετρου είναι μία σφαίρα μέσα σε ένα κύβο. Τα τοιχώματα του κύβου είναι οι τρεις άξονες (-x, +x, -y, +y, -z, +z) και είναι ευαίσθητα στην πίεση. Αν δεν υπάρχει καμία δύναμη που να ασκείται στην σφαίρα αλλά ούτε και η δύναμη της βαρύτητας τότε η σφαίρα θα παραμείνει ακίνητη στο κέντρο του κύβου.



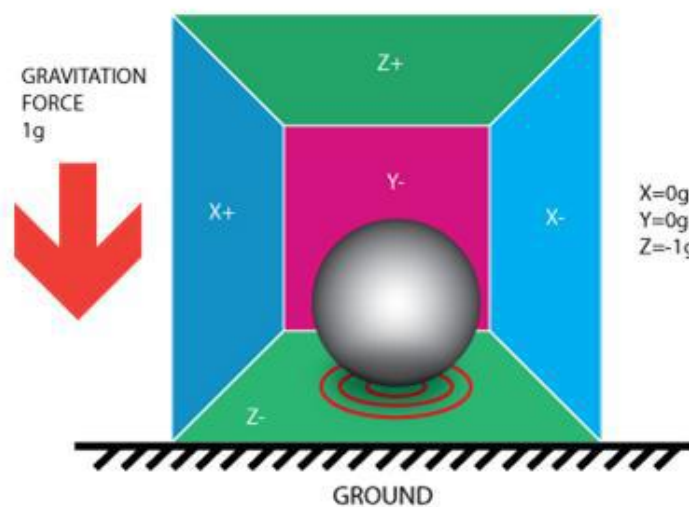
Εικόνα 5 Στάδιο ακινησίας της σφαίρας (Πατώνης, 2012)

Αν υποθεθεί ότι κινείται ξαφνικά το πλαίσιο προς τα αριστερά τότε η σφαίρα θα χτυπήσει στο τοίχωμα του άξονα -x. Αν μετρηθεί η δύναμη πίεσης που ασκεί η σφαίρα στον άξονα -x αυτή αντιστοιχεί με -1g. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα ενώ η κίνηση τείνει προς τα αριστερά η σφαίρα προσκρούει στην αντίθετη κατεύθυνση του διανύσματος της επιτάχυνσης. Αυτή η δύναμη ονομάζεται αδρανειακή δύναμη (Inertial force). Κατά αυτό το τρόπο γίνεται αντιληπτό ότι μέσω αυτής της δύναμης υπολογίζεται έμμεσα η επιτάχυνση. Βέβαια μέχρι στιγμής η μόνη δύναμη που είχε ασκηθεί στο πλαίσιο ήταν της κίνησης.



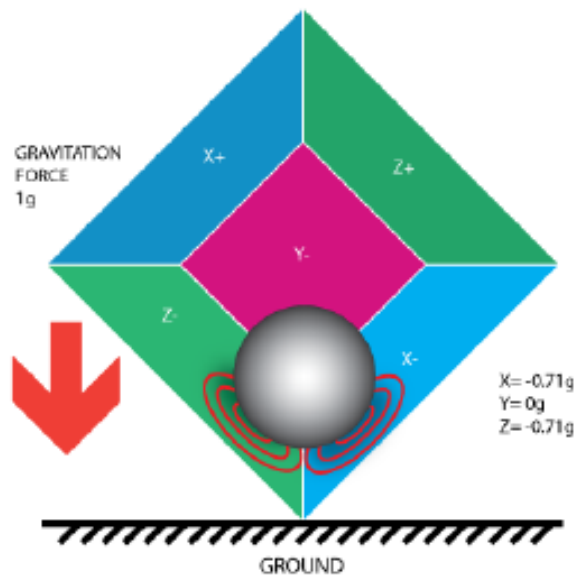
Εικόνα 6 Πρόσκρουση σφαίρας στον άξονα -x λόγω κίνησης του πλαισίου (Πατόνης, 2012)

Σε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο όπως φαίνεται παρακάτω η σφαίρα χτυπάει στο τοίχωμα του άξονα -z ακόμη και αν παραμένει ακίνητο, λόγω της δύναμης της βαρύτητας με τιμή -1g. Αυτό αποδεικνύει και στη πράξη ότι το επιταχυνσιόμετρο μετράει δύναμη και όχι επιτάχυνση και απλά η επιτάχυνση προκαλεί μία αδρανειακή δύναμη που καταγράφεται από τον αισθητήρα εντοπισμού δύναμης.



Εικόνα 7 Πρόσκρουση σφαίρας στον άξονα -z λόγω ύπαρξης της δύναμης του βαρυτικού πεδίου (Πατόνης, 2012)

Μέχρι τώρα το παραπάνω σενάριο αναφερόταν για την επιτάχυνση σε ένα μεμονωμένο άξονα. Σήμερα τα επιταχυνσιόμετρα έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή μπορούν να καταγράψουν αδρανειακές δυνάμεις ταυτόχρονα και στους τρεις άξονες. Έτσι αν ο κύβος περιστραφεί 45 μοίρες η σφαίρα θα προσκρούσει ταυτόχρονα σε δύο άξονες τον -z, -x λαμβάνοντας την τιμή $z = -0,71g$ και $x = -0,71g$. Η τιμή $-0,71g$ υπολογίζεται από την λύση του $\sqrt{1/2}$ [7].



Εικόνα 8 Πρόσκρουση σφαίρας σε δύο άξονες ταυτόχρονα (Πατώνης, 2012)

3.2.1. Αναλογικό επιταχυνσιόμετρο

Η λειτουργία ενός αναλογικού επιταχυνσιόμετρου είναι να λαμβάνει ένα ερέθισμα από το περιβάλλον και να το μετατρέπει σε ηλεκτρική τάση. Η τιμή αυτή για να μετατραπεί από τάση σε τιμή επιτάχυνσης και να γίνει κατανοητή στον χρήστη πρέπει να περάσει από ένα αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter – ADC) και να πάρει την τελική της μορφή ως μία ακολουθία από bits. Ο μετατροπέας ADC συνήθως βρίσκεται ενσωματωμένος στο τσιπ του επιταχυνσιόμετρου αλλιώς υπάρχουν εξωτερικά κυκλώματα μετατροπέων. Οι τιμές της τάσης δεν μπορεί να είναι αυθαίρετες αλλά κυμαίνονται σε ένα διάστημα τιμών ανάλογα με το μέγεθος του ADC. Για παράδειγμα για έναν 10 bit μετατροπέα το διάστημα τιμών που μπορεί να λάβει είναι από 0...1023, που προκύπτει από $1023 = 2^{10} - 1$.

Σε ένα παράδειγμα αν υποθεθεί ότι το επιταχυνσιόμετρο μας λειτουργεί με ένα μετατροπέα 10 bit, η τάση λειτουργίας είναι 3.3 Volt και η τιμή που λάβει από το περιβάλλον σε κάθε άξονα είναι

$$R_x = 560$$

$$R_y = 612$$

$$R_z = 751$$

Τότε ο τύπος που χρησιμοποιείται για να μετατραπεί η τιμή σε τάση είναι:

$$\text{VoltRx} = R_x * V_{\text{ref}} / 1023$$

Το 1023 προκύπτει από τον 10 bit ADC. Εφαρμόζοντας τον τύπο και στους τρεις άξονες οι τιμές τάσης θα είναι:

$$\text{VoltRx} = 560 * 3.3/1023 = 1.80 \text{ V}$$

$$\text{VoltRy} = 612 * 3.3/1023 = 1.97 \text{ V}$$

$$\text{VoltRz} = 751 * 3.3/1023 = 2.42 \text{ V}$$

Σε κάθε επιταχυνσιόμετρο υπάρχει μία τιμή τάσης που ονομάζεται zero g voltage και μπορεί να βρεθεί από το τεχνικό εγχειρίδιο του εκάστοτε κατασκευαστή. Η τιμή αυτή καθορίζει την τάση που θα έχει στα 0 g. Για να υπολογιστεί η σωστή τιμή τάσης πρέπει να αφαιρέσουμε την απόκλιση (shift) της τάσης zero g με τις τιμές τάσης που βρέθηκαν στις παραπάνω εξισώσεις. Αν υποτεθεί ότι η τάση $V_{\text{zerog}} = 1.50 \text{ V}$ τότε οι αποκλείσεις των τάσεων είναι:

$$\text{DeltaVoltRx} = 1.80\text{V} - 1.50\text{V} = 0.30\text{V}$$

$$\text{DeltaVoltRy} = 1.97\text{V} - 1.50\text{V} = 0.47\text{V}$$

$$\text{DeltaVoltRz} = 2.42\text{V} - 1.50\text{V} = 0.92\text{V}$$

Αφού λάβουμε και τις αποκλείσεις των τάσεων το επόμενο βήμα είναι να μετατραπούν οι τιμές τάσεις σε τιμές επιτάχυνσης ώστε να είναι κατανοητές από τον χρήστη. Για να γίνει αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη η ευαισθησία του επιταχυνσιόμετρου η οποία εκφράζεται συνήθως σε mV/g και βρίσκεται στο τεχνικό εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Αν στο συγκεκριμένο παράδειγμα υποτεθεί ότι είναι $450\text{mV/g} = 0.450 \text{ V/g}$ τότε για να υπολογιστούν οι τιμές σε g χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\text{Rxg} = \text{DeltaVoltRx} / 450 = 0.30/0.450 = 0.66\text{g}$$

$$\text{Ryg} = \text{DeltaVoltRy} / 450 = 0.47/0.450 = 1.04\text{g}$$

$$\text{Rzg} = \text{DeltaVoltRz} / 450 = 0.92/0.450 = 2.04\text{g}$$

Μέσω αυτών των εξισώσεων λαμβάνεται η τελική τιμή επιτάχυνσης σε μονάδες g σε κάθε άξονα που πλέον είναι κατανοητές από τον τελικό χρήστη [7].

3.2.2. Ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο

Ένα ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο λειτουργεί με πιο απλό τρόπο σε σχέση με το αναλογικό και

μπορεί να παρέχει τις τιμές μέσω των πρωτοκόλλων I2C, SPI, UART με σειριακή μεταφορά δεδομένων. Η μονάδα μέτρησης της τιμής που εξάγεται από το επιταχυνσιόμετρο είναι το ψηφιακό βήμα ή αλλιώς (Step) και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Συνολικός αριθμός Steps} = 1000 \text{ mg} / \text{Sensitivity}$$

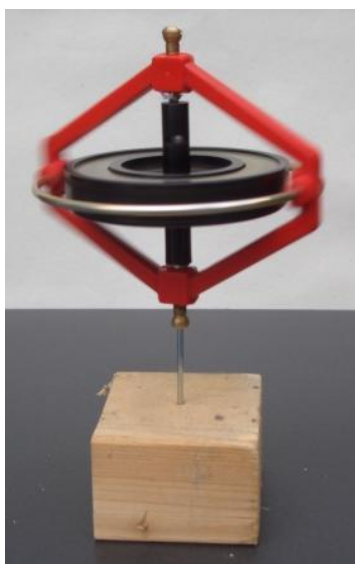
Όπου η τιμή sensitivity μπορεί να βρεθεί από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αν υποθεθεί ότι είναι 4mg τότε:

$$\text{Συνολικός αριθμός Steps} = 1000 \text{ mg} / 4 = 256 \text{ Steps}$$

Συνεπώς ένα Step αντιστοιχεί σε 4mg (Sensitivity) άρα τα 256 Steps θα αντιστοιχούν σε $1000\text{mg} = 1\text{g} = 9.81 \text{ m/sec}^2$. [7]

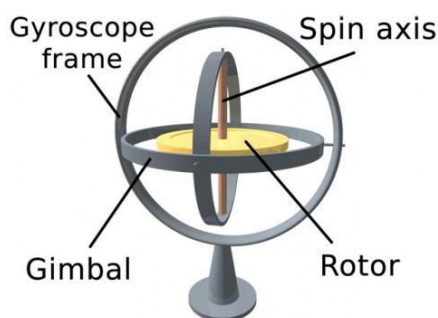
3.3. Γυροσκόπιο

Το γυροσκόπιο είναι μια εφεύρεση που επινοήθηκε από τον Γάλλο φυσικό Jean Bernard Leon Foucault το 1832 και μέσω αυτού προσπάθησε να αποδείξει την περιστροφή της γης το 1852. Ο όρος γυροσκόπιο προέρχεται από την ελληνική λέξη γύρος (turn) και σκοπός (view). Η πρώτη πατέντα έρχεται το 1885 από τον M. G. van den Bos που προσπάθησε να δημιουργήσει ένα γυροσκόπιο προς χρήση χωρίς όμως να έχει επιτυχή αποτελέσματα, ενώ λίγο αργότερα το 1903 σχεδίασε και κατασκεύασε το πρώτο γνωστό γυροσκόπιο το οποίο μάλιστα είχε και καλή απόδοση σε συνθήκες εργαστηρίου. Στη σημερινή εποχή τα γυροσκόπια βρίσκουν χρήση σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών όπως σε πυραύλους, δορυφόρους, διαστημόπλοια, πλοία, ελέγχους ρομπότ, στην αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. ενώ πλέον έχουν αντικαταστήσει την μαγνητική πυξίδα καθώς θεωρούνται πιο ακριβή και μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας μπορούν να αναφερθούν ως προς τον γεωγραφικό βορρά χωρίς να χρειάζονται διορθώσεις όπως οι μαγνητικές πυξίδες.



Εικόνα 9 Το γυροσκόπιο παραμένει όρθιο λόγω διατήρησης της στροφορμής (Πατόνης, 2012)

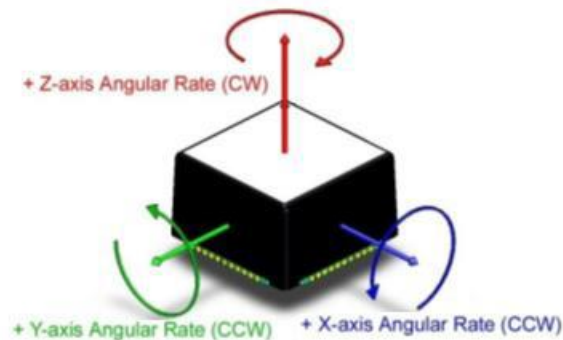
Το γυροσκόπιο αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο δίσκο που ονομάζεται στροφέιο (rotor) και στο κέντρο του βρίσκεται τοποθετημένος ένα άξονας (Spin axis) που περιστρέφεται μέσα στο κέντρο ενός μεγαλύτερου σταθερού κυκλικού πλαισίου (gyroscope frame). Η λειτουργία του είναι η εξής, το σταθερό πλαίσιο του γυροσκοπίου περιστρέφεται με την ίδια περίοδο που περιστρέφεται η Γη γύρω από τον άξονα της, ενώ το στροφέιο παραμένει ακίνητο. Με αυτό το τρόπο τα εσωτερικά κυκλικά πλαίσια (gimbals) ακολουθούν την κίνηση της Γης γύρω από τον κεντρικό δίσκο καταδεικνύοντας την περιστροφή της Γης.



Εικόνα 10 Αρχή λειτουργίας ενός Γυροσκοπίου (Πατόνης, 2012)

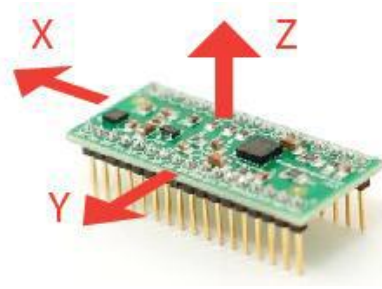
Στις μέρες μας τα μηχανικά γυροσκόπια τείνουν να εξαλειφθούν ενώ και τα πολύ αξιόπιστα γυροσκόπια οπτικών ινών, στερεάς κατάστασης λέιζερ δακτυλίου και κβαντικά γυροσκόπια δεν προτιμώνται λόγω υψηλού κόστους. Ορισμένες εταιρείες έχουν στρέψει το βλέμμα τους σε μικροσκοπικά γυροσκόπια που μπορούν πολύ εύκολα να τυπωθούν πάνω στο πυρίτιο και να λειτουργούν σε ένα μικρό τσιπ μέσω της τεχνολογίας MEMS. Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας είναι το πολύ μικρό φυσικό μέγεθος, την μαζική παραγωγή, το χαμηλό κόστος και ότι μπορούν να τοποθετηθούν σε πλήθων ηλεκτρονικών συσκευών, ενώ ένα βασικό

μειονέκτημα είναι η μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με τα παραπάνω. Τα γυροσκόπια τεχνολογίας MEMS χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς κεραμικούς μετατροπείς που αποτελούνται από μικροσκοπικά μηχανικά στοιχεία. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή μεταφοράς ενέργειας μεταξύ δύο δονούμενων σημείων σε μια δομή μέσω της επίδρασης Coriolis και επιτρέπει στα δονούμενα γυροσκόπια να αισθανθούν οποιαδήποτε μικρή κίνηση περιστροφής. Σε σχέση με τα επιταχυνσιόμετρα τα γυροσκόπια βρίσκονται ακόμα σε στάδιο εξέλιξης λόγω της ανακρίβειας τους σε βάθος χρόνου. Οι τιμές ακρίβειας που μπορούν να επιτύχουν αυτές οι συσκευές είναι 0.2 - 2 μοίρες ανά δευτερόλεπτο ή 12 – 120 μοίρες ανά λεπτό ώρας όμως σε λειτουργία μεγαλύτερης χρονικής περιόδου προστίθενται πολλά σφάλματα με αποτέλεσμα οι ενδείξεις να είναι λανθασμένες ως προς τον προσδιορισμό των γωνιών. Αντίθετα τα γυροσκόπια υψηλής ακρίβειας επιτυγχάνουν μετρήσεις με ακρίβεια 0.5 – 1 μοίρα ανά ώρα. Ενώ επικρατούσε η εντύπωση ότι τέτοιου είδους γυροσκόπια δεν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κινηματικές εφαρμογές αφού λόγω των μεγάλων χρονικών διαστημάτων λειτουργίας οι μετρήσεις θα ήταν λανθασμένες λόγω των σφαλμάτων, ο συνδυασμός των μετρήσεων από επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και μαγνητόμετρα διορθώνει τα αποτελέσματα προσδίδοντας ακρίβεια στις τελικές τιμές.



Εικόνα 11 Γυροσκόπιο τεχνολογίας MEMS (Πατώνης, 2012)

Στις παρακάτω εικόνες διακρίνονται ένα γυροσκόπιο MEMS το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο πάνω στην πλακέτα και μένει σταθερό στο επίπεδο της πλατφόρμας στήριξης του και ένα γυροσκόπιο τύπου Gimbal (Μηχανικό). Στο πρώτο γυροσκόπιο όλα τα δεδομένα των αισθητήρων συνδυάζονται μεταξύ τους σε ένα επίγειο σύστημα αναφοράς με ένα μαθηματικό μοντέλο συστήματος συντεταγμένων για να εξάγει τις σωστές μετρήσεις χωρίς σφάλματα, ενώ στο δεύτερο το οριζόντιο επίπεδο και ο προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων υλοποιείται με φυσικό τρόπο.



Εικόνα 12 Συνδυασμός αισθητήρων MEMS πάνω σε μία πλακέτα (Πατόνης, 2012)



Εικόνα 13 Γυροσκόπιο μηχανισμού Gimbal (Πατόνης, 2012)

Συνεπώς τα γυροσκόπια με τεχνολογία MEMS είναι αισθητήρες που αισθάνονται τον ρυθμό μεταβολής της περιστροφής γύρω από τον άξονα τους και οι μονάδες μέτρησης είναι deg/sec. [7]

3.3.1. Μέτρηση Γυροσκοπίου

Ομοίως με το αναλογικό επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο δεν εξάγει αυτόματα μετρήσεις σε deg/sec. Αφού λάβει το ερέθισμα από το περιβάλλον μετατρέπει την τιμή τάσης σε ψηφιακή μέσω του μετατροπέα ADC. Ύστερα με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση αυτή η τιμή μετατρέπεται σε μοίρες / δευτερόλεπτα.

$$RateX = \frac{\frac{adcGyroX * Vref}{1023}}{Sensitivity} - VzeroRate$$

Όπου,

AdcGyroX: Η μέτρηση που λαμβάνεται από τον ADC μετατροπέα για τον ρυθμό μεταβολής της περιστροφής γύρω από τον άξονα X.

Vref: Η τάση αναφοράς του ADC module. Βρίσκεται στις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή του αισθητήρα.

VzeroRate: Η ηλεκτρική τάση που καταγράφεται ακόμα και αν το γυροσκόπιο δεν περιστρέφεται σε κανένα άξονα.

Sensitivity: Η ευαισθησία του γυροσκοπίου. Συνήθως μετριέται σε mV/deg/sec και σημαίνει πόσα mV θα αυξηθεί η τάση αν αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής κατά deg/sec. [7]

3.4. Μαγνητόμετρο

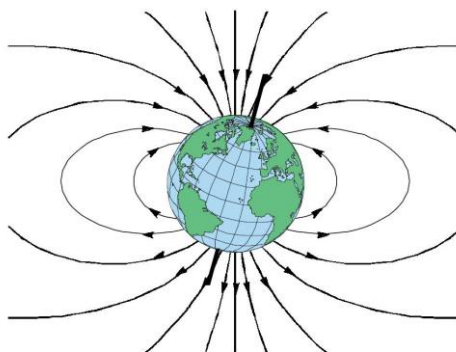
Το μαγνητόμετρο είναι ένας αισθητήρας που μετράει την ισχύ και την κατεύθυνση του τοπικού μαγνητικού πεδίου. Το τοπικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι είτε της Γης στο σημείο που βρίσκεται ο αισθητήρας είτε από γειτονικά αντικείμενα που έχουν μαγνητική ισχύ και μετριέται στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα. Επιπλέον τα σύγχρονα μαγνητόμετρα είναι σχεδιασμένα με την τεχνολογία Anisotropic Magnetoresistive (AMR) και μπορούν να υπολογίσουν την κατεύθυνση του βορρά καλύτερα από 0.1 μούρες. [7]



Εικόνα 14 Μαγνητόμετρο (Wikipedia, 2020)

3.4.1. Μαγνητικό πεδίο της Γης

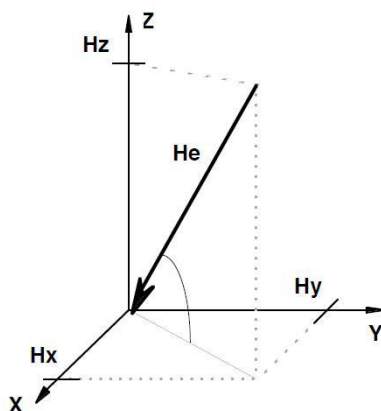
Η Γη περιβάλλεται από μαγνητικά πεδία. Αυτά λειτουργούν σαν ένα μαγνητικό δίπολο με το ένα άκρο στο βόρειο πόλο της Γης και το άλλο άκρο στο νότιο πόλο.



Εικόνα 15 Μαγνητικό πεδίο της Γης (Πατώνης, 2012)

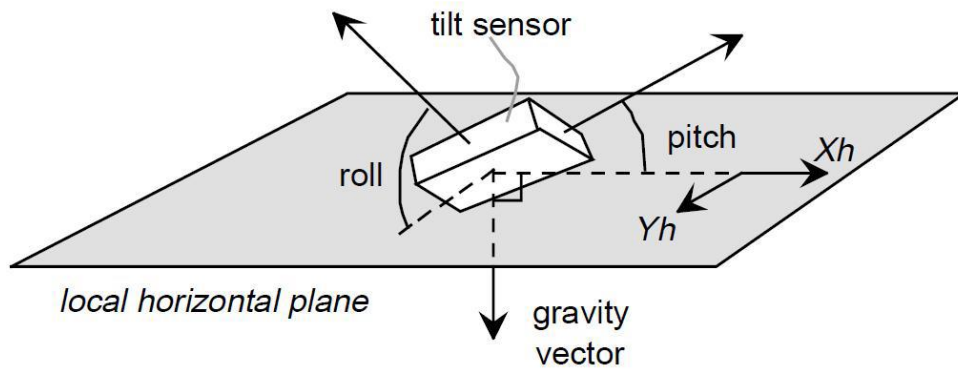
Η ισχύς του μαγνητικού πεδίου της Γης διαφέρει από σημείο σε σημείο. Για παράδειγμα στη νότια Αμερική κυμαίνεται στα 0.3 Gauss ενώ στο βόρειο Καναδά είναι στα 0.6 Gauss, ενώ ο ισημερινός είναι το σημείο στο οποίο επικρατεί η μικρότερη ένταση μαγνητικού πεδίου. Αν και το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι σταθερό σε σχέση με το χρόνο, έχει παρατηρηθεί ότι ηλεκτρικά ρεύματα από την ιονόσφαιρα μπορούν να μεταβάλλουν τις τιμές του επιφανειακού μαγνητικού πεδίου κατά μία μοίρα περίπου. Συνήθως όμως η διακύμανση της ισχύς του πεδίου είναι της τάξης 0.25 mGauss που αντιστοιχεί σε μεταβολή του επιφανειακού μαγνητικού πεδίου κατά 0.03 μοίρες. Σε φυσιολογικά πλαίσια αυτές είναι και οι τιμές που καταγράφουν τα μαγνητόμετρα τεχνολογίας MEMS. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι σχετικά σταθερό στο χρόνο. Στην παρακάτω εξίσωση φαίνεται ότι η συνισταμένη της έντασης του μαγνητικού πεδίου έχει μέτρο και κατεύθυνση προς το εσωτερικό της Γης σχηματίζοντας γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο που μεταβάλλεται ανάλογα με τη γεωγραφική θέση στην επιφάνεια της Γης.

$$|H_e| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$



Εικόνα 16 Η κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης (Πατώνης, 2012)

Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης δείχνει πάντα στον μαγνητικό βορρά. Η μαγνητική πυξίδα είναι μία συσκευή η οποία μπορεί να βρει τον μαγνητικό βορρά. Όμως αν δεν βρίσκεται παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο, για παράδειγμα αν χρησιμοποιείται σε ένα όχημα που κινείται σε ανώμαλο έδαφος ή βρίσκεται σε κάποιο αεροσκάφος τότε οι υπολογισμοί που θα εξάγει θα είναι εντελώς λανθασμένοι. Μία λύση για σωστά αποτελέσματα είναι ο συνδυασμός με επιταχυνσιόμετρα τα οποία θα υπολογίζουν το διάνυσμα της κατεύθυνσης της βαρύτητας. Στην πλοήγηση υπάρχουν κάποιες ορολογίες που αναφέρονται στις περιστροφές των αξόνων. Ο όρος roll αναφέρεται στην περιστροφή του άξονα της κίνησης προς τα εμπρός, ο όρος pitch αναφέρεται στην περιστροφή του άξονα αριστερά ή δεξιά από τον άξονα προς τα εμπρός. Για να βρεθεί η γωνία διεύθυνσης ως προς τον μαγνητικό βορρά χρειάζονται μόνο οι δύο συνιστώσες pitch και roll και αγνοείται η συνιστώσα yaw.



Εικόνα 17 Γωνίες roll και pitch ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Πατόνης, 2012)

Χρησιμοποιώντας της γωνίες roll, pitch οι τιμές της μαγνητικής πυξίδας σε κάθε άξονα (X, Y, Z) μπορούν να αναχθούν στο οριζόντιο επίπεδο μέσω των παρακάτω σχέσεων,

$$\begin{bmatrix} HzX \\ HzY \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(pitch) & \sin(roll) * \sin(pitch) - \cos(roll) * \sin(pitch) \\ 0 & \cos(roll) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Hm \\ Ym \\ Zm \end{bmatrix}$$

ή

$$HzX = X_m \cdot \cos(pitch) + Y_m \cdot \sin(roll) \cdot \sin(pitch) - Z_m \cdot \cos(roll) \cdot \sin(pitch)$$

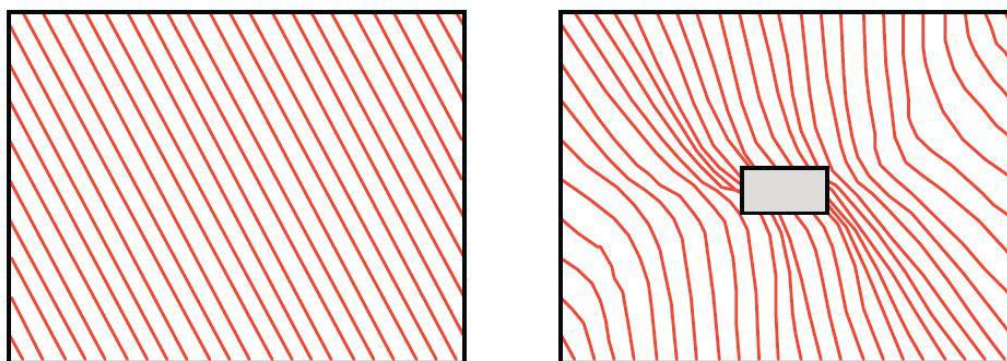
$$HzY = Y_m \cdot \cos(roll) + Z_m \cdot \sin(roll)$$

Οι εξισώσεις αυτές έχουν ισχύ μόνο αν ο άξονας Z είναι κατακόρυφος ως προς το οριζόντιο επίπεδο όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Με αυτό το τρόπο μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί το μαγνητικό αζιμούθιο από την εξίσωση [7],

$$\text{Μαγνητικό αζιμούθιο} = \tan^{-1} \left(\frac{HzY}{HzX} \right)$$

3.4.2. Παραμορφώσεις του μαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να επηρεαστεί και να παραμορφωθεί από διάφορα αντικείμενα που παράγουν μαγνητικά πεδία είτε έχουν μαγνητική ισχύ. Αυτές οι παραμορφώσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τις σκληρού σιδήρου (hard Iron) και τις μαλακού σιδήρου (soft Iron) παραμορφώσεις.

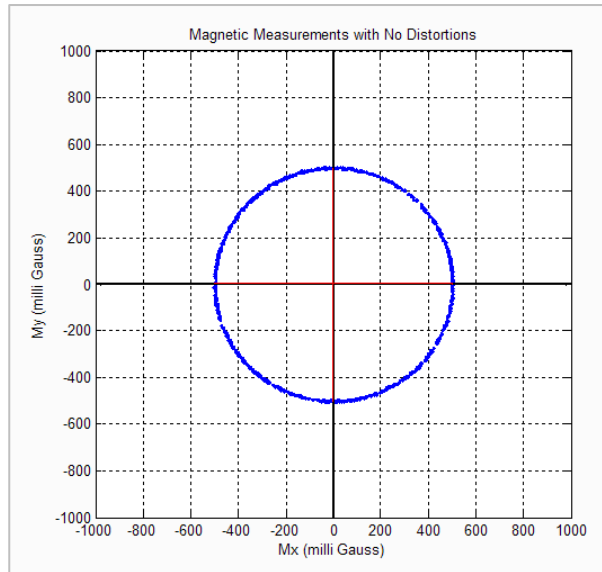


Εικόνα 18 Παραμόρφωση μαγνητικού πεδίου από αντικείμενο που εκπέμπει μαγνητικά πεδία (Πατώνης, 2012)

Οι παραμορφώσεις σκληρού σιδήρου οφείλονται σε αντικείμενα που παράγουν μαγνητικά πεδία και ονομάζονται σιδηρομαγνητικά υλικά. Για παράδειγμα ένα αντικείμενο μαγνητικού σιδήρου θα προκαλέσει παραμόρφωση με αποτέλεσμα αν βρίσκεται σε κοντινό σημείο από τον αισθητήρα οι τιμές που θα λάβει θα είναι εσφαλμένες έχοντας μόνιμα μία προσθετική σταθερά (bias) στις μετρήσεις. Ενώ οι παραμορφώσεις μαλακού σιδήρου οφείλονται σε υλικά που κατά το πέρασμά τους θα στρεβλώσουν το μαγνητικό πεδίο σε σχέση με τον αισθητήρα. Τέτοιου είδους επηρεασμοί στο μαγνητικό πεδίο οφείλονται σε υλικά όπως το νικέλιο ή το σίδηρο που θεωρούνται παραμαγνητικά υλικά.

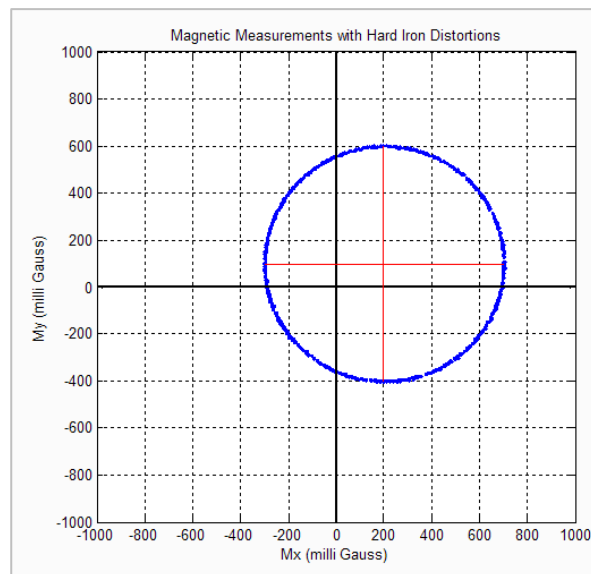
Για να γίνουν καλύτερα κατανοητές από τον άνθρωπο αυτές οι παραμορφώσεις του μαγνητικού πεδίου πρέπει να οπτικοποιηθούν σε κάποιο γράφημα ώστε να βοηθήσει στην διόρθωση των μετρήσεων των μαγνητόμετρων. Στα παρακάτω γραφήματα φαίνονται οι μετρήσεις του μαγνητόμετρου σε στιγμές παραμόρφωσης και μη. Οι μετρήσεις λαμβάνονται από το μαγνητόμετρο όταν η συσκευή περιστρέφεται γύρω από τον άξονα Z.

Στο πρώτο γράφημα παρατηρείται ένας κύκλος που έχει κέντρο τους άξονες $X=0$, $Y=0$ και η ακτίνα του ισούται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Αυτό είναι το ιδανικό σενάριο που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία παραμόρφωση στις μετρήσεις.



Εικόνα 19 Μετρήσεις μαγνητόμετρου χωρίς παραμορφώσεις (Πατώνης, 2012)

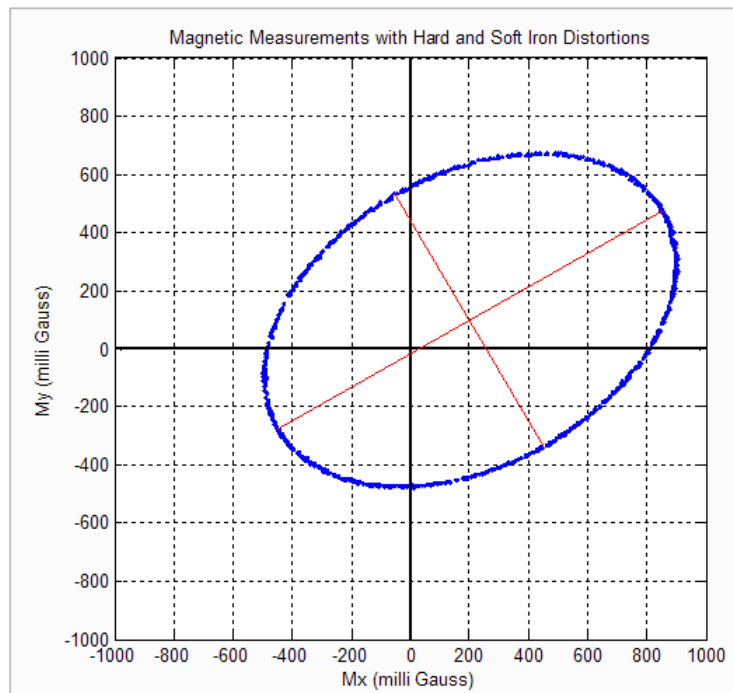
Στο επόμενο γράφημα παρατηρείται μία μέτρηση μαγνητόμετρου που επηρεάζεται από παραμόρφωση σκληρού σιδήρου. Το κέντρο του κύκλου βρίσκεται μακριά από το μηδέν αφού έχει λάβει εσφαλμένες τιμές. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το $X=200$ και το $Y=100$ αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μία προσθετική σταθερά 200 mGauss και 100 mGauss στον X και στον Y άξονα αντίστοιχα.



Εικόνα 20 παραμόρφωση σκληρού σιδήρου (Πατώνης, 2012)

Ενώ στο τελευταίο γράφημα παρατηρούνται παραμορφώσεις σκληρού και μαλακού σιδήρου ταυτόχρονα. Οι παραμορφώσεις soft iron είναι εύκολο να βρεθούν αφού στην οπτικοποίηση του γραφήματος δημιουργούν ελλείψεις λόγω της στρέβλωσης του μαγνητικού πεδίου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το κέντρο της έλλειψης είναι $X=200$ mGauss και $Y=100$ mGauss

δεδομένου ότι υπάρχει και η παραμόρφωση σκληρού σιδήρου [7].



Εικόνα 21 Παραμόρφωση σκληρού και μαλακού σιδήρου ταυτόχρονα (Πατώνης, 2012)

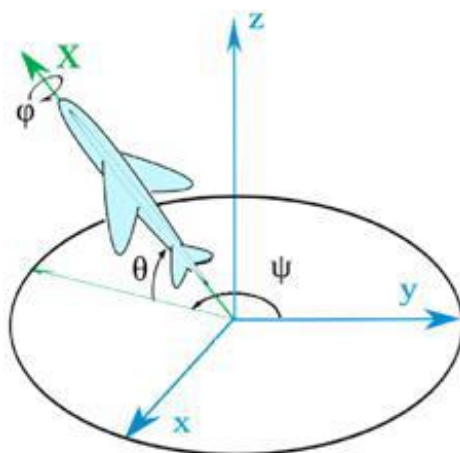
Κεφάλαιο 4^ο

4. Προσδιορισμός Προσανατολισμού

Για να προσδιοριστεί ο προσανατολισμός ενός άκαμπτου αντικειμένου χρειάζονται τουλάχιστον τρεις παράμετροι στον Ευκλείδειο χώρο. Οι βασικές μεθοδολογίες υπολογισμού του προσανατολισμού είναι οι γωνίες Euler, γωνίες Cardan, γωνίες κλίσης, ο πίνακας στροφής (Direction Cosine Matrix – DCM) και τα quaternions. [7]

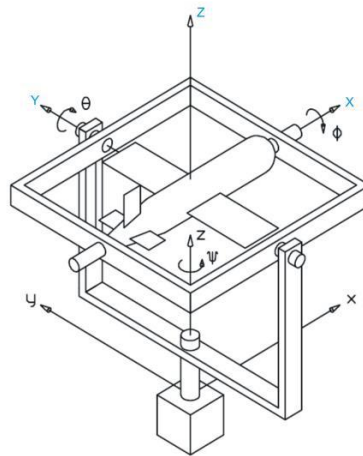
4.1. Γωνίες Euler

Στο τρισδιάστατο χώρο, ο προσανατολισμός ενός αντικειμένου μπορεί να βρεθεί με την περιστροφή του αντικειμένου γύρω από κάθε άξονα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να επιτευχθεί μέσω των γωνιών Euler – Cardan. Οι γωνίες Euler πήραν το όνομα τους από τον Leonhard Euler που περιέγραψε τον προσανατολισμό ενός άκαμπτου σώματος στις τρεις διαστάσεις. Ενώ οι γωνίες Cardan ονομάστηκαν έτσι από τον Gerolamo Cardano. Και οι δύο μέθοδοι είναι πανομοιότυποι και για αυτό το λόγο μερικές φορές χρησιμοποιείται ο όρος γωνίες Euler και για τις δύο. Οι γωνίες πλοήγησης προσδιορίζουν τον προσανατολισμό ενός συστήματος συντεταγμένων σε σχέση με το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς. Οι γωνίες ονομάζονται Heading ή Yaw, Roll και Pitch και η μαθηματική τους ορολογία είναι ψ , ϕ και θ αντίστοιχα.



Εικόνα 22 Γωνίες περιστροφής Yaw, Roll, Pitch (Πατώνης, 2012)

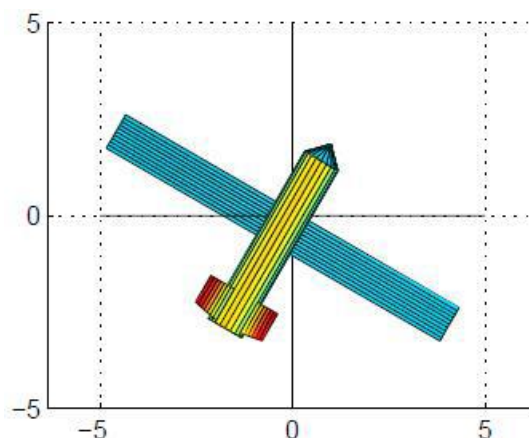
Ένα μεγάλο μειονέκτημα των γωνιών Euler είναι η αδυναμία λύσης στην περίπτωση που η γωνία περιστροφής Pitch ευθυγραμμιστεί παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα του επίγειου συστήματος αναφοράς δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο Gimbal Lock.



Εικόνα 23 Γωνίες περιστροφής γυροσκοπίου τύπου Gimbal (Πατώνης, 2012)

Αναλυτικά οι γωνίες περιστροφής είναι οι εξής,

Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z: Η περιστροφή γύρω από τον άξονα Z είναι η γωνία που σχηματίζει από τον Y άξονα που συνήθως είναι ο βορράς του επίγειου συστήματος αναφοράς με τον X άξονα που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση της κίνησης, στο σύστημα συντεταγμένων του σώματος.

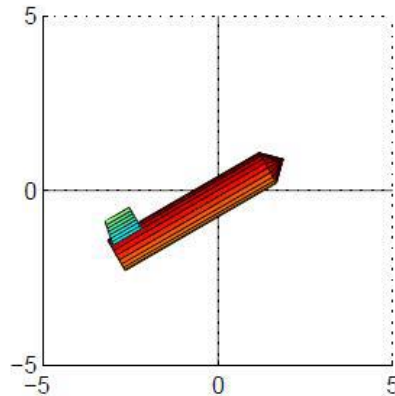


Εικόνα 24 Περιστροφή γύρω από τον άξονα Z (Yaw) (Πατώνης, 2012)

Ενώ μαθηματικά η περιστροφή μπορεί να περιγραφεί:

$$R_3(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Περιστροφή γύρω από τον άξονα Y: Η περιστροφή γύρω από τον άξονα Y του αδρανειακού σώματος είναι η γωνία που σχηματίζει ο X άξονας των συντεταγμένων του σώματος με τον X άξονα του συστήματος αναφοράς (οριζόντιο επίπεδο).

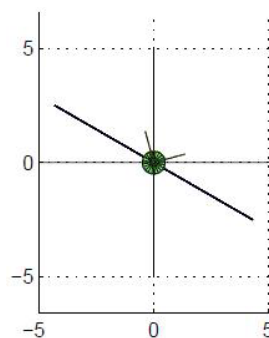


Εικόνα 25 Γωνία γύρω από τον άξονα Y (Pitch) (Πατώνης, 2012)

Ενώ μαθηματικά η περιστροφή μπορεί να περιγραφεί:

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Περιστροφή γύρω από τον άξονα X: Η περιστροφή γύρω από τον X άξονα είναι η γωνία που σχηματίζεται από το οριζόντιο επίπεδο του επίγειου συστήματος αναφοράς με τον άξονα Y του συστήματος συντεταγμένων της αδρανειακής μονάδας.



Εικόνα 26 Περιστροφή γύρω από τον άξονα X (Roll) (Πατώνης, 2012)

Ενώ μαθηματικά η περιστροφή μπορεί να περιγραφεί [7]:

$$R_1(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

4.2. Quaternions

Τα Quaternions ή αλλιώς τετραδόνια είναι άλλη μία μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση τρισδιάστατων περιστροφών. Επιπλέον μέσω των quaternions μπορούν να βρεθούν ενδιάμεσες θέσεις κατά την περιστροφή ενός σώματος. Η μαθηματική ορολογία του quaternion είναι το q και αποτελείται από τέσσερις πραγματικούς αριθμούς όπου το s ονομάζεται βαθμωτό μέρος του q και τα x, y, z είναι διανύσματα που καλούνται και διανυσματικό μέρος του q .

$$q = (s, x, y, z)$$

$$q = (s, v) \text{ όπου } v = (x, y, z)$$

Τα Quaternions είναι μία επέκταση των μιγαδικών αριθμών στις τέσσερις διαστάσεις και χρησιμοποιούν τις φανταστικές μονάδες I, j, k όπου,

$$i^2 = j^2 = k^2$$

$$ij = k \quad jk = i \quad ki = j$$

$$ji = -k \quad jk = -i \quad ki = -j$$

Το quaternion q ορίζεται ως,

$$q = s + xi + yj + zk$$

Μέσω της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να γίνει ο πολλαπλασιασμός μεταξύ δύο quaternions.

Έτσι αν έχουμε $q_1 = (s_1, x_1, y_1, z_1)$ και $q_2 = (s_2, x_2, y_2, z_2)$ το γινόμενο τους είναι:

$$q_1 q_2 = (s_1 s_2 - x_1 x_2 - y_1 y_2 - z_1 z_2) + (s_1 x_2 - s_2 x_1 - y_1 z_2 - y_2 z_1) i \\ + (s_1 y_2 - s_2 y_1 + z_1 x_2 - z_2 x_1) j + (s_1 z_2 + s_2 z_1 + x_1 y_2 - x_2 y_1) k$$

Ένας πραγματικός αριθμός αντιστοιχεί στο quaternion $(u, 0)$ και ένα διάνυσμα στο $(0, v)$. Για να εκφραστεί μία περιστροφή κατά γωνία θ γύρω από κάποιο άξονα που διέρχεται από την αρχή του συστήματος των συντεταγμένων και η διεύθυνση του ορίζεται από ένα μοναδιαίο διάνυσμα n θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω τύπος όπου το μέτρο του είναι ίσο με την μονάδα.

$$q = \left(\cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} n \right)$$

Ενώ για να υπολογιστεί το μέτρο ενός quaternion χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$\sqrt{s^2 + x^2 + y^2 + z^2}$$

Αν υποτεθεί ότι πρέπει να εκφραστεί μία περιστροφή σε κάποια κορυφή (x, y, z) τότε,

$$p = (0, x, y, z)$$

Και στις παρακάτω εξισώσεις προκύπτει το περιστραμμένο σημείο p' (1) και το \bar{q} το συζυγές quaternion (2),

$$p_1 = qp\bar{q}$$

$$\bar{q} = (s, -v)$$

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των Quaternions είναι ότι μπορεί να γίνει πολλαπλασιασμός δύο η περισσότερων περιστροφών εκφρασμένων πάντα σε quaternions και το αποτέλεσμα του γινομένου θα είναι η συνδυασμένη περιστροφή. Ο συνδυασμός των περιστροφών είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα και βρίσκει εφαρμογή σε σύνθετες κινήσεις των σωμάτων στο περιβάλλον αφού μπορούν να παρατηρηθούν πολλές και διαφορετικές περιστροφές. Επιπλέον περιστροφές που βρίσκονται μέσω των μεθόδων Euler ή DCM μπορούν πολύ εύκολα να εκφραστούν σε quaternions και το αντίθετο. Τέλος, τα τετραδόνια θεωρούνται η καταλληλότερη μέθοδος εύρεσης των περιστροφών όμως η απευθείας ανάθεση τιμών περιστροφής σε μορφή quaternion δεν είναι εύκολη. Για αυτό το λόγο οι περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν τρισδιάστατες περιστροφές επιτρέπουν στους χρήστες να ορίζουν τις περιστροφές των αντικειμένων σε γωνίες Euler και το ίδιο το σύστημα τις μετατρέπει σε quaternions. [8]

4.3. Πίνακας στροφής

Ένα μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να περιγράψει την στροφή ενός συστήματος συντεταγμένων είναι ο πίνακας στροφής ή αλλιώς Direction Cosine Matrix (DCM). Το μοντέλο

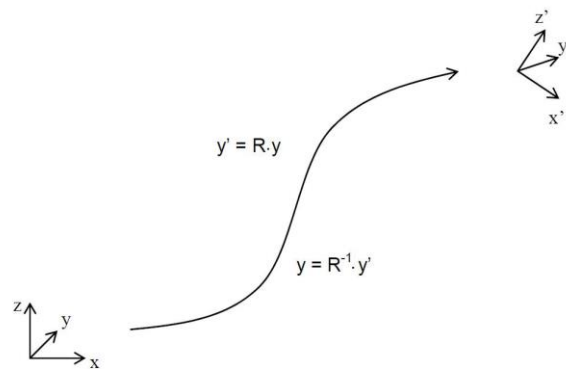
αυτό με απλά λόγια μας δείχνει την μετάβαση από την αρχική θέση των διανυσμάτων βάσης στη νέα θέση με την βοήθεια τριών περιστροφών γύρω από τους άξονες x, y, z σχηματίζοντας γωνίες φ, θ, ψ αντίστοιχα. Οι περιστροφές περιγράφονται από τους ορθογώνιους πίνακες στροφής $R_1(\varphi)$, $R_2(\theta)$ και $R_3(\psi)$. Η μαθηματική ανάλυση του συνολικού πίνακα θα είναι:

$$R = R_1(\varphi) * R_2(\theta) * R_3(\psi)$$

ή αναλυτικά

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ένα διάνυσμα για να μετασχηματιστεί από το ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο θα ισχύει $y' = R \cdot y$ και αντίστροφα $y = R^{-1} \cdot y'$, ενώ ισχύει η ιδιότητα ότι $R^{-1} = R^T$.



Εικόνα 27 Μετασχηματισμός διανύσματος από το ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο (Πατόνης, 2012)

Αν υποθεθεί ότι $DCM = R^{-1} = R^T$ σε ένα παράδειγμα τότε, ο πίνακας στροφής θα έχει την γενική μορφή

$$DCM = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

Και μπορεί να διατυπωθεί αναλυτικά,

$$DCM = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\varphi \sin\theta \cos\psi - \cos\varphi \sin\psi & \cos\varphi \sin\theta \cos\psi + \sin\varphi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\varphi \sin\theta \sin\psi - \cos\varphi \cos\psi & \cos\varphi \sin\theta \sin\psi - \sin\varphi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\varphi \cos\theta & \cos\varphi \cos\theta \end{bmatrix}$$

Κατά αυτό το τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι γωνίες περιστροφής σύμφωνα με τις εξισώσεις [7]:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{R_{32}}{R_{33}}$$

$$\theta = \sin^{-1}(-R_{31}) = \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{R_{31}}{\sqrt{R_{32}^2 + R_{33}^2}} \right)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{R_{21}}{R_{11}}$$

Κεφάλαιο 5^ο

5. Αδρανειακή Μονάδα Μέτρησης (IMU)

Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που αποτελείται από ένα σύνολο αισθητήρων όπως επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και μαγνητόμετρα και χρησιμοποιείται για να υπολογίσει επιταχύνσεις στους τρεις άξονες, τον ρυθμό μεταβολής των γωνιών στους 3 άξονες ή αλλιώς τον προσανατολισμό και την μαγνητική ισχύ στο εκάστοτε τοπικό γεωγραφικό σημείο που βρίσκεται το IMU. Ο συνδυασμός των παραπάνω αισθητήρων εξάγει ακριβή αποτελέσματα και μετρήσεις σε σχέση με το αν λειτουργούσε μεμονωμένα κάποιος από αυτούς τους αισθητήρες. Αυτές οι διατάξεις είναι χαμηλού κόστους, παράγονται μαζικά και βασίζονται στην τεχνολογία MEMS. [7]

5.1. Gravity BNO055 + BMP280 Intelligent 10DOF AHRS

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο IMU SEN0253 Gravity BNO055 + BMP280 Intelligent 10DOF AHRS της εταιρείας DFrobot. Η DFrobot είναι μία εταιρεία πάροχος υλικού ρομποτικής και ανοιχτού κώδικα που σχεδιάζει και κατασκευάζει καινοτόμα και φιλικά προς τον χρήστη προϊόντα που γίνονται δομικά στοιχεία σε πολλά είδη ηλεκτρονικών projects. Ιδρύθηκε το 2008 με γραφεία σε πολλές χώρες της Ασίας και η έδρα της βρίσκεται στην Σανγκάη. Το IMU SEN0253 αποτελείται από δύο βασικά τσιπ, το BNO055 και το BMP280 τα οποία κατασκευάζονται από την πολυεθνική εταιρεία Bosch που εδρεύει στην Γερμανία. Το τσιπ BMP280 περιέχει ένα αισθητήρα βαρομετρικής πίεσης και είναι σχεδιασμένος ειδικά για κινητές εφαρμογές ο οποίος μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις βαρομετρικής πίεσης και θερμοκρασίας, ενώ το BNO055 είναι ένα τσιπ 9DOF, δηλαδή περιέχει 9 βαθμούς ελευθερίας. Περιέχει ένα 3-αξονικό επιταχυνσιόμετρο 14 bit, ένα 3-αξονικό γυροσκόπιο 16 bit, ένα 3 αξονικό μαγνητόμετρο 16 bit και έναν μικροελεγκτή 32 bit. Για τις ανάγκες του project χρησιμοποιήθηκε μόνο το τσιπ BNO055 και καθόλου το τσιπ BMP280, για αυτό το λόγο παρακάτω θα γίνει εκτενής παρουσίαση του IMU bno055. [9]



Εικόνα 28 gravity BNO055 + BMP280 10DOF AHRS (DFrobot, wiki.dfrobot.com)

5.2. IMU BNO055

Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης BNO055 είναι ένα τσιπ που ενσωματώνει τρεις αισθητήρες μαζί, επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο και μαγνητόμετρο. Μέσω κατάλληλων υπολογισμών και αλγορίθμων που εκτελούνται στον MCU μπορεί να μας δώσει στην έξοδο δεδομένα από επιτάχυνση, γραμμική επιτάχυνση, βαρύτητα, γωνιακή ταχύτητα, ισχύς μαγνητικών πεδίων, γωνίες euler, τετραδόνια όλα σε 3-αξονικό σύστημα συντεταγμένων. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι,

Επιταχυνσιόμετρο

- Acceleration ranges: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
- Triaxial 14 bit accelerometer
- Low pass filter bandwidths από 1kHz έως 8Hz
- Operation modes: normal, Suspend, Low power, Standby, Deep suspend
- Interrupt controller
- Σειριακά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων I2C, SPI, UART

Γυροσκόπιο

- Range από $\pm 125^\circ/s \sim 2000^\circ/s$
- Triaxial 16 bit gyroscope
- Low pass filter bandwidths 523 Hz – 12 Hz

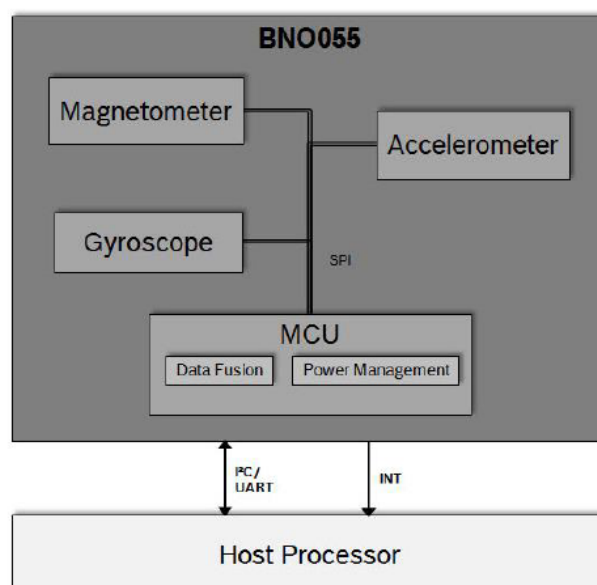
- Operation modes: normal, fast power up, deep suspend, advanced power save
- Interrupt controller
- Σειριακά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων I2C, SPI, UART

Μαγνητόμετρο

- Magnetic field range $\pm 1300\mu\text{T}$ (x-,y-axis), $\pm 2500\mu\text{T}$ (z-axis)
- Triaxial geomagnetic sensor
- Ανάλυση μαγνητικού πεδίου $\sim 0.3 \mu\text{T}$
- Operating modes: low power, regular, enhanced regular, high accuracy
- Power modes: normal, sleep, suspend, force
- Σειριακά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων I2C, SPI, UART

Block Diagram bno055

Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται η αρχιτεκτονική του τσιπ bno055. Τα αισθητήρια μεταφέρουν τις τιμές μέσω του SPI διαύλου στον μικροελεγκτή. Στο data fusion γίνονται οι υπολογισμοί και οι κατάλληλοι αλγόριθμοι για να μετατραπούν τα δεδομένα στην κατηγορία που επιθυμούμε (πχ. Γραμμική επιτάχυνση) και μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου I2C στον host processor.



Εικόνα 29 Αρχιτεκτονική BNO055 . (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).

Power Modes

Στο τσιπ υπάρχουν 3 διαφορετικά power modes για την εξοικονόμηση της ενεργειακής κατανάλωσης και μπορούν να επιλεγθούν μέσω software. Αυτά είναι Normal mode, Low power mode, Suspend mode.

Normal mode: Σε αυτή τη λειτουργία οι αισθητήρες βρίσκονται ενεργοποιημένοι ενώ και το register map και όλα τα περιφερειακά του μικροελεγκτή βρίσκονται πάντα σε λειτουργία.

Low power mode: Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κίνηση για 5 δευτερόλεπτα (default value) το σύστημα μας μπαίνει σε κατάσταση low power mode. Σε αυτό το mode παραμένει ενεργοποιημένο μόνο το επιταχυνσιόμετρο και σε περίπτωση που αισθανθεί κίνηση στέλνει ένα σήμα interrupt στον μικροελεγκτή για να ξυπνήσει όλο το σύστημα και να μπει σε normal mode.

Suspend mode: Σε αυτή τη λειτουργία το σύστημα μας μπαίνει σε κατάσταση ύπνου. Οι αισθητήρες σταματάνε να λειτουργούν και το register map δεν ενημερώνεται με νέες τιμές. Για να απενεργοποιηθεί αυτό το mode πρέπει να ενεργοποιηθεί ο καταχωρητής PWR_MODE register.

Για τις ανάγκες της εργασίας έχει επιλεγθεί το normal mode διότι η τροφοδοσία του συστήματος μας δεν γίνεται μέσω μπαταρίας για να υπάρχει ο κίνδυνος εξασθένησης της ενέργειας της, αλλά με καλώδιο usb.

Operation Modes

Στο Operation mode υπάρχουν τρεις βασικές λειτουργίες. Το config mode, το non fusion mode και το fusion mode. Πιο συγκεκριμένα στο config mode το σύστημα μας μπαίνει σε κατάσταση αρχικοποίησης όπου εκεί ρυθμίζουμε τις παραμέτρους κάθε αισθητήρα. Στην κατηγορία Non fusion modes γίνεται επιλογή κάποιου συγκεκριμένου ή συγκεκριμένων αισθητήρων για να πάρουμε μετρήσεις. (πχ στη λειτουργία MAGGYRO λαμβάνουμε σήμα μόνο από γυροσκόπιο και μαγνητόμετρο). Ενώ στην κατηγορία fusion modes που είναι και η σημαντικότερη λαμβάνουμε δεδομένα από δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ενεργοποιείται το περιφερειακό fusion data που εκτελεί τους υπολογισμούς των αισθητήρων για να λάβουμε τιμές προσανατολισμού (πχ. Γωνίες euler, quaternions) είτε στο τοπικό σύστημα αναφοράς του αισθητήρα είτε στο απόλυτο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Operating Mode		Available sensor signals			Fusion Data	
		Accel	Mag	Gyro	Relative orientation	Absolute orientation
	CONFIGMODE	-	-	-	-	-
Non-fusion modes	ACCONLY	X	-	-	-	-
	MAGONLY	-	X	-	-	-
	GYROONLY	-	-	X	-	-
	ACCMAG	X	X	-	-	-
	ACCGYRO	X	-	X	-	-
	MAGGYRO	-	X	X	-	-
	AMG	X	X	X	-	-
Fusion modes	IMU	X	-	X	X	-
	COMPASS	X	X	-	-	X
	M4G	X	X	-	X	-
	NDOF_FMC_OFF	X	X	X	-	X
	NDOF	X	X	X	-	X

Εικόνα 30 λειτουργίες Operating Mode (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).

Σε περίπτωση που δεν επιλεγεί κάποιο mode μετά την παραμετροποίηση του power mode, μπαίνει by default σε Config Mode το οποίο μας δίνει συγκεκριμένες ρυθμίσεις για τους αισθητήρες. Αυτές είναι ακρίβεια 4G και επιλογή ενός low pass filter στα 62.5 Hz, 10 Hz bandwidth για το μαγνητόμετρο και για το γυροσκόπιο ακρίβεια 2000 dps και ένα low pass filter στα 32 Hz.

Sensor	Range	Bandwidth
Accelerometer	4G	62.5 Hz
Magnetometer	NA	10 Hz
Gyroscope	2000 dps	32 Hz

Εικόνα 31 default settings (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).

Για τις ανάγκες της εργασίας το σύστημα μας λειτουργεί σε fusion mode και πιο συγκεκριμένα με την παράμετρο NDOF. Το NDOF ενεργοποιεί και τους 9 βαθμούς ελευθερίας που σημαίνει ότι παίρνει μετρήσεις και από τους τρεις αισθητήρες για κάθε άξονα ενώ μέσω του fusion data μας παρέχει τιμές από γωνίες euler, quaternions στο σύστημα αναφοράς του imu είτε στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς. Επιπλέον παρέχει ακρίβεια στις μετρήσεις, καλύτερη βαθμονόμηση τιμών και μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου IMU είναι ότι μπορεί να μας δώσει στην έξοδο δεδομένα με τις μονάδες μέτρησης που επιθυμούμε χωρίς να χρειαστεί η μετατροπή των δεδομένων αυτών από τον χρήστη. Για το επιταχυνσιόμετρο μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε m/s^2 και mg . Για το γυροσκόπιο dps ή Rps (rad per sec), για την θερμοκρασία βαθμούς κελσίου ή $farad$, για το μαγνητόμετρο οι μονάδες μέτρησης που υποστηρίζει είναι σε μT ενώ για τις γωνίες euler μπορούμε να λάβουμε τιμές σε μοίρες ή σε rad .

Data	Units	[Reg Addr]: Register Value
Acceleration, Linear Acceleration, Gravity vector	m/s^2	[UNIT_SEL] : xxxxxxx0b
	mg	[UNIT_SEL] : xxxxxxx1b
Magnetic Field Strength	Micro Tesla	NA
Angular Rate	Dps	[UNIT_SEL] : xxxxxx0xb
	Rps	[UNIT_SEL] : xxxxxx1xb
Euler Angles	Degrees	[UNIT_SEL] : xxxxx0xxb
	Radians	[UNIT_SEL] : xxxxx1xxb
Quaternion	Quaternion units	NA
Temperature	$^{\circ}C$	[UNIT_SEL] : xxx0xxxxb
	$^{\circ}F$	[UNIT_SEL] : xxx1xxxxb

Εικόνα 32 Μονάδες μέτρησης των sensors (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).

Για τις γωνίες Euler οι περιστροφές που μπορούν να γίνουν από το τσιπ είναι -180 έως 180 μοίρες για την περιστροφή Pitch, -90 έως 90 μοίρες για την περιστροφή Roll και για την Heading ή Yaw από 0 έως 360 μοίρες, δηλαδή ένας πλήρης κύκλος.

Rotation angle	Range (Android format)	Range (Windows format)
Pitch	$+180^{\circ}$ to -180° (turning clockwise decreases values)	-180° to $+180^{\circ}$ (turning clockwise increases values)
Roll	-90° to $+90^{\circ}$ (increasing with increasing inclination)	
Heading / Yaw	0° to 360° (turning clockwise increases values)	

Εικόνα 33 συμβάσεις περιστροφών γωνιών (Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14 (2016)).

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας ρυθμίσαμε και προγραμματίσαμε το IMU με τον κατάλληλο τρόπο ώστε να πάρουμε τις ακριβέστερες μετρήσεις από τους αισθητήρες αλλά και να έχουμε σωστά και έγκυρα αποτελέσματα για τον προσανατολισμό.

Για το επιταχυνσιόμετρο ορίστηκε η ευαισθησία στα $2g$ για να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερο offset και ενεργοποιήσαμε ένα low pass filter στα 31.25 Hz αφού η ανθρώπινη βάδιση κυμαίνεται περίπου στα $20-40$ Hz. Η συχνότητα δειγματοληψίας του

επιταχυνσιόμετρου είναι στα 100 Hz ενώ οι μονάδες μέτρησης που ορίσαμε να λαμβάνουμε είναι σε mg.

Για το γυροσκόπιο ορίστηκε η ευαισθησία στα 125 dps με το ίδιο low pass filter στα 31.25Hz ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας του αισθητήρα είναι στα 100 Hz. Οι μονάδες μέτρησης που ορίσαμε να λαμβάνουμε για τα δεδομένα μας είναι σε dps.

Για το μαγνητόμετρο η δειγματοληψία ορίστηκε στα 30 Hz (η μέγιστη συχνότητα που μας δίνει ο κατασκευαστής) και οι μονάδες μέτρησης των δεδομένων που λαμβάνουμε είναι σε μT . [10]

5.3. Kalman filter

Το Kalman filter είναι ένας αλγόριθμος που εξαλείφει τον θόρυβο σε ένα σήμα δεδομένων. Δημιουργός του φίλτρου ήταν ο Rudolph Kalman όπου δημοσίευσε την εργασία του το 1960. Αρχικά είχε ασχοληθεί με αυτό το φίλτρο και ο Peter Swerling ωστόσο η ολοκληρωμένη και πιο γενικευμένη δουλειά του Kalman και η δημοσίευση του σε ένα πιο έγκυρο επιστημονικό περιοδικό τον κατέστησε ως τον δημιουργό του Kalman filter. Ο αλγόριθμος αυτός έχει πολλές χρήσεις και βρίσκει εφαρμογή σε μετρήσεις από πληθώρα αισθητήρων που περιλαμβάνουν θόρυβο. Αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις που παρέχουν ένα περιοδικό επαναλαμβανόμενο υπολογιστικό μέσον για την εκτίμηση της κατάστασης (state) μιας διαδικασίας ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Με απλά λόγια φιλτράρεται ο θόρυβος και παραμένει το χρήσιμο σήμα. Το Kalman filter έχει πολλές δυνατότητες, μπορεί να εκτιμά τις καταστάσεις του παρελθόντος, του παρόντος και του μέλλοντος και να λειτουργεί ακόμα και αν δεν είναι ακριβής η φύση του συστήματος που μοντελοποιείται. Επιπλέον μπορεί να αξιολογεί στατιστικά τα αποτελέσματα που εξάγει το φίλτρο που αφορά στην ποιότητα των αποτελεσμάτων. Η αξιοπιστία και οι δυνατότητες του το καθιστούν ως ένα εξαιρετικό φίλτρο και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όπως πλοήγηση, δορυφόρους, πυραυλικά συστήματα, αεροσκάφη, δημογραφική μοντελοποίηση, εντοπισμός υπόγειας ραδιενέργειας και πολλές ακόμη. [7]

5.4. Moving Average Filter

Το φίλτρο κινούμενο μέσου ή αλλιώς κυλιόμενου μέσου όπως το αποκαλούνε είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα εργαλεία για την εξομάλυνση των δεδομένων και την μείωση του θορύβου στο σήμα. Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή ως φίλτρο πεπερασμένης απόκρισης (FIR) και εφαρμόζεται σε ένα σύνολο σημείων δεδομένων δημιουργώντας ένα μέσο όρο διαφορετικών

υποομάδων του γενικού συνόλου δεδομένων.

$$x(n) = \frac{x(n-2) + x(n-1) + x(n) + x(n+1) + x(n+2)}{5}$$

Όπου $x(n)$ είναι το αρχικό σήμα.

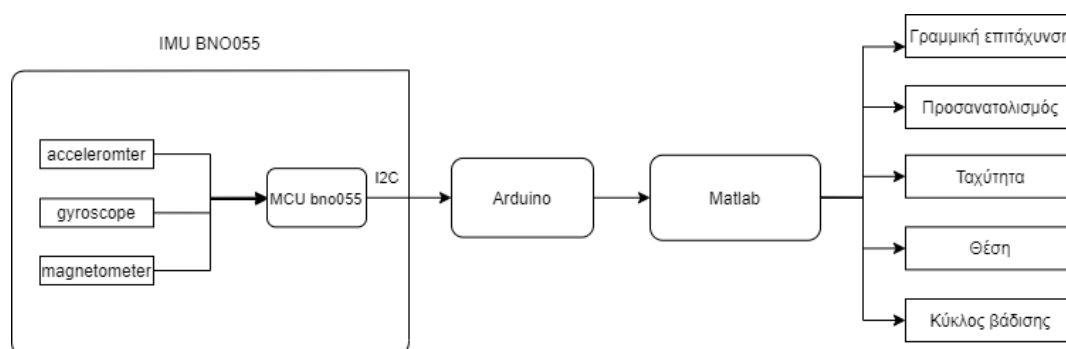
Το Moving Average Filter περιέχει υποκατηγορίες φίλτρων τα οποία επιλέγονται ανάλογα την εφαρμογή. Αυτά είναι ο απλός κινητός μέσος όρος (SMA), ο αθροιστικός κινητός μέσος όρος (CMA), ο σταθμισμένος κυλιόμενος μέσος όρος και ο εκθετικός κινητός μέσος όρος (EMA).

[11]

Κεφάλαιο 6^ο

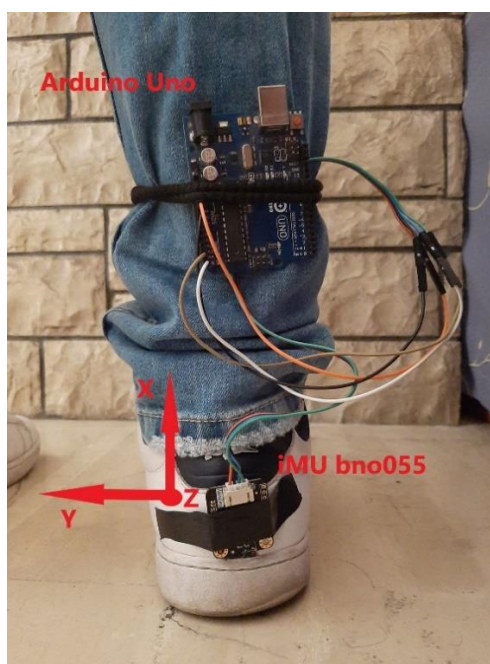
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στο block diagram φαίνονται τα τμήματα και η λειτουργία του συστήματος που υλοποιήσαμε για την πειραματική διαδικασία της καταγραφής της βάδισης.



Εικόνα 34 Block Diagram του συστήματος

Ενώ το σύστημα μας ενσωματώθηκε στο πόδι του βαδιστή και η αδρανειακή μονάδα μέτρησης τοποθετήθηκε στην φτέρνα του παπουτσιού.



Εικόνα 35 Σύστημα ενσωματωμένο στο βαδιστή

6.1. Βιβλιοθήκες

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας είναι από το σύστημα συλλογής των δεδομένων, δηλαδή από τη πλατφόρμα Arduino. Αυτές είναι:

DFRobot_BNO055.h

Η βιβλιοθήκη αυτή έχει αναπτυχθεί από την DFrobot για το IMU bno055. Η χρήση αυτής της βιβλιοθήκης είναι πολύ σημαντική διότι συνδυάζει όλες τις λειτουργίες των αισθητήρων, του data fusion και του μικροελεγκτή που υπάρχει μέσα στο τσιπ σε έτοιμες και κατανοητές συναρτήσεις για την διευκόλυνση του χρήστη. Μέσω αυτής απλοποιείται σε σημαντικό βαθμό ο κώδικας του συστήματος.

Wire.h

Αυτή η βιβλιοθήκη επιτρέπει την σειριακή επικοινωνία και μετάδοση δεδομένων με συσκευές που διαθέτουν το πρωτόκολλο I2C. Η επικοινωνία γίνεται μέσω των διαύλων SDA και SCL. Στο παρόν πρότζεκτ χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά των δεδομένων των αισθητήρων του IMU προς την ηλεκτρονική πλατφόρμα Arduino. [9], [13]

6.2. Βασικές Συναρτήσεις

Κάποιες βασικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό του imu μέσω της πλατφόρμας Arduino IDE είναι:

setPowerMode ()

Μέσω αυτής της συνάρτησης ορίζουμε την λειτουργία του IMU. Για τις ανάγκες της εργασίας έχει οριστεί ως normal mode που σημαίνει ότι όλοι οι αισθητήρες, τα περιφερειακά και ο μικροελεγκτής του τσιπ bno055 είναι ενεργοποιημένα και έτοιμα προς χρήση.

setOprMode ()

Η συνάρτηση setOprMode () είναι πολύ βασική για την λειτουργία του συστήματος μας. Αρχικά το σύστημα μας αρχικοποιείται σε configuration mode και αφού παραμετροποιήσουμε τους αισθητήρες, ορίζουμε το mode σε N dof.

setRange ()

Σε αυτή τη συνάρτηση γίνεται η αρχικοποίηση της ακρίβειας του κάθε αισθητήρα. Για παράδειγμα στο επιταχυνσιόμετρο η ευαισθησία είναι 2G.

setBandWidth ()

Αυτή η συνάρτηση λειτουργεί για το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο. Ενεργοποιεί το low pass filter για το κάθε αισθητήρα.

setAxisOffset ()

Αυτή η συνάρτηση λειτουργεί στην αρχικοποίηση του συστήματος και χρησιμοποιείται για να πάρει τα offset από κάθε μέτρηση σε κάθε άξονα για το imu. Χρησιμοποιείται πάντα πριν οριστεί το operation mode αλλιώς οι τιμές των μετρήσεων θα είναι εσφαλμένες περιέχοντας μέσα και τα offset.

getAxis ()

Αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιείται στον ατέρμων βρόχο και λαμβάνει τις υπολογισμένες - επεξεργασμένες μετρήσεις από τους καταχωρητές του τσιπ.

Millis ()

Αυτή η συνάρτηση επιστρέφει χρονικές μετρήσεις σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Χρησιμοποιείται στο σύστημα μας σαν χρονόμετρο για να γνωρίζουμε την χρονική διάρκεια που πήρε την κάθε μέτρηση του imu.

Κάποιες σημαντικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό Matlab είναι:

Movingaveragesmooth2 (accel, order)

Μέσω αυτής της συνάρτησης πραγματοποιείται το φιλτράρισμα των δεδομένων επιτάχυνσης σε κάθε άξονα. Το φίλτρο αυτό βασίζεται στην μέθοδο κυλιόμενου μέσου.

Findpeaks (data)

Μία πολύ χρήσιμη συνάρτηση του matlab είναι η Findpeaks μέσω αυτής μπορούμε να βρούμε τις κορυφές στα γραφήματα μας για να βρούμε τον κύκλο βάρδισης του βαδιστή. Για παράδειγμα toe off, heel strike, heel off, χρονικές περιόδους και μήκος κάθε βήματος.

Adraneia vel (vel)

Μέσω της συνάρτησης αυτής μπορούμε να ρυθμίσουμε τις μη μηδενικές τιμές της αδράνειας της ταχύτητας. Το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι, μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της θέσης.

cumtrapz ()

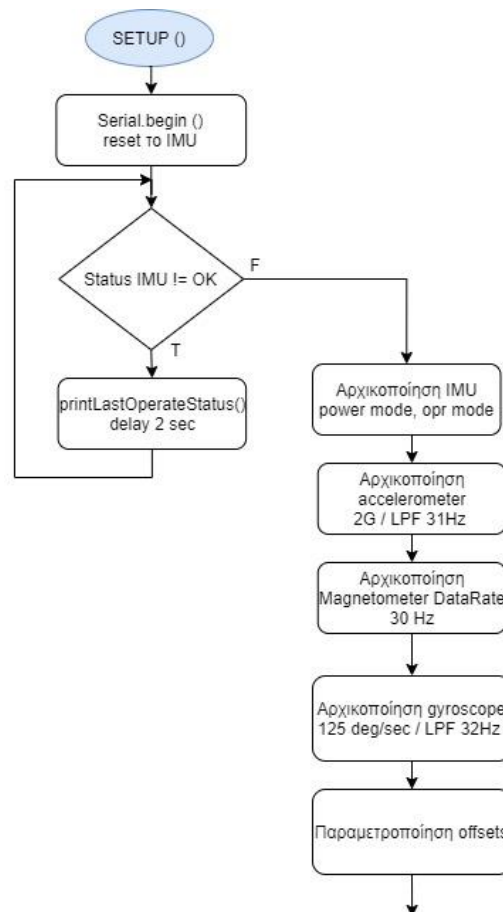
Μέσω της συνάρτησης `cumtrapz` κάνουμε ολοκλήρωση στο σήμα μας με την μέθοδο τραπεζίου. Με αυτό το τρόπο βρίσκουμε την ταχύτητα ενώ με διπλή ολοκλήρωση μπορούμε να βρούμε την απόσταση που έχει διανύσει ο βαδιστής.

Intersect()

Μέσω αυτής της συνάρτησης μπορούμε να συγκρίνουμε δύο ανόμοιους πίνακες και να βρούμε τα κοινά στοιχεία τους. Χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της απόστασης των βημάτων [12], [14].

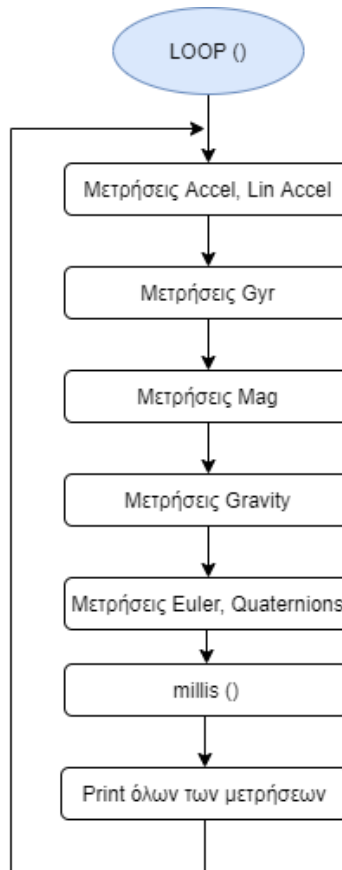
6.3. Διάγραμμα Ροής

Το διάγραμμα ροής χωρίζεται σε δύο μέρη. Στις βασικές συναρτήσεις `setup ()`, `loop ()`.



Εικόνα 36 Διάγραμμα ροής συνάρτησης `setup ()`

Στη συνάρτηση `setup ()` ενεργοποιείται η σειριακή επικοινωνία, γίνεται έλεγχος αν το IMU λειτουργεί σωστά και πραγματοποιούνται όλες οι αρχικοποιήσεις και παραμετροποιήσεις του `bno055` για όλα τα αισθητήρια.

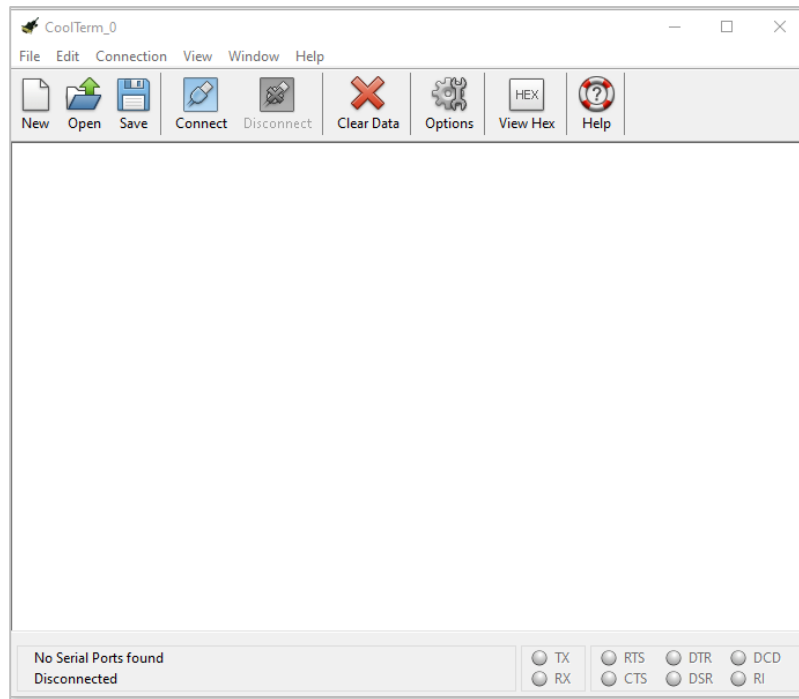


Εικόνα 37 Διάγραμμα Ροής συνάρτησης loop ()

Η συνάρτηση loop () είναι ο ατέρμων βρόχος που θα παραμείνει το πρόγραμμα μας αφού ολοκληρώσει την συνάρτηση setup. Σε αυτή πραγματοποιούνται όλες οι μετρήσεις των αισθητήρων και ξεκινάει η εκκίνηση του ρολογιού μέσω της συνάρτησης millis (). Όλες οι μετρήσεις τυπώνονται στην σειριακή οθόνη και σε αρχείο txt.

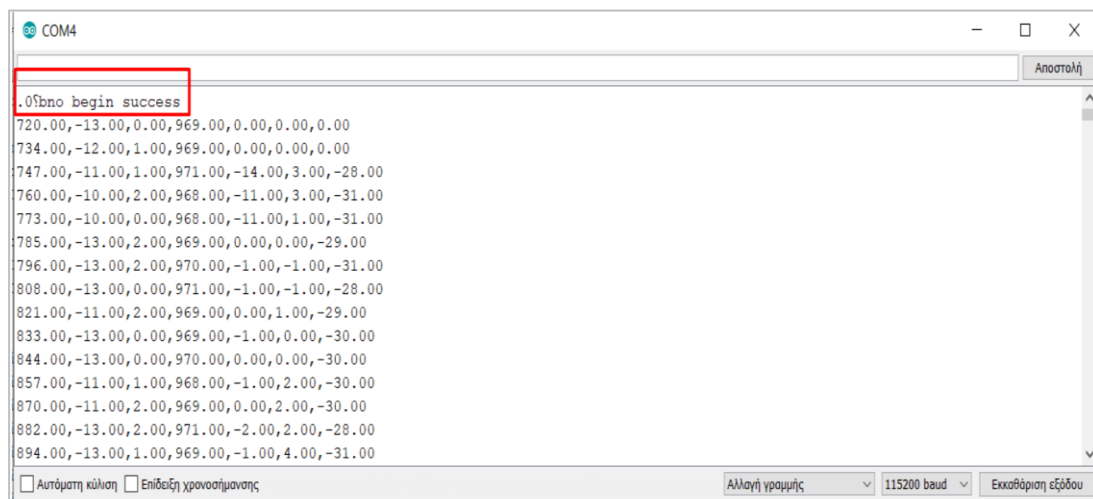
6.4. Υλοποίηση – Αποτελέσματα

Η συλλογή όλων των δεδομένων από τα αισθητήρια του IMU αποθηκεύτηκαν σε αρχεία txt μέσω του προγράμματος CoolTermWin το οποίο συνδέεται άμεσα μέσω σειριακής θύρας (COM) με το arduino σε real time. Η εφαρμογή διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο.



Εικόνα 38 CoolTermWin

Κατά την εκκίνηση της συσκευής μας και μετά το compile του κώδικα θα πρέπει στο serial monitor του Arduino να εκτυπωθεί το μήνυμα ελέγχου σωστής λειτουργίας του συστήματος και στη συνέχεια να καταγράφει μετρήσεις από τους αισθητήρες, αλλιώς αν εμφανιστεί μήνυμα error σημαίνει ότι το IMU δεν λειτουργεί σωστά.

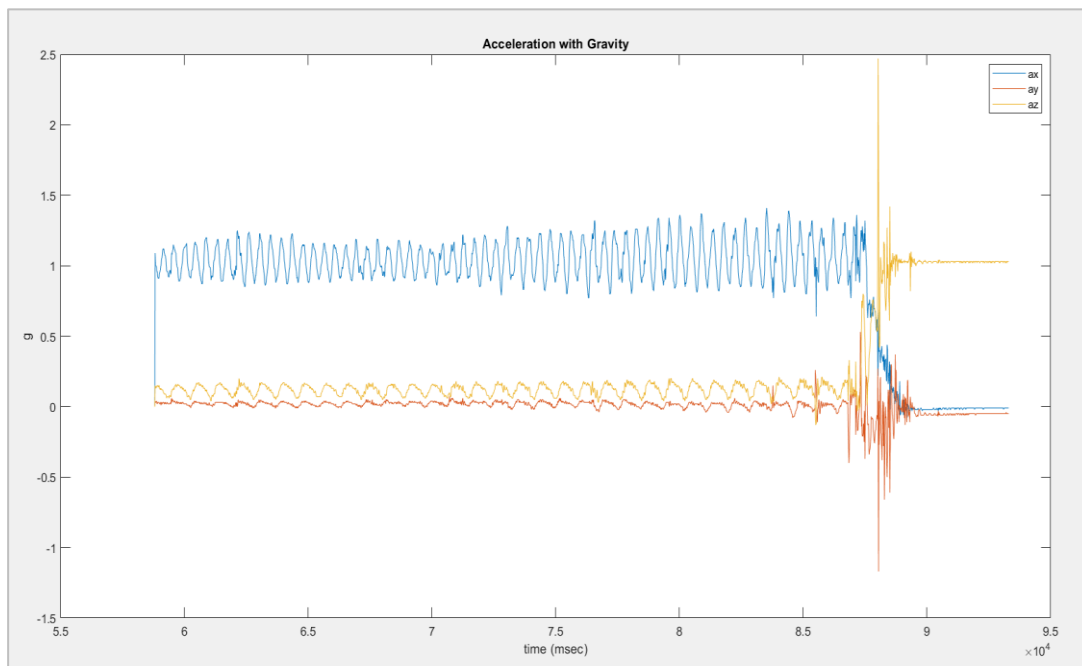


Εικόνα 39 εκτύπωση μηνύματος σωστής λειτουργίας IMU

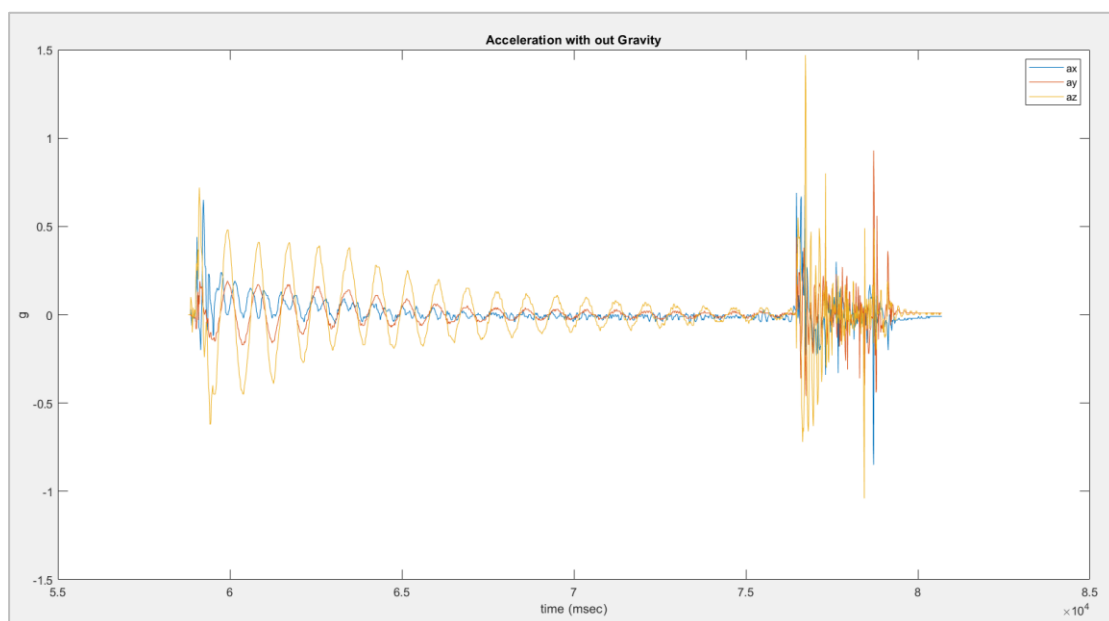
Αφού λάβουμε όλες τις μετρήσεις που χρειαζόμαστε για την ανάλυση της βάδισης ενός βαδιστή παρακάτω θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα από τα γραφήματα που πήραμε.

Η δύναμη της βαρύτητας που ασκείται στο επιταχυνσιόμετρο είναι ένας βασικός παράγοντας

για να αλλοιώσει τα δεδομένα και να μας δώσει λανθασμένες μετρήσεις ταχύτητας και θέσης κατά τον υπολογισμό τους. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να αφαιρεθεί από τις επιταχύνσεις μας. Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται η επιτάχυνση με την δύναμη της βαρύτητας και η γραμμική επιτάχυνση (με την αφαίρεση της βαρύτητας). Η πειραματική διαδικασία έχει γίνει με το IMU να βρίσκεται σε ελεύθερη ταλάντωση για χρονική περίοδο περίπου 30 δευτερολέπτων. Η εκκίνηση γίνεται από τα 60 δευτερόλεπτα και διαρκεί μέχρι τα 90 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 40 Γράφημα επιτάχυνσης με τη δύναμη της βαρύτητας



Εικόνα 41 Γράφημα γραμμικής επιτάχυνσης

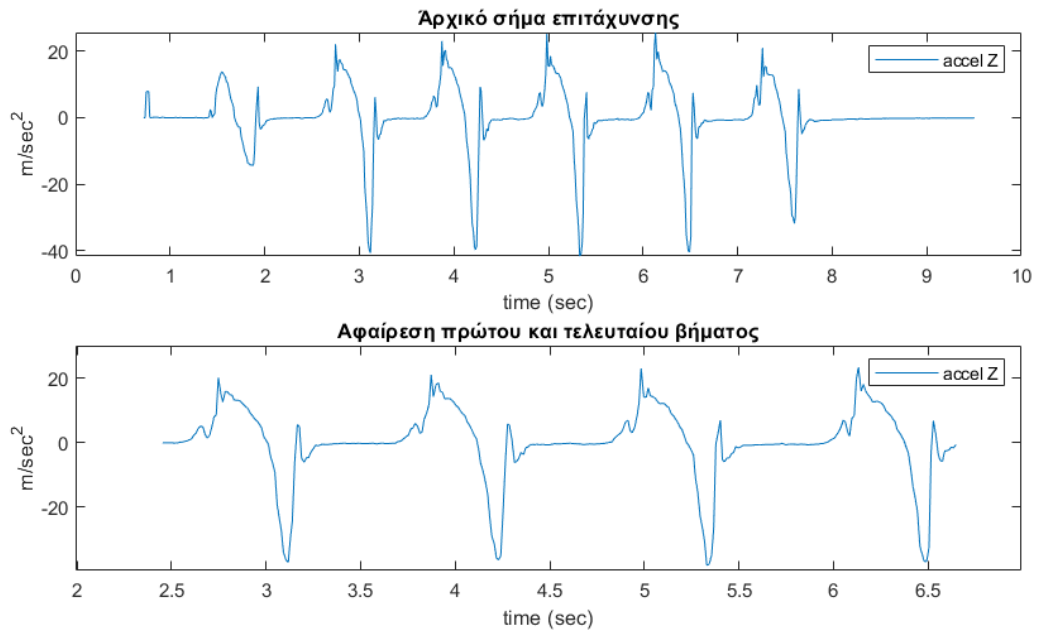
Στο πρώτο γράφημα παρατηρούμε ότι ο άξονας X ο οποίος είναι ο κατακόρυφος άξονας επηρεάζεται από την έλξη του βαρυτικού πεδίου της Γης με αποτέλεσμα να παίρνει τιμές κοντά στο 1g. Ενώ οι άξονες Y, Z δεν επηρεάζονται από την δύναμη της βαρύτητας και οι τιμές τους τείνουν στο μηδέν. Επιπλέον εκτός από την βαρύτητα τα επιταχυνσιόμετρα όπως αναφέραμε στο τρίτο κεφάλαιο επηρεάζονται από διάφορες εξωτερικές δυνάμεις, θόρυβο, παρεμβολές κ.α. σε αυτά τα φαινόμενα οφείλεται ότι ο Z άξονας έχει τιμές κοντά στα 0.10 – 0.20 g. Τέλος στο 87' δευτερόλεπτο έως το 90' δευτερόλεπτο τερματίζουμε την πειραματική διαδικασία και εκεί οφείλονται οι κατακόρυφες απότομες γραμμές που μοιάζουν με θόρυβο.

Στο δεύτερο γράφημα παρατηρούμε την διαδικασία της ταλάντωσης με την αφαίρεση της βαρύτητας από τον κατακόρυφο άξονα X για αυτό και όλες οι τιμές και στους τρεις άξονες τείνουν κοντά στο μηδέν. Από το 60' δευτερόλεπτο έως το 65' δευτερόλεπτο περίπου, έχουμε μεγαλύτερο πλάτος στο σήμα μας λόγω της αυξημένης ταλάντωσης ενώ από το 65' και μετά το IMU αρχίζει και ηρεμεί μέχρι να τερματίσουμε την διαδικασία στο 76' δευτερόλεπτο. Όπως και στη πρώτη γραφική παράσταση ο θόρυβος των απότομων κατακόρυφων γραμμών οφείλεται στον τερματισμό του πειράματος.

Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε πειραματική διαδικασία για την ανάλυση της βάδισης. Ενσωματώσαμε το σύστημα μας στο δεξιό πόδι του βαδιστή και το IMU τοποθετήθηκε κατακόρυφα στην φτέρνα του παπουτσιού. Ο οριζόντιος άξονας εμπρός της κίνησης του βαδιστή ήταν ο άξονας Z ενώ ο άξονας X ήταν ο κατακόρυφος και ο Y ο πλάγιος άξονας δεξιά και αριστερά από τον Z. Η δειγματοληψία έγινε για τρία διαφορετικά πειράματα. Στο πρώτο θεωρούμε ότι ο βαδιστής κινείται με φυσιολογική βάδιση, στο δεύτερο εκτελεί κίνηση με μικρότερα πιο αργά βήματα από την φυσιολογική βάδιση ενώ στο τρίτο κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Και στα τρία πειράματα υπολογίζουμε την επιτάχυνση, την ταχύτητα, την θέση του βαδιστή, την ανάλυση του κύκλου βάδισης, τον χρόνο και το μήκος του κάθε βήματος.

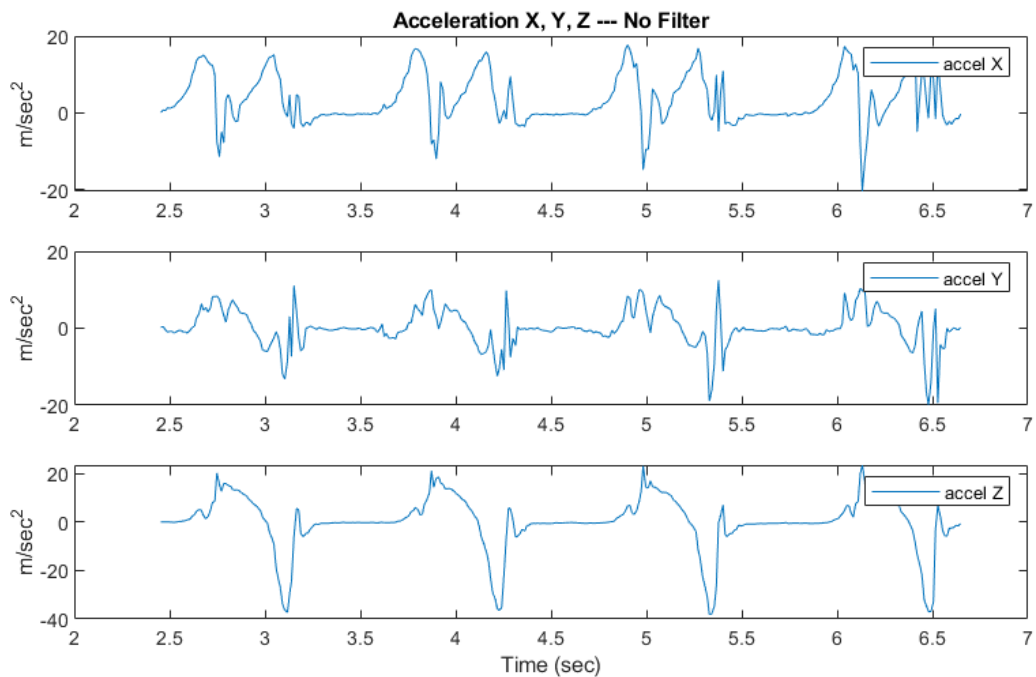
Πειραματική διαδικασία – Φυσιολογική Βάδιση

Η δειγματοληψία έγινε για έξι βήματα και συνολικό χρόνο 9.5 δευτερόλεπτα, όμως αφαιρέσαμε το πρώτο και το τελευταίο βήμα από το σήμα μας επειδή δεν έχουν το ίδιο πλάτος με τα ενδιάμεσα βήματα. Έτσι κρατήσαμε το ωφέλιμο σήμα από τα 2,5 έως τα 6,5 sec. Συνεπώς η τελική δειγματοληψία έγινε για 4 βήματα.



Εικόνα 42 Γράφημα 1. Αρχικό σήμα | Γράφημα 2. Τελικό σήμα

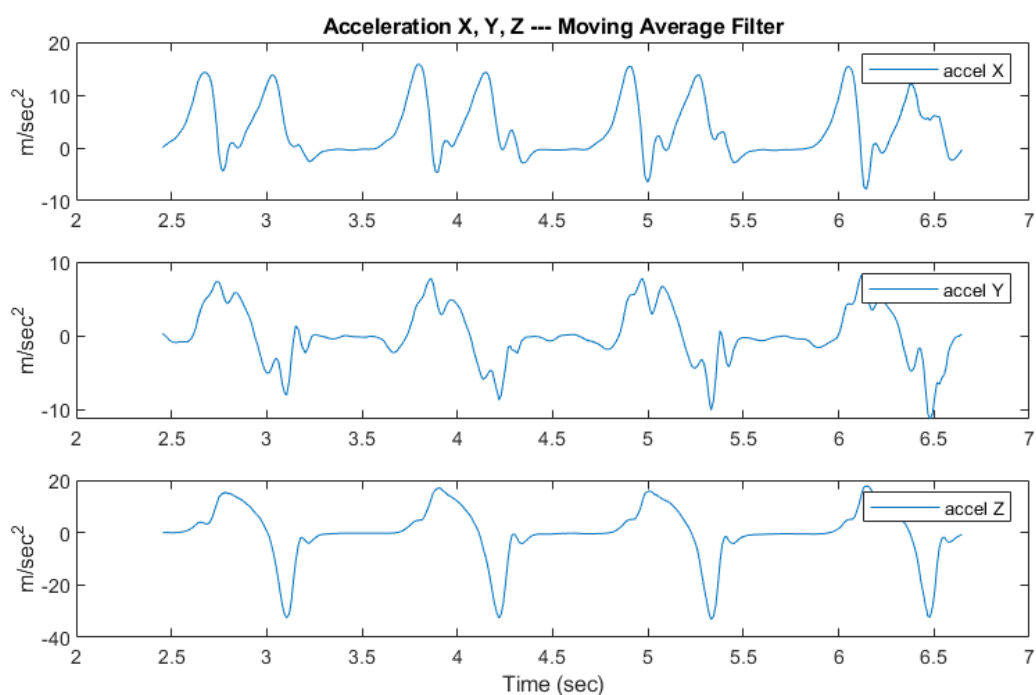
Στη συνέχεια φαίνεται το γράφημα των επιταχύνσεων που λάβαμε σε κάθε άξονα X, Y, Z χωρίς φιλτράρισμα.



Εικόνα 43 Επιταχύνσεις χωρίς φίλτρο για τους 3 άξονες

Ο άξονας Z, είναι ο άξονας της εμπρός κίνησης της βάδισης, ο άξονας Y είναι ο πλάγιος δεξιά και αριστερά από τον άξονα Z και ο X είναι ο κατακόρυφος άξονας. Ενώ στο επόμενο γράφημα

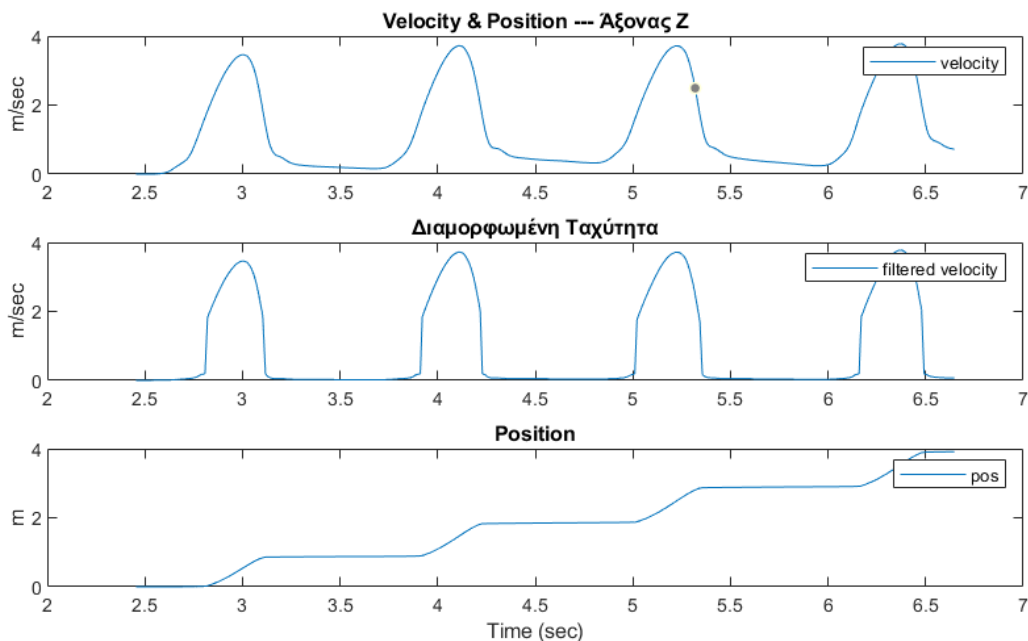
παρατηρούμε την επιτάχυνση των τριών αξόνων ενσωματώνοντας φίλτρο κυλιόμενου μέσου για την διόρθωση του σήματος.



Εικόνα 44 Γραφική απεικόνιση επιταχύνσεων στους 3 άξονες με φίλτρο κυλιόμενου μέσου

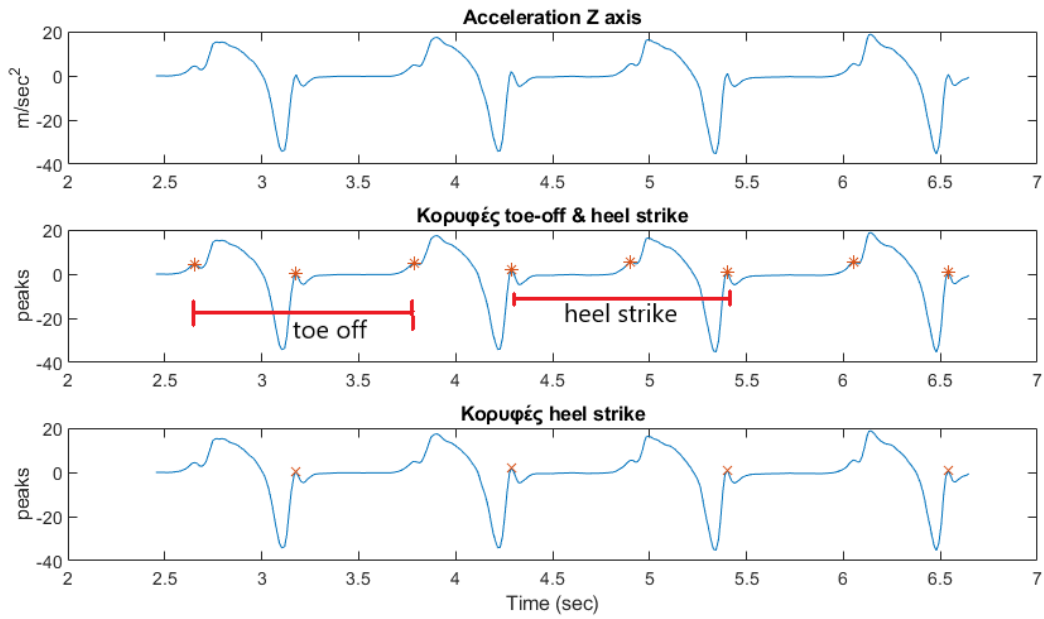
Παρατηρούμε ότι το σήμα είναι αρκετά διορθωμένο αφαιρώντας τον θόρυβο χωρίς να χάνουμε τις σημαντικές πληροφορίες του toe off και του heel strike.

Στην επόμενη εικόνα, στο πρώτο γράφημα παρατηρούμε την ταχύτητα που έχει βρεθεί με την ολοκλήρωση της επιτάχυνσης με την μέθοδο τραπεζίου. Βλέπουμε ότι η ταχύτητα του κάθε βήματος είναι περίπου 4 m/sec ενώ σε στιγμές αδράνειας (δηλαδή όταν το πόδι πατάει στο έδαφος) η ταχύτητα τείνει να είναι μηδενική. Όταν το πόδι βρίσκεται σε φάση στήριξης η ταχύτητα πρέπει να είναι μηδενική αφού δεν υπάρχει καμία κίνηση. Αυτό διορθώνεται στο δεύτερο γράφημα της ταχύτητας μέσω της συνάρτησης `Adraneaia_vel ()`. Ο αλγόριθμος μηδενίζει τις τιμές που τείνουν στο μηδέν σε περιόδους αδράνειας χωρίς να επηρεάζει την ταχύτητα των βημάτων. Τέλος στο τρίτο γράφημα επαναλαμβάνεται η διαδικασία της διπλής ολοκλήρωσης της ταχύτητας για να βρούμε την απόσταση που έχει διανύσει ο βαδιστής η οποία κυμαίνεται περίπου στα τέσσερα μέτρα για τα τέσσερα βήματα της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 45 Γραφική παράσταση ταχύτητας και θέσης

Τέλος μέσω της επιτάχυνσης του σήματος μπορούμε να βρούμε τον κύκλο βάρδισης. Ένας κύκλος βάρδισης ξεκινάει από το πάτημα της φτέρνας έως το επόμενο πάτημα της φτέρνας του ίδιου ποδιού. Στο δεύτερο γράφημα της επόμενης εικόνας διακρίνονται οι κορυφές των toe off και heel strikes. Η πρώτη μικρή κορυφή πριν την μέγιστη κορυφή που επιταχύνει το πόδι είναι το toe off, δηλαδή η στιγμή που τα δάχτυλα του ποδιού απομακρύνονται από το έδαφος ενώ το heel strike είναι αμέσως επόμενη κορυφή μετά την μέγιστη κοιλιάδα κάθε βήματος. Σε εκείνο το σημείο πατάει η φτέρνα στο έδαφος. Από toe off σε toe off ή από heel strike σε heel strike έχουμε ένα βήμα. Το τρίτο γράφημα είναι περισσότερο ξεκάθαρο αφού φαίνονται μόνο οι κορυφές των heel strike. Επιπλέον στη δεύτερη γραφική παράσταση μπορούμε πολύ εύκολα να εντοπίσουμε την φάση αιώρησης του βήματος όπου είναι από το toe off (περίπου 2.7 sec) μέχρι το heel strike (περίπου 3.2 sec) ενώ η φάση στήριξης του ποδιού στο έδαφος είναι από το heel strike (2,7 sec) μέχρι το επόμενο toe off (περίπου 3.8 sec). Το ίδιο ισχύει για τα επόμενα βήματα.



Εικόνα 46 Απεικόνιση των κορυφών toe off και heel strike

Το τρίτο γράφημα μας βοηθάει να υπολογίσουμε τον χρόνο και το μήκος του κάθε βήματος.

Ο χρόνος κάθε βήματος για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία είναι 1.11, 1.11 και 1.13 sec αντίστοιχα.

3x1 double	
	1
1	1.1100
2	1.1150
3	1.1390

Εικόνα 47 χρονική διάρκεια κάθε βήματος σε sec

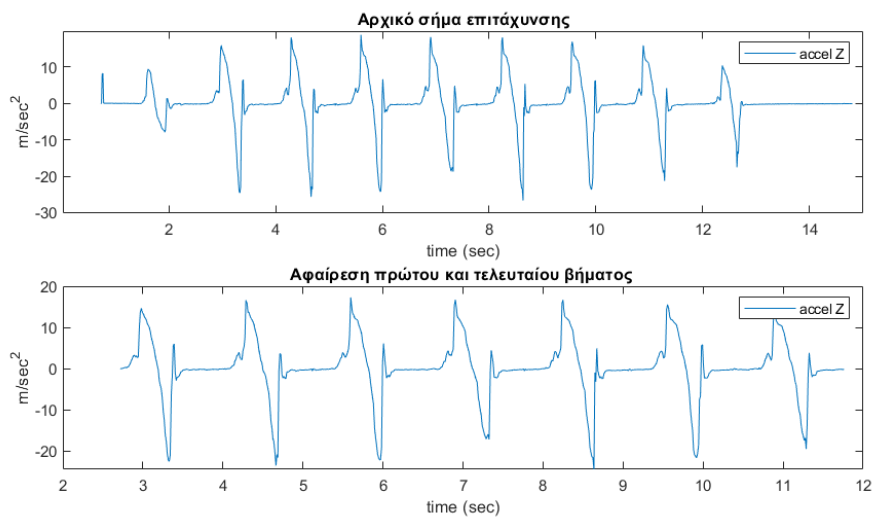
Το μήκος κάθε βήματος για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία είναι 0.97, 1.04, και 1.03 m.

3x1 double	
	1
1	0.9700
2	1.0400
3	1.0300

Εικόνα 48 Μήκος βήματος σε m

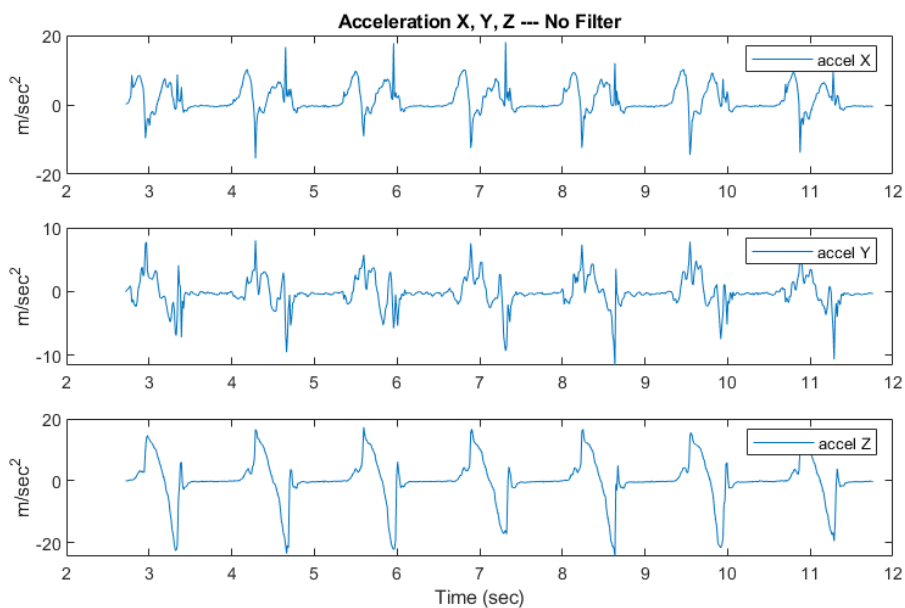
Πειραματική διαδικασία – Βάδιση μικρότερων βημάτων

Στη δεύτερη διαδικασία η δειγματοληψία έγινε για εννέα βήματα και συνολικό χρόνο 13 δευτερόλεπτα, όμως αφαιρέσαμε το πρώτο και το τελευταίο βήμα από το σήμα μας επειδή δεν έχουν το ίδιο πλάτος με τα ενδιάμεσα βήματα. Έτσι κρατήσαμε το ωφέλιμο σήμα από τα 2,6 έως τα 12 sec. Συνεπώς η τελική δειγματοληψία έγινε για 7 βήματα.



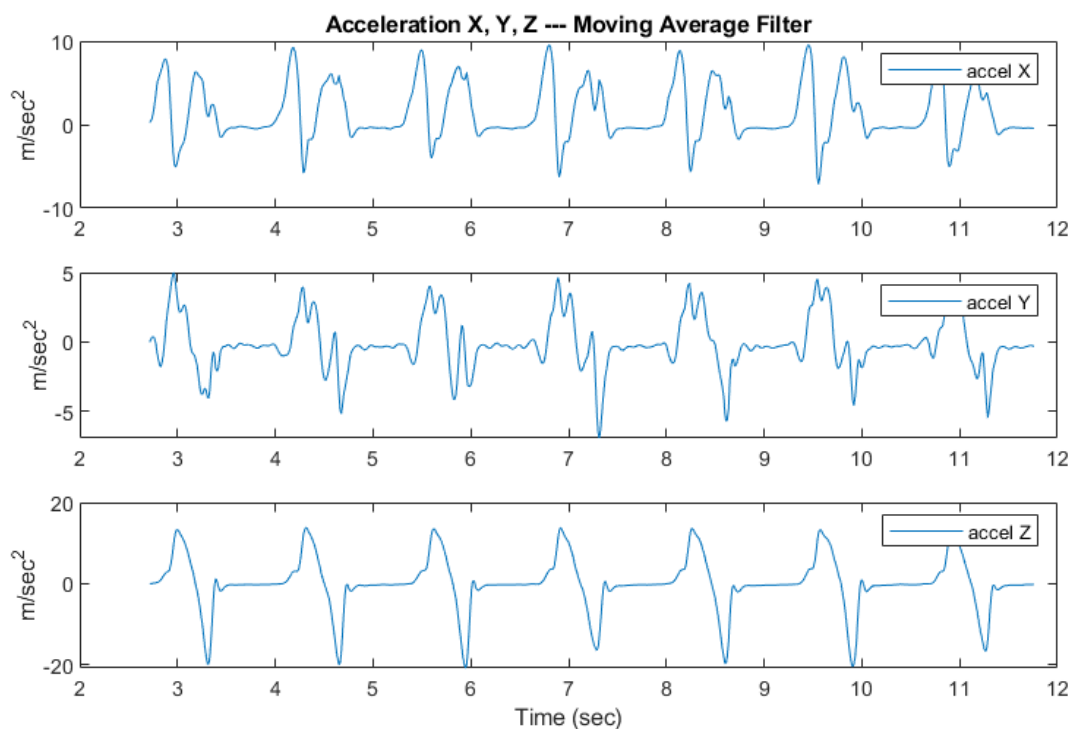
Εικόνα 49 Γράφημα 1. Αρχικό σήμα | Γράφημα 2. Διαμορφωμένο σήμα

Στη συνέχεια φαίνεται το γράφημα των επιταχύνσεων που λάβαμε σε κάθε άξονα X, Y, Z χωρίς φιλτράρισμα.



Εικόνα 50 Σήμα επιτάχυνσης στους άξονες X, Y, Z χωρίς φίλτρο

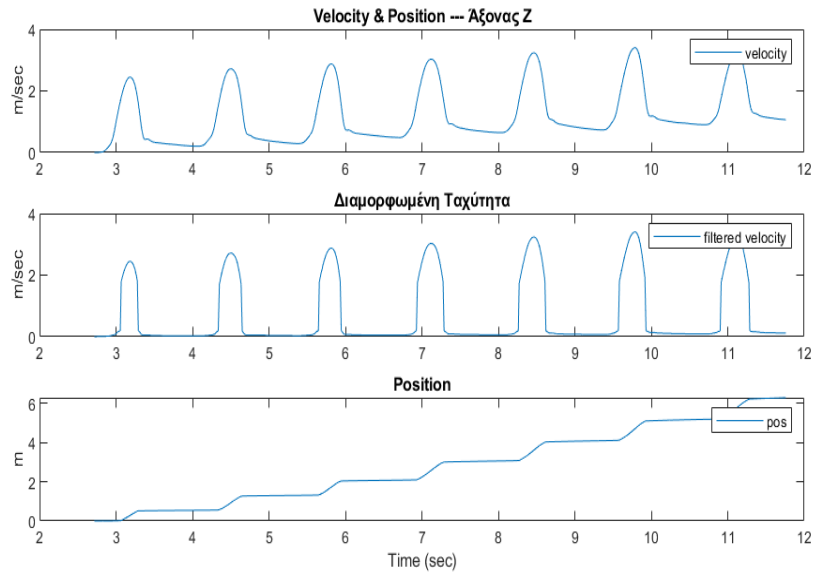
Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα ο άξονας Z, είναι ο άξονας της εμπρός κίνησης της βάδισης, ο άξονας Y είναι ο πλάγιος δεξιά και αριστερά από τον άξονα Z και ο X είναι ο κατακόρυφος άξονας. Ενώ στο επόμενο γράφημα παρατηρούμε την επιτάχυνση των τριών αξόνων ενσωματώνοντας φίλτρο κυλιόμενου μέσου για την διόρθωση του σήματος.



Εικόνα 51 Σήμα επιτάχυνσης στους άξονες X, Y, Z με φίλτρο

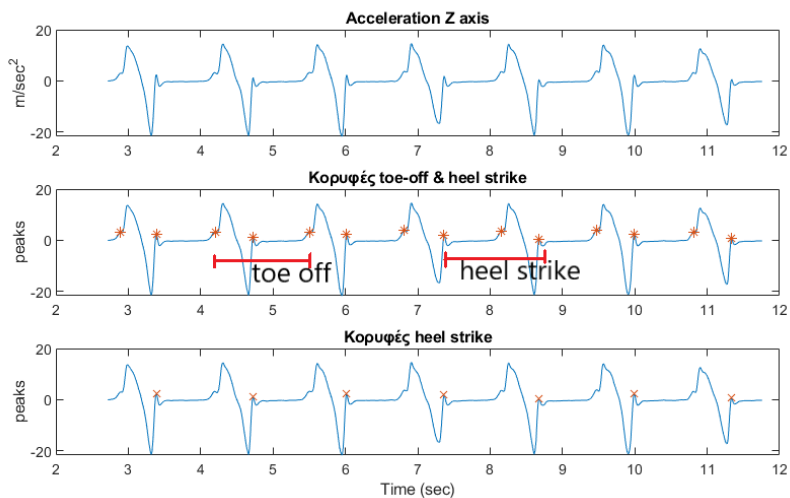
Ενώ μέσω του moving average filter το σήμα έχει διορθωθεί σε μεγάλο βαθμό χωρίς να χάνονται και εδώ σημαντικές πληροφορίες. Και σε αυτό το σήμα διακρίνονται τόσο οι κορυφές toe off όσο και τα heel strike.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ταχύτητας και θέσης του βαδιστή. Στο πρώτο γράφημα η ταχύτητα έχει βρεθεί μέσω της ολοκλήρωσης της επιτάχυνσης με την μέθοδο τραπεζίου. Παρατηρούμε ένα μεγαλύτερο drift σε σχέση με την πρώτη πειραματική διαδικασία όμως μέσω του αλγορίθμου `adraneaia_vel()` το drift μηδενίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Ο μηδενισμός της ταχύτητας όταν το πόδι βρίσκεται σε φάση στήριξης έχει ως αποτέλεσμα να λάβουμε καλύτερα δεδομένα θέσης. Στο τρίτο γράφημα διακρίνεται η απόσταση που διένυσε ο βαδιστής μέσω της ολοκλήρωσης της ταχύτητας με την μέθοδο τραπεζίου. Η απόσταση που έχει διανύσει είναι περίπου 6.20 μέτρα.



Εικόνα 52 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας και θέσης

Στην εικόνα 53 παρουσιάζονται τα γραφήματα του κύκλου βάδισης. Στο πρώτο είναι η φιλτραρισμένη επιτάχυνση κατά τον άξονα της κίνησης Z, ενώ στο δεύτερο διάγραμμα παρατηρούμε τις κορυφές των toe off και των heel strikes. Μέσω αυτών των στοιχείων διακρίνεται η φάση αιώρησης από το toe off έως το heel strike (3 έως 3.4 sec) και η φάση στήριξης που είναι από το heel strike μέχρι το επόμενο toe off (3.4 έως 4.2 sec περίπου). Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται και στα επόμενα βήματα. Τέλος στο τρίτο διάγραμμα παρατηρούμε τις κορυφές μόνο μεταξύ των heel strikes από τις οποίες μπορούμε να βρούμε πληροφορίες για τον χρόνο και το μήκος του κάθε βήματος καθώς και τον αριθμό των βημάτων που έχει διανύσει ο βαδιστής. Στο συγκεκριμένο πείραμα τα βήματα είναι έξι.



Εικόνα 53 Γραφική απεικόνιση toe off και heel strike

Ο χρόνος κάθε βήματος για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία είναι σε second και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

6x1 double	
	1
1	1.3330
2	1.2950
3	1.3450
4	1.3080
5	1.3210
6	1.3450

Εικόνα 54 Χρονική περίοδος βήματος (sec)

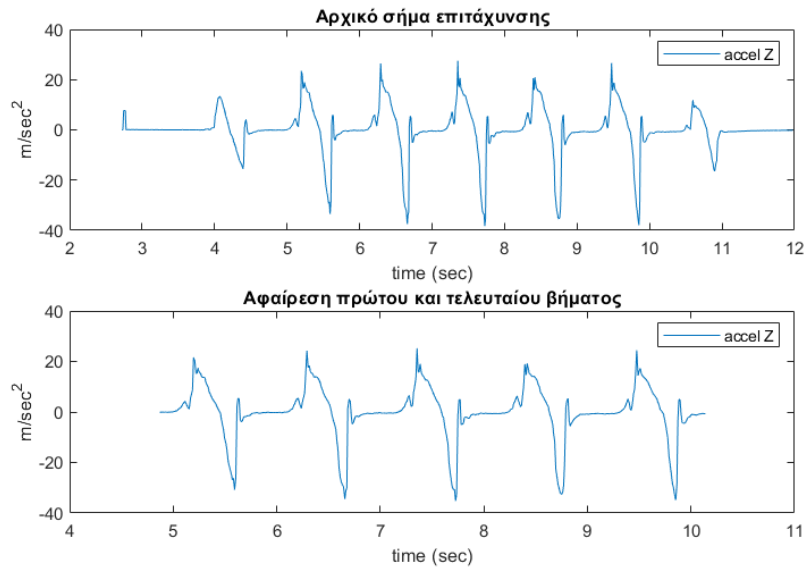
Το μήκος των βημάτων είναι σε μέτρα και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

6x1 double	
	1
1	0.7500
2	0.7700
3	0.9700
4	1.0200
5	1.0700
6	1.1200

Εικόνα 55 Μήκος βήματος σε (m)

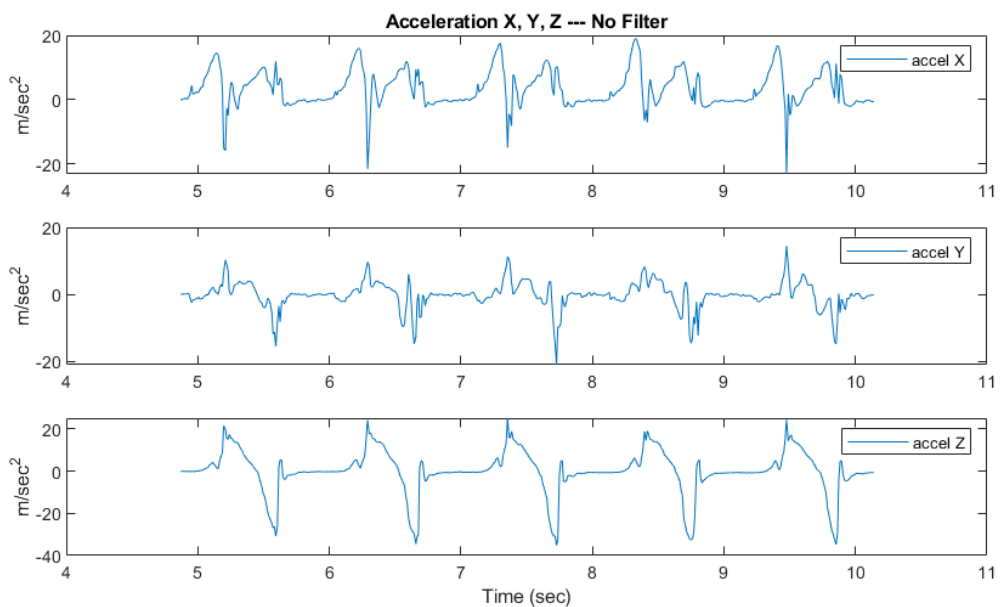
Πειραματική διαδικασία – ταχεία βάρδιση

Στη δεύτερη διαδικασία η δειγματοληψία έγινε για επτά βήματα και συνολικό χρόνο 12 δευτερόλεπτα, όμως αφαιρέσαμε το πρώτο και το τελευταίο βήμα από το σήμα μας επειδή δεν έχουν το ίδιο πλάτος με τα ενδιάμεσα βήματα. Έτσι κρατήσαμε το ωφέλιμο σήμα από τα 5 έως τα 10 sec. Συνεπώς η τελική δειγματοληψία έγινε για 5 βήματα.

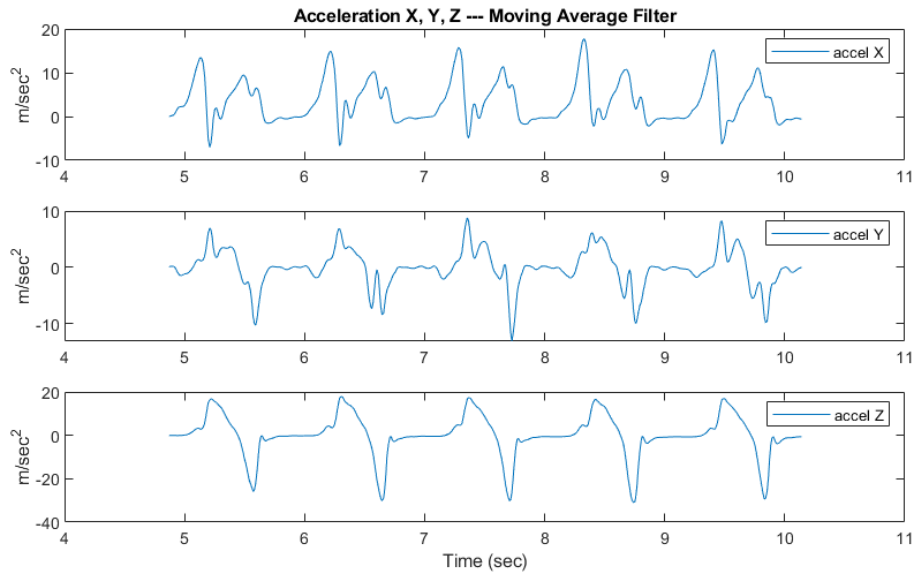


Εικόνα 56 Γράφημα 1. Αρχικό σήμα / Γράφημα 2. Διαμορφωμένο σήμα

Στη εικόνα 58 βλέπουμε το γράφημα των επιταχύνσεων που λάβαμε σε κάθε άξονα X, Y, Z χωρίς φιλτράρισμα. Ενώ στην εικόνα 59 παρατηρούμε το σήμα της επιτάχυνσης με την χρήση του φίλτρου moving average filter. Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα ο άξονας Z, είναι ο άξονας της εμπρός κίνησης της βάδισης, ο άξονας Y είναι ο πλάγιος δεξιά και αριστερά από τον άξονα Z και ο X είναι ο κατακόρυφος άξονας.

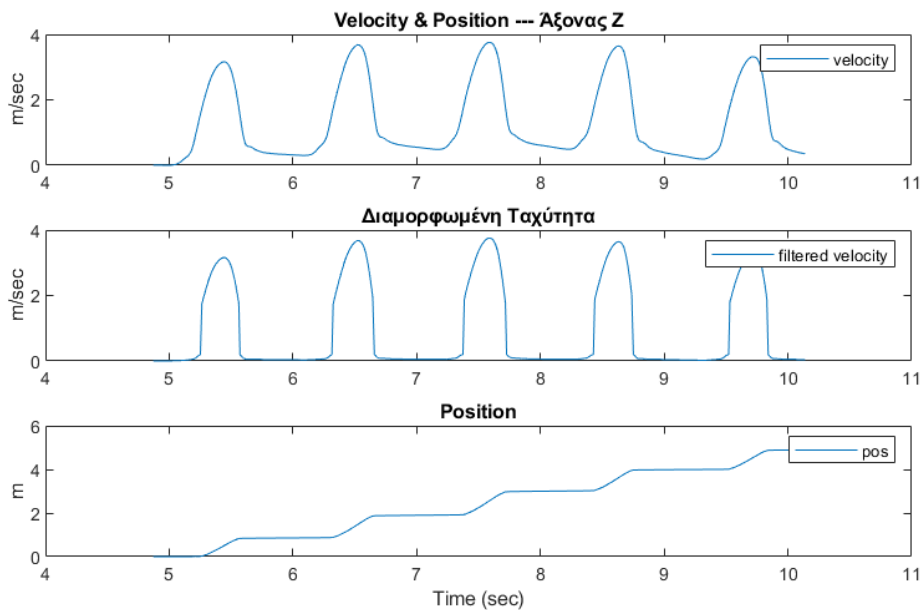


Εικόνα 57 Επιτάχυνσης 3 αξόνων χωρίς φίλτρο



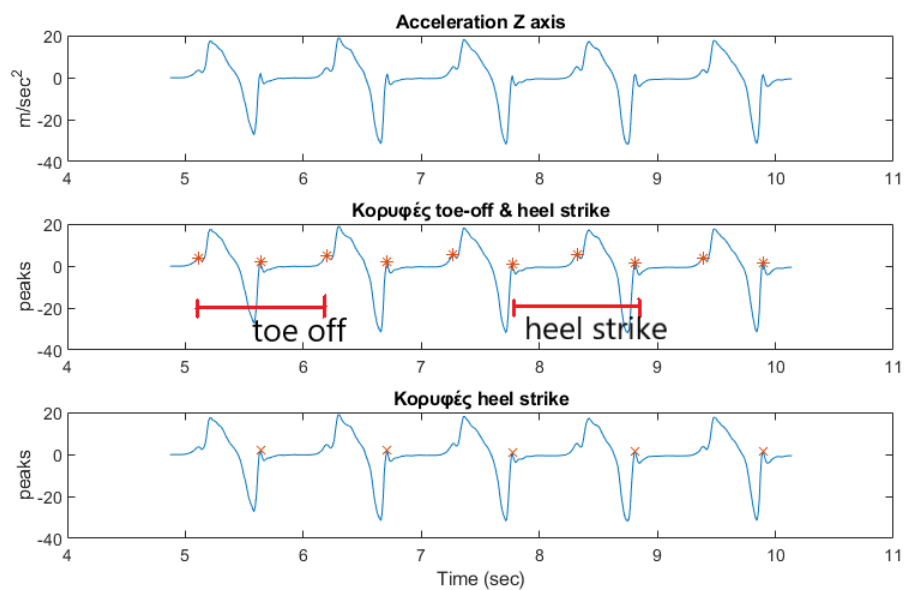
Εικόνα 58 Επιτάχυνση 3 αξόνων με φίλτρο

Ενώ μετά το φιλτράρισμα το σήμα της επιτάχυνσης έχει εξομαλυνθεί χωρίς να χάνεται σημαντική πληροφορία. Στην εικόνα 59 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για την ταχύτητα και την θέση του βαδιστή. Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα κυμαίνεται περίπου από 3 – 4 m/sec για κάθε βήμα και παρατηρείται και εδώ ένα μικρό drift. Με τον αλγόριθμο στο δεύτερο γράφημα βλέπουμε ότι εξαλείφεται το drift και οι περίοδοι που το πόδι ήταν προσκολλημένο στο έδαφος μας δίνει μηδενική ταχύτητα. Τέλος για τέσσερα ολοκληρωμένα βήματα η απόσταση που διένυσε ο βαδιστής είναι περίπου 5.20 μέτρα.



Εικόνα 59 Γραφική απεικόνιση ταχύτητας και θέσης

Από το σήμα της επιτάχυνσης μπορούμε να διακρίνουμε τον κύκλο βάρδισης και μέσω αυτών να υπολογίσουμε την χρονική περίοδο του κάθε βήματος και το μήκος του. Στο πρώτο γράφημα φαίνεται η επιτάχυνση στον άξονα εμπρός της κίνησης του βαδιστή Z. στο δεύτερο διακρίνεται η φάση αιώρησης και στήριξης. Από τα 5.1 – 5.6 sec περίπου έχουμε κίνηση του ποδιού επομένως την δεδομένη χρονική στιγμή το πόδι βρίσκεται σε φάση αιώρησης ενώ από το heel strike στα 5.6 sec έως το επόμενο toe off στα 6.2 sec περίπου το πόδι βρίσκεται σε φάση στήριξης. Αυτό μπορεί πολύ εύκολα να φανεί από την μηδενική επιτάχυνση που έχει σε εκείνο το σημείο το γράφημα μας. Τέλος στη τρίτη γραφική παράσταση παρατηρούμε μόνο τις κορυφές των χτυπημάτων της φτέρνας. Από τα heel strike εντοπίσαμε και υπολογίσαμε τον χρόνο και το μήκος του κάθε βήματος.



Εικόνα 60 Εμφάνιση toe off και heel strike

Από heel strike μέχρι το επόμενο heel strike για όλα τα βήματα ο χρόνος που βρέθηκε είναι 1.07, 1.06, 1.04, 1.08 secs. Ενώ το μήκος των βημάτων τα οποία υπολογίστηκαν σε τιμές μέτρων, παρατηρούνται στην εικόνα 63.

4x1 double	
	1
1	1.0730
2	1.0610
3	1.0420
4	1.0810

Εικόνα 61 χρόνο βάρδισης βημάτων (sec)

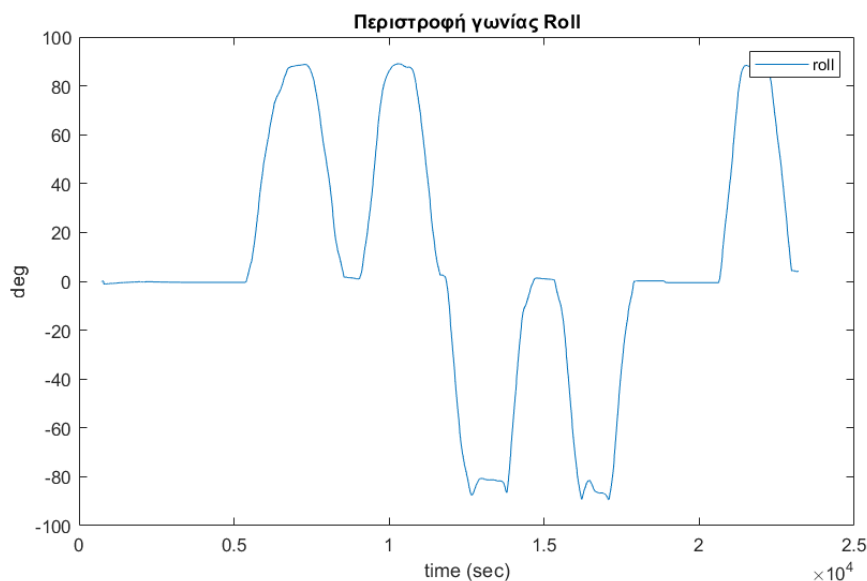
4x1 double	
	1
1	1.0300
2	1.1100
3	0.9900
4	0.9100

Εικόνα 62 Μήκος βάρδισης βημάτων (m)

Προσανατολισμός

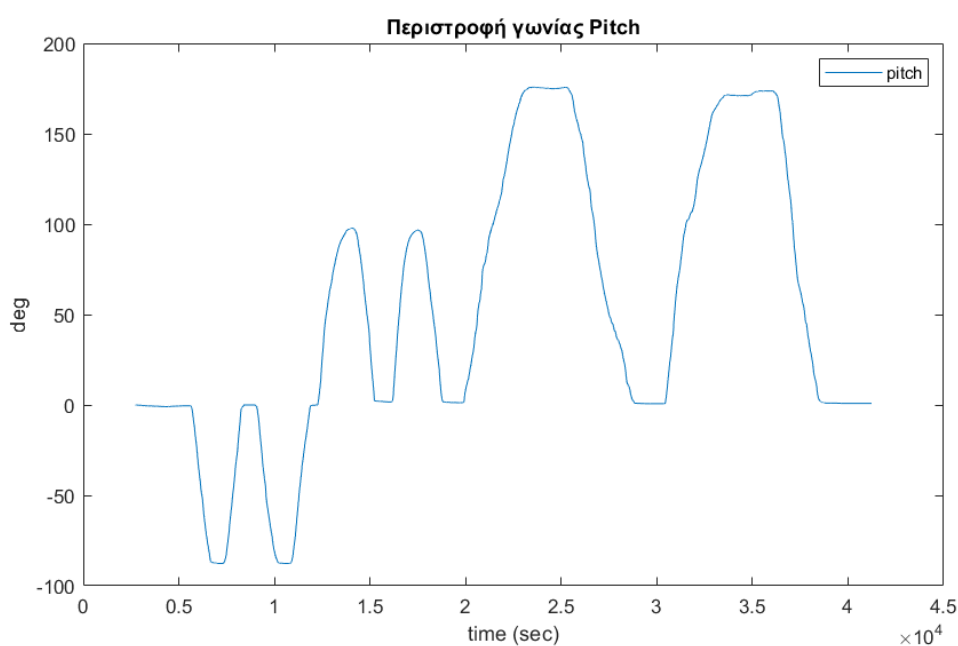
Εκτός από τους υπολογισμούς ταχύτητας, θέσης, χρονικών περιόδων και μήκος βημάτων, το σύστημα μας είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τις μετρήσεις από το γυροσκόπιο και το μαγνητόμετρο για να υπολογίσει τις περιστροφές των γωνιών yaw, roll, pitch.

Στο πρώτο γράφημα παρατηρούμε την περιστροφή της γωνίας roll. Τα αποτελέσματα είναι σε μοίρες και msec ενώ η δειγματοληψία έγινε για περίπου 23 δευτερόλεπτα. Αρχικά το σύστημα μας βρίσκεται σε επίπεδη επιφάνεια. Από τα 5 – 12 sec παρατηρούμε ότι το σύστημα μας κάνει περιστροφές μεταξύ 0 και 90 μοιρών στον θετικό άξονα ενώ από τα 12 μέχρι τα 18 sec περίπου το σύστημα μας κάνει περιστροφές από 0 έως -90 μοίρες και επαναλαμβάνεται η διαδικασία ακόμη μία φορά με περιστροφή στον θετικό άξονα. Σημαντικό χαρακτηριστικό στο γράφημα μας είναι ο σχηματισμός οριζόντιων γραμμών στις κορυφές και στις κοιλάδες. Αυτές δημιουργούνται λόγω της σταθεροποίησης του IMU για ένα μικρό χρονικό διάστημα πριν την επόμενη περιστροφή. Η γωνία roll μπορεί να περιστραφεί από τις -90 έως τις 90 μοίρες.



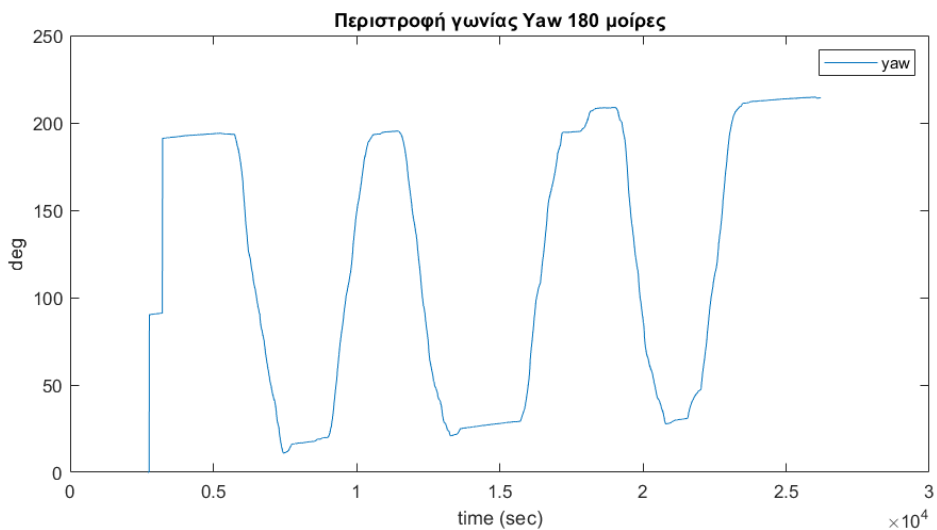
Εικόνα 63 Περιστροφή γωνίας roll

Στο δεύτερο γράφημα παρατηρούμε την περιστροφή της γωνίας pitch. Τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας είναι σε μοίρες και ο χρόνος του πειράματος διήρκησε περίπου 43 δευτερόλεπτα. Από τα 5 – 12 sec περίπου το IMU περιστρέφεται από 0 έως -90 μοίρες δύο φορές ενώ από 12 - 20 sec εκτελεί δύο περιστροφές μεταξύ 0 και 90 μοιρών στον θετικό άξονα. Ενώ από 20 - 39 sec εκτελεί δύο περιστροφές 180 μοιρών κατά τον θετικό άξονα. Οι οριζόντιες γραμμές του γραφήματος στις κορυφές και τις κοιλάδες δημιουργούνται επειδή το IMU παραμένει σταθεροποιημένο για τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα χωρίς να περιστρέφεται.



Εικόνα 64 Περιστροφή γωνίας pitch

Στην εικόνα 66. παρατηρούμε την περιστροφή της γωνίας yaw. Η δειγματοληψία έγινε για περίπου 27 δευτερόλεπτα. Η γωνία yaw λαμβάνεται σύμφωνα με το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς του μαγνητικού βορρά. Αυτό μπορεί να διακριθεί κατά την εκκίνηση του πειράματος. Αρχικά το σύστημα μας βρίσκεται στις 0 μοίρες ενώ μετά την βαθμονόμηση αυξάνεται στις 200 μοίρες. Οι τιμές που χρειάστηκαν για να βρει τον σωστό προσανατολισμό ήταν περίπου 3-4. Από τις 200 μοίρες και έπειτα εκτελεί περιστροφές. Οι περιστροφές είναι για 180 μοίρες και γίνονται μεταξύ 200 έως 20 μοιρών. Συνολικά παρατηρούμε έξι περιστροφές ενώ οι οριζόντιες γραμμές στις κορυφές και κοιλάδες του γραφήματος είναι η αδράνεια του αισθητήρα σε εκείνες τις χρονικές περιόδους. Δηλαδή παραμένει ακίνητο για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να ξανά περιστραφεί.



Εικόνα 65 Περιστροφή γωνίας yaw

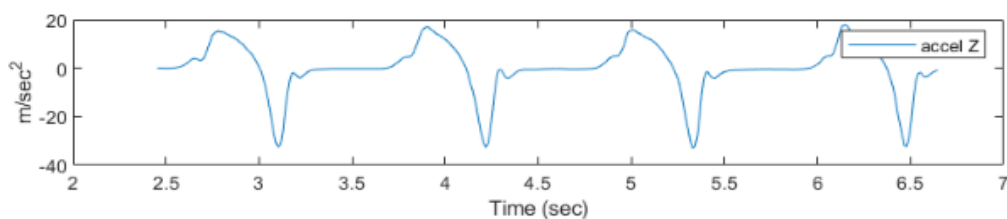
Το imu bno055 είναι μία πολύ αξιόπιστη μονάδα και έχει μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό των μοιρών στο προσανατολισμό. Τυχόν μικρές αποκλίσεις στις μοίρες οφείλονται στην πειραματική διαδικασία η οποία διαδραματίστηκε σε περιβάλλον εκτός εργαστηρίου.

Κεφάλαιο 7^ο

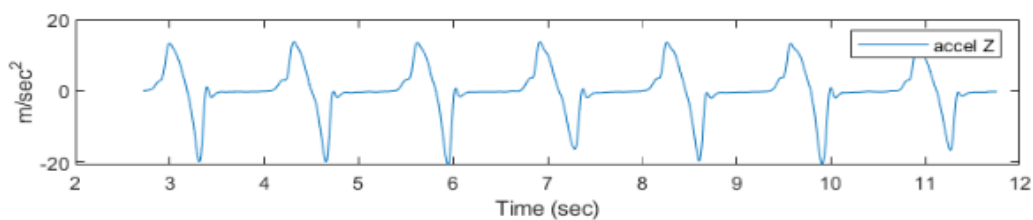
7. Ανάλυση - Συμπεράσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα που λάβαμε από τρεις διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες με το IMU bno055. Οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα των μετρήσεων λειτουργούν σωστά σε κάθε πείραμα βάση των αλγορίθμων τόσο στο arduino όσο και στο matlab. Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρήσουμε να συγκρίνουμε, να σχολιάσουμε και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων συνδυαστικά.

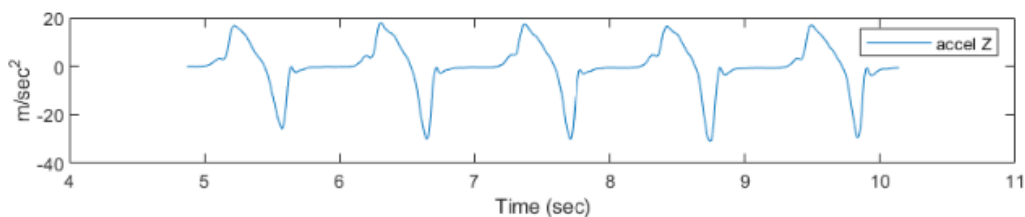
Διαγράμματα επιτάχυνσης τριών πειραμάτων



Εικόνα 66 Γράφημα επιτάχυνσης φυσιολογικής βάρδισης



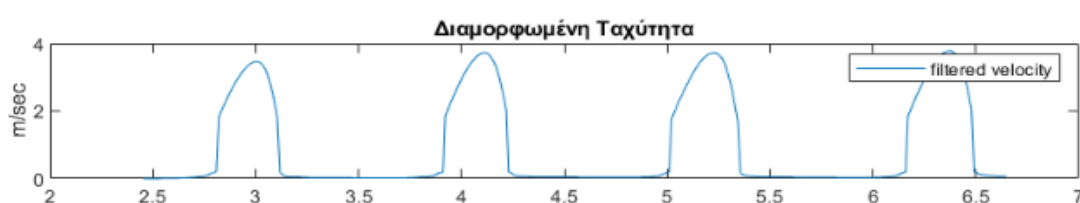
Εικόνα 67 Γράφημα επιτάχυνσης αργού βηματισμού



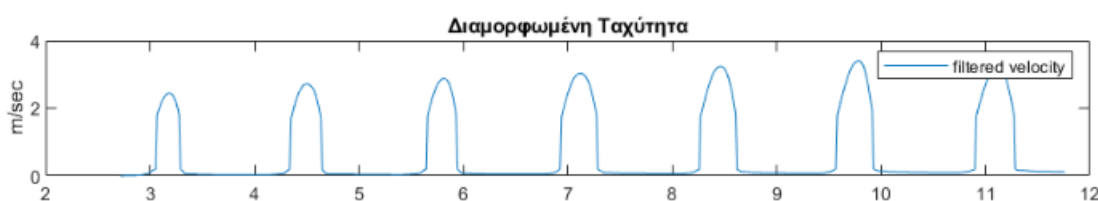
Εικόνα 68 Γράφημα επιτάχυνσης ταχείας βάρδισης

Όσον αφορά την επιτάχυνση στον άξονα της κίνησης κατά την βάρδιση τα αποτελέσματα που λάβαμε είναι σωστά βάση των πειραμάτων όμως δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις για να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα. Για παράδειγμα στο γράφημα της αργής βάρδισης η επιτάχυνση είναι μικρότερη κατά τον βηματισμό (14 - 15 m/sec²) σε σχέση με τα υπόλοιπα γραφήματα όπως αναμενόταν. Η διαφορά βρίσκεται μεταξύ της φυσιολογικής με την ταχεία βάρδιση που περιμέναμε να δούμε μεγαλύτερες επιταχύνσεις κατά τον βηματισμό. Η απόκλιση αυτή τι στιγμή κυμαίνεται στα 2 – 3 m/sec².

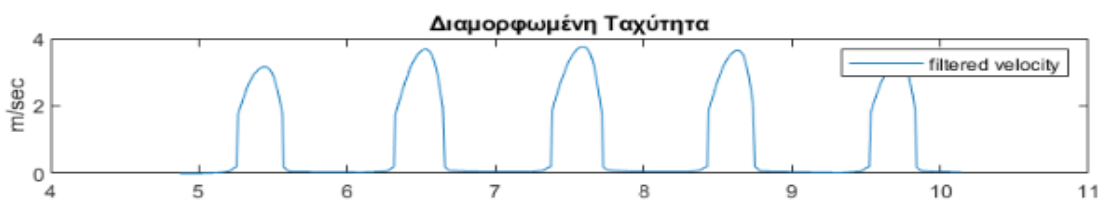
Διαγράμματα ταχύτητας τριών πειραμάτων



Εικόνα 69 Γράφημα ταχύτητας φυσιολογικής βάρδισης



Εικόνα 70 Γράφημα ταχύτητας αργής βάρδισης



Εικόνα 71 Γράφημα ταχύτητας ταχείας βάρδισης

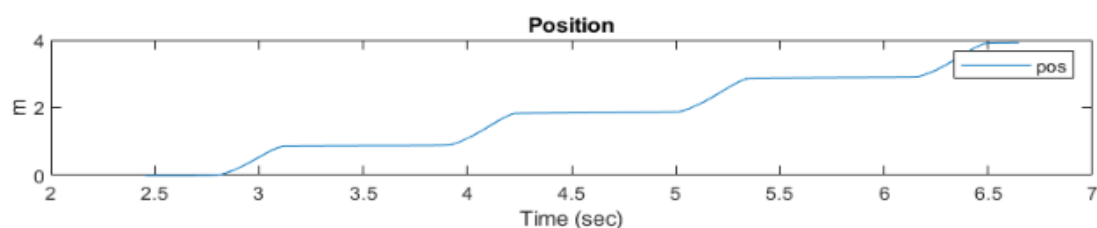
Και στα γραφήματα της ταχύτητας τα αποτελέσματα που λάβαμε είναι σωστά και αυτά που περιμέναμε να δούμε. Δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις, όμως η ταχύτητα και εν συνεχεία η θέση είναι αποτελέσματα της επιτάχυνσης, επομένως αν δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις και αλλαγές στην επιτάχυνση δεν θα υπάρχουν και στην ταχύτητα και την απόσταση.

Εν συγκρίσει με τα άλλα πειράματα, στο δεύτερο γράφημα παρατηρούμε μικρότερη ταχύτητα βημάτων περίπου 2,5 – 3 m/sec που σημαίνει ότι η βάρδιση ήταν πιο αργή ενώ και το μήκος των βημάτων διακρίνεται μικρό αφού στη φάση αιώρησης το πλάτος της κάθε καμπύλης (κατά

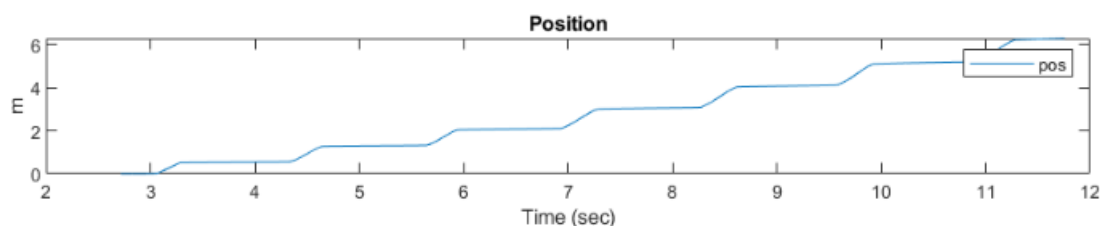
μήκος του άξονα του χρόνου) είναι λιγότερο φαρδύ από τα άλλα γραφήματα. Βέβαια εντοπίζουμε μία μικρή άνοδο στην ταχύτητα της βάρδισης κατά μήκος του χρόνου. Αυτό μπορεί να οφείλεται κατά την διάρκεια της βάρδισης ο βαδιστής να αύξησε κατά ελάχιστο την ταχύτητα του χωρίς όμως να επηρεάζεται το μήκος των βημάτων.

Η ταχύτητα της ταχείας βάρδισης σε σχέση με την φυσιολογική δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις στην ταχύτητα αφού και οι δύο είναι κοντά στα 4 m/sec^2 .

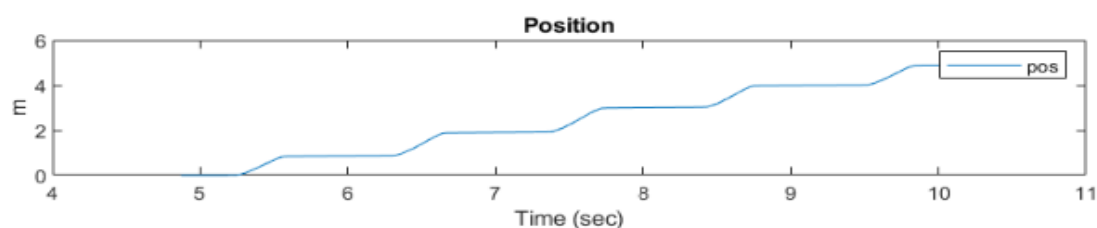
Διαγράμματα θέσης τριών πειραμάτων



Εικόνα 72 Γράφημα θέσης φυσιολογικής βάρδισης



Εικόνα 73 Γράφημα θέσης αργής βάρδισης



Εικόνα 74 Γράφημα θέσης ταχείας βάρδισης

Στο διάγραμμα της φυσιολογικής βάρδισης, το πείραμα πραγματοποιήθηκε για περίπου 6.5 μέτρα. Παρατηρούμε ότι η απόσταση που διένυσε ο βαδιστής είναι 4 μέτρα. Δεν μπορούμε να βρούμε με απόλυτη ακρίβεια αν υπάρχει απόκλιση γιατί, δεν έχουμε υπολογίσει το μήκος του πρώτου και τελευταίου βήματος που αφαιρέσαμε.

Στο δεύτερο διάγραμμα της αργής βάδισης, το σενάριο πραγματοποιήθηκε για 7.5 μέτρα ενώ παρατηρούμε ότι η απόσταση που διένυσε ο βαδιστής είναι περίπου 6.24 μέτρα. Όπως και παραπάνω δεν μπορούμε να εξάγουμε ακριβή συμπεράσματα αφού έχουν αφαιρεθεί από τους υπολογισμούς μας το πρώτο και τελευταίο βήμα.

Στο τρίτο γράφημα της ταχείας βάδισης το σενάριο πραγματοποιήθηκε για 7.5 μέτρα και ο βαδιστής έχει διανύσει απόσταση 5.22 μέτρα. Η αφαίρεση του πρώτου και τελευταίου βήματος δεν μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε με ακρίβεια την τελική απόσταση από την αρχική.

Βέβαια και στις τρεις περιπτώσεις οι αποκλίσεις είναι μικρές. Αν πάρουμε τον μέσο όρο των βημάτων από τον πίνακα μήκος βήματος για κάθε περίπτωση και τα προσθέσουμε θα παρατηρήσουμε ότι,

1^η περίπτωση

μ.ο. μήκος βήματος : 1.01 μέτρα

$$4 + 1.01 + 1.01 = 6.02 \text{ μέτρα}$$

2^η περίπτωση

μ.ο. μήκος βήματος : 0.95 μέτρα

$$6.24 + 0.95 + 0.95 = 8.14 \text{ μέτρα}$$

3^η περίπτωση

μ.ο. μήκος βήματος : 1.01 μέτρα

$$5.22 + 1.01 + 1.01 = 7.24 \text{ μέτρα}$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι και στα τρία σενάρια είμαστε πολύ κοντά στις αρχικές αποστάσεις με μικρές +/- αποκλίσεις. Τέλος να αναφέρουμε ότι το παραπάνω είναι ένα υποθετικό σενάριο και δεν τεκμηριώνεται επιστημονικά αφού δεν υπολογίζονται τα 2 βήματα σε κάθε σενάριο.

Πίνακας χρόνου και μήκος βήματος

	Φυσιολογική βάδιση (sec)	Βάδιση μικρότερων βημάτων (sec)	Ταχύς βηματισμός (sec)
	1,11	1,33	1,07
	1,15	1,29	1,06
	1,13	1,34	1,04
		1,30	1,08
		1,32	
		1,34	
M.O.	1.13	1,32	1,06

Πίνακας 1 χρονικές περίοδοι βημάτων για κάθε σενάριο

Παραπάνω παρουσιάζεται ο πίνακας για την χρονική διάρκεια του κάθε βήματος για κάθε σενάριο καθώς και ο μέσος όρος των τιμών σε second. Είτε εστιάσουμε στις τιμές είτε στον μέσο όρο παρατηρούμε ότι στην αργή βάδιση έχουμε μεγαλύτερη διάρκεια στην βάδιση ενώ την μικρότερη χρονική περίοδο έχει το σενάριο της ταχείας βάδισης που είναι και το φυσιολογικό αποτέλεσμα. Τέλος στη φυσιολογική βάδιση περιμέναμε να δούμε τιμές ανάμεσα στο δεύτερο και τρίτο σενάριο.

	Μήκος βήματος - Φυσιολογική βάδιση (m)	Μήκος βήματος - Βάδιση μικρότερων βημάτων (m)	Μήκος βήματος - ταχύς βηματισμός (m)
	0.97	0.75	1.03
	1.04	0.77	1.11
	1.03	0.97	0.99
		1.02	0.91
		1.07	
		1.12	
M.O.	1.01	0.95	1.01

Πίνακας 2 Μήκος βημάτων για κάθε σενάριο

Παραπάνω παρουσιάζεται ο πίνακας με το μήκος κάθε βήματος για όλα τα σενάρια καθώς και ο μέσος όρος των βημάτων σε μέτρα. Το συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε, είναι ότι μεγαλύτερη ταχύτητα δεν σημαίνει και μεγαλύτερο μήκος βήματος απόλυτα. Σε αυτό το πίνακα φαίνεται ότι η φυσιολογική βάδιση με την ταχεία βάδιση έχουν τον ίδιο μέσο όρο μήκος βήματος. Επιπλέον αναμενόμενο είναι το αποτέλεσμα του δεύτερου σεναρίου αφού η βάδιση μικρότερων βημάτων συνεπάγεται με μικρότερο μήκος.

Συνεπώς το συμπέρασμα που μπορούμε να διαμορφώσουμε για το IMU bno055 με 9 βαθμούς ελευθερίας είναι η αξιοπιστία στον υπολογισμό των offsets και των μετρήσεων για όλους τους καταχωρητές (επιτάχυνση, euler, γραμμική επιτάχυνση κ.α.) και η λειτουργικότητα του σε σχέση με διαφορετικά IMU. Τέλος το σύστημα μας μπορεί να βελτιωθεί τόσο στο hardware όσο και στο software μελλοντικά.

7.1. Μελλοντικές επεκτάσεις

Μετά τη περάτωση της εργασίας μπορούμε να προτείνουμε κάποιες βελτιωτικές κινήσεις για την ανάπτυξη του συστήματος μας. Μία μελλοντική επέκταση που θα μπορούσε να εφαρμοστεί είναι η ενσωμάτωση ενός δεύτερου IMU στο παπούτσι του άλλου ποδιού. Με αυτό το τρόπο θα μπορούσαμε να συγχρονίσουμε τα βήματα και να έχουμε πιο αναλυτικά δεδομένα για την καταγραφή και αξιολόγηση της βάδισης. Η προσθήκη Bluetooth module και η ενεργειακή αυτονομία μέσω μπαταριών είναι μια σημαντική επέκταση για το σύστημα μας, επειδή η τροφοδοσία μέσω καλωδίου δυσχεραίνει την πειραματική διαδικασία του βαδιστή. Επιπλέον η προσθήκη αισθητήρων IR είναι απαραίτητη προσθήκη για τον υπολογισμό και την καταγραφή της απόστασης μεταξύ των δύο ποδιών κατά την κίνηση. Ο συνδυασμός όλων αυτών των επεκτάσεων θα βοηθήσει στην συλλογή αναλυτικότερων δεδομένων με αποτέλεσμα η συσκευή μας να θεωρηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα για την καταγραφή και αξιολόγηση της βάδισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τσιβγούλη, Σ. (2011). *Καταγραφή και ανάλυση κινησιομετρικών χαρακτηριστικών με στόχο την εκτίμηση του μυοσκελετικού συστήματος των αθλητών (Δημοσιευμένη Διδακτορική Διατριβή)*. Σχολή Επιστημών Υγείας Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- [2] Weijun T., Hutian F., Tao L., Rencheng Z. (2012). *Gait Analysis Using Wearable Sensors*. Open Access Sensors, pp. 2256-2258 doi: 10.3390/s120202255.
- [3] Robert, P. W. & Mark, D.M. (2010). *Kinematics and Kinetics of Gait*. Jay, D. (ed.), *Clinics in sports medicine*. (pp 347 -348). Ανακτήθηκε από research gate.
- [4] Παπάζογλου, Π. & Λιώνης, Π. (2015). *Ανάπτυξη εφαρμογών με το Arduino*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα
- [5] Καλοφώλιας, Δ. (2017). *Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή AVR ATmega328 με την χρήση της πλατφόρμας ARDUINO*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- [6] Jeremy, A. W. (2003). *Introduction to Applications and Industries for Microelectromechanical Systems (MEMS)*. Sandia National Laboratories p. 2-3.
- [7] Πατόνης, Φ. (2012). *Συνδυασμός των τεχνολογιών χαμηλού κόστους Αδρανειακών Μονάδων Μέτρησης και του Παγκόσμιου Δορυφορικού Συστήματος Πλοήγησης σε Εφαρμογές Φωτογραμμετρίας (Δημοσιευμένη Διδακτορική Διατριβή)*. Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [8] Βοσινάκης, Σ. (2015). *Εικονικοί Κόσμοι – Σύγχρονες Προσεγγίσεις, Εφαρμογές και Ανάπτυξη σε Περιβάλλον OpenSimulator*. Ανακτήθηκε από repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3189/1/02_chapter_2.pdf, pp. 10-12.
- [9] DFrobot. *SEN0253 Gravity BNO055 + BMP280 intelligent 10DOF AHRS*. Ανακτήθηκε από wiki.dfrobot.com
- [10] Bosch Sensortec (2016). *BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor*. Bosch Sensortec, Τεχνικό εγχειρίδιο BST-BNO055-DS000-14.
- [11] Hamed, A., Karim M., Behzad, B. (2012). *An Improved Signal Segmentation Using Moving Average and Savitzky – Golay Filter*. *Scientific Research Open Access*, doi: 10.4236/jsip.2012.31006. Ανακτήθηκε από scirp.org.

Ιστότοποι

[12] <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

[13] <https://www.arduino.cc/en/reference/wire>

[14] <https://www.mathworks.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑ ARDUINO

```
/*
    Πρότζεκτ Διπλωματικής εργασίας για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών Μηχανικών
    Πληροφορικής [9], [10], [13]

    Τίτλος: ΜΕΛΕΤΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΟΝ
    ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ, ΤΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΕΝΟΣ
    ΒΑΔΙΣΤΗ

    Σάββαρης Μιχαήλ-Άγγελος

    1/7/2020
*/

#include "DFRobot_BNO055.h" // Δήλωση βιβλιοθήκης για την λειτουργία του IMU

#include "Wire.h" // Δήλωση βιβλιοθήκης για την ενεργοποίηση και την επικοινωνία του
I2C πρωτοκόλλου μεταξύ του IMU και του Arduino

typedef DFRobot_BNO055_IIC    BNO;    // Δήλωση ενός αντικειμένου με το όνομα BNO

float time;

BNO    bno(&Wire, 0x28);    // Ενεργοποίηση της επικοινωνίας με το I2C πρωτόκολλο. Ο
καταχωρητής ενεργοποίησης του IMU είναι ο 0x28

/* Σε αυτή τη συνάρτηση γίνεται ένας αρχικός έλεγχος αν το IMU έχει λάβει τις σωστές
ρυθμίσεις, αν υπάρχουν errors

    και αν οι αισθητήρες λειτουργούν κανονικά και είναι έτοιμοι να πάρουν μετρήσεις.
    Η συνάρτηση αυτή καλείται στην βασική συνάρτηση αρχικοποίησης setup ().
*/

void printLastOperateStatus(BNO::eStatus_t eStatus)
{
    switch (eStatus) {
        case BNO::eStatusOK:    Serial.println("everything ok"); break;
        case BNO::eStatusErr:    Serial.println("unknow error"); break;
    }
}
```

```

    case BNO::eStatusErrDeviceNotDetect:    Serial.println("device not detected");
break;

    case BNO::eStatusErrDeviceReadyTimeOut: Serial.println("device ready time out");
break;

    case BNO::eStatusErrDeviceStatus:      Serial.println("device internal status
error"); break;

    default: Serial.println("unknow status"); break;

}
}

/* Στην setup () γίνονται οι αρχικοποιήσεις των συναρτήσεων των αισθητήρων αλλά και
η εκκίνηση της σειριακού πρωτοκόλλου με ρυθμό δεδομένων 115200 bit/sec

για να δούμε τα δεδομένα στο serial monitor του arduino IDE.

*/

void setup()
{
    Serial.begin(115200); // Αποστολή δεδομένων μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου για να
μπορέσουμε να δούμε τα αποτελέσματα στο serial monitor.

    bno.reset(); // Reset του IMU.

    // Σε αυτή τη μέθοδο επανάληψης παραμένει το πρόγραμμα μας σε περίπτωση που το IMU
δεν λειτουργεί σωστά την στιγμή της εκκίνησης.

    while (bno.begin() != BNO::eStatusOK) {

        Serial.println("bno begin faild");

        printLastOperateStatus(bno.lastOperateStatus);

        delay(2000);

    }

    // Αν δεν υπάρξει κάποιο πρόβλημα φεύγει από την μέθοδο επανάληψης και μας εκτυπώνει
στην σειριακή οθόνη ένα μήνυμα επιτυχούς εκκίνησης.

    Serial.println("bno begin success");

    bno.setPowerMode(BNO::ePowerModeNormal); // Σε αυτή τη συνάρτηση αρχικοποιείται
το Power mode σε normal.

    bno.setOprMode(BNO::eOprModeConfig); // Σε αυτή την συνάρτηση ορίζουμε τους
αισθητήρες μας σε config mode. Πρέπει να γίνει πριν το configuration του κάθε
αισθητήρα.

```

```

    bno.setAccPowerMode(BNO::eAccPowerModeNormal); // Σε αυτή τη συνάρτηση θέτουμε
το επιταχυνσιόμετρο σε normal mode

    bno.setGyrPowerMode(BNO::eGyrPowerModeNormal); // Σε αυτή τη συνάρτηση θέτουμε
το γυροσκόπιο σε normal mode

    bno.setMagPowerMode(BNO::eMagPowerModeForce); // Σε αυτή τη συνάρτηση θέτουμε
το μαγνητόμετρο σε force mode

// Configuration του επιταχυνσιόμετρου

    bno.setAccRange(BNO::eAccRange_2G); // Σε αυτή τη συνάρτηση θέτουμε την ευαισθησία
του επιταχυνσιόμετρου στα 2g.

    bno.setAccBandwidth(BNO::eAccBandwidth_31_25); // Σε αυτή τη συνάρτηση
ενεργοποιούμε το low pass filter που διαθέτει ο μικροελεγκτής του IMU και το ορίζουμε
σε συχνότητα αποκοπής στα 31.25 Hz.

    bno.setAccPowerMode(BNO::eAccPowerModeNormal); // Σε αυτή τη συνάρτηση ορίζουμε το
Power mode του accelerometer σε normal.

// Configuration του μαγνητόμετρου

    bno.setMagDataRate(BNO::eMagDataRate_30); // Σε αυτή τη συνάρτηση θέτουμε την
συχνότητα δειγματοληψίας στα 30 Hz.

    bno.setMagPowerMode(BNO::eMagPowerModeForce); // Σε αυτή τη συνάρτηση ορίζεται το
power mode του μαγνητόμετρου σε force.

    bno.setMagOprMode(BNO::eMagOprModeRegular); // Σε αυτή τη συνάρτηση ορίζεται η
λειτουργία του σε regular.

// Configuration του γυροσκοπίου

    bno.setGyrRange(BNO::eGyrRange_125); // Σε αυτή τη συνάρτηση ορίζεται η ευαισθησία
του γυροσκοπίου σε 125 deg/sec

    bno.setGyrBandwidth(BNO::eGyrBandwidth_32); // Ενεργοποίηση του low pass filter
στα 32 Hz.

    bno.setGyrPowerMode(BNO::eGyrPowerModeNormal); // Ενεργοποίηση του power mode σε
normal.

/*Σε αυτό το τμήμα κώδικα γίνεται η βαθμονόμηση των αισθητήρων για την μετάδοση
σωστών μετρήσεων.

    Οι τιμές που δίνονται σε κάθε αισθητήρα για κάθε άξονα είναι η μέγιστη τιμή του
συντελεστή κλίμακας (scale factor).

    Στις συναρτήσεις setAxisoffset λαμβάνεται το offset από κάθε άξονα για κάθε
αισθητήρα (accel, gyr, mag) και αφαιρείται από τις

    πραγματικές μετρήσεις των αισθητήρων.

```

```

*/
BNO::sAxisAnalog_t  sOffsetAcc;  // unit mg, members can't out of acc range
BNO::sAxisAnalog_t  sOffsetMag;  // unit ut, members can't out of mag range
BNO::sAxisAnalog_t  sOffsetGyr;  // unit dps, members can't out of gyr range

sOffsetAcc.x = 1;
sOffsetAcc.y = 1;
sOffsetAcc.z = 1;

sOffsetMag.x = 1;
sOffsetMag.y = 1;
sOffsetMag.z = 1;

sOffsetGyr.x = 1;
sOffsetGyr.y = 1;
sOffsetGyr.z = 1;

bno.setAxisOffset(BNO::eAxisAcc, sOffsetAcc);  // set offset
bno.setAxisOffset(BNO::eAxisMag, sOffsetMag);
bno.setAxisOffset(BNO::eAxisGyr, sOffsetGyr);

bno.setOprMode(BNO::eOprModeNdoF);  // Αφού κάνουμε το σωστό configure του IMU και
βαθμονομήσουμε τους αισθητήρες μέσω αυτής της συνάρτησης ενεργοποιούμε το operation
mode σε NdoF.
}

// Αυτή η συνάρτηση καλείται μέσα στην βασική συνάρτηση της loop() και σε αυτήν
εξάγονται οι τιμές για κάθε άξονα στην σειριακή οθόνη.
#define printAxisData(sAxis) \
    Serial.print(","); \
    Serial.print(sAxis.x ); \
    Serial.print(","); \
    Serial.print(sAxis.y); \
    Serial.print(","); \
    Serial.print(sAxis.z )

/* Η loop () είναι η συνάρτηση στην οποία εκτελείται ο ατέρμων βρόχος. Δηλαδή αν μπει

```


σε αυτή την συνάρτηση θα εκτελείται συνεχώς.

Σε αυτή τη συνάρτηση γίνεται η επεξεργασία και οι υπολογισμοί των αλγόριθμων της βιβλιοθήκης DFrobot για την λήψη των μετρήσεων

γραμμικής επιτάχυνσης, επιτάχυνσης, βαρύτητας, γωνιών euler, quaternions, γωνιακής ταχύτητας

και η μετάδοση των δεδομένων των αισθητήρων από τους καταχωρητές του imu στο arduino αλλά και η εμφάνιση των τιμών στην σειριακή οθόνη.

```
*/
```

```
void loop()
```

```
{
```

```
  BNO::sAxisAnalog_t  sAccAnalog, sMagAnalog, sGyrAnalog, sLiaAnalog, sGrvAnalog,  
  sAxis;
```

```
  BNO::sEulAnalog_t  sEulAnalog;
```

```
  BNO::sQuaAnalog_t  sQuaAnalog;
```

```
  sAccAnalog = bno.getAxis(BNO::eAxisAcc); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι  
  μετρήσεις από τους καταχωρητές του επιταχυνσιόμετρου με τον συντελεστή της βαρύτητας  
  σε mg.
```

```
  sMagAnalog = bno.getAxis(BNO::eAxisMag); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι  
  μετρήσεις από τους καταχωρητές του μαγνητόμετρου σε μΤ.
```

```
  sGyrAnalog = bno.getAxis(BNO::eAxisGyr); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι  
  μετρήσεις από τους καταχωρητές του γυροσκοπίου σε deg/sec.
```

```
  sLiaAnalog = bno.getAxis(BNO::eAxisLia); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι  
  μετρήσεις από τους καταχωρητές της γραμμικής επιτάχυνσης σε mg.
```

```
  sGrvAnalog = bno.getAxis(BNO::eAxisGrv); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι  
  μετρήσεις από τους καταχωρητές της βαρύτητας σε mg.
```

```
  sEulAnalog = bno.getEul(); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι μετρήσεις από  
  τους καταχωρητές των γωνιών euler σε deg.
```

```
  sQuaAnalog = bno.getQua(); // Σε αυτή τη συνάρτηση λαμβάνονται οι μετρήσεις από  
  τους καταχωρητές των quaternions.
```

```
  time = millis(); // Μέσω της συνάρτησης millis() λαμβάνουμε χρονικές τιμές για κάθε  
  μέτρηση των παραπάνω που λαμβάνουμε σε κάθε επανάληψη.
```

```
  Serial.print(time); // Εκτύπωση μετρήσεων χρόνου στην σειριακή οθόνη.
```

```
  // Σε αυτό το τμήμα κώδικα καλείται η συνάρτηση printAxisData που μας εμφανίζει  
  στην σειριακή οθόνη τις υπολογισμένες μετρήσεις για κάθε άξονα του κάθε αισθητήρα.
```

```
  printAxisData(sAccAnalog);
```

```
  printAxisData(sMagAnalog);
```

```

printAxisData(sLiaAnalog);

printAxisData(sGyrAnalog);

printAxisData(sGrvAnalog);

// Παρακάτω εμφανίζονται στην σειριακή οθόνη οι μετρήσεις προσανατολισμού. Δηλαδή
περιστροφές head, roll, pitch και quaternions.

Serial.print("eul analog: (unit degree)  ");
Serial.print(",");
Serial.print(sEulAnalog.head);
Serial.print(",");
Serial.print(sEulAnalog.roll);
Serial.print(",");
Serial.print(sEulAnalog.pitch);
Serial.print("qua analog: (no unit)      ");

Serial.print(",");
Serial.print(sQuaAnalog.w);
printAxisData(sQuaAnalog);

Serial.println();
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑ MATLAB

```
% Script για την εμφάνιση της επιτάχυνσης και στους 3 άξονες με φίλτρο
% moving average και χωρίς.[14]

%Μετατροπή των μονάδων μέτρησης από mg σε g

ax = ax * 0.001;
ay = ay * 0.001;
az = az * 0.001;

% Μετατροπή των μονάδων μέτρησης σε m/sec^2

ax = ax * 9.8;
ay = ay * 9.8;
az = az * 9,8;

% Μετατροπή του time από msec σε sec

time = time * 10^-3;

% reaxis τους άξονες διότι ο θετικός άξονας ήταν αντίθετος με την κίνηση
% της βάρδισης

az = az * (-1);

% Θέτουμε νέους πίνακες

fax=ax;
fay=ay;
faz=az;

% Μεταβλητή κλίσης για το moving average Filter

order=4;
ord=3;
```

```

% Καλούμε την συνάρτηση του φίλτρου
movingz_peaks = movingaveragesmooth2(faz,ord) ;
movingx = movingaveragesmooth2x(fax,order) ;
movingy = movingaveragesmooth2y(fay,order) ;
movingz = movingaveragesmooth2z(faz,order) ;

% Χρησιμοποιούμε την συνάρτηση ολοκλήρωσης με την μέθοδο τραπεζίου για να
% βρούμε την ταχύτητα.
vel = cumtrapz(time, movingz);

% Καλούμε την συνάρτηση adraneia_vel για να διαμορφώσουμε την αδράνεια της
% ταχύτητας
v = adraneia_vel(vel);

% Κάνουμε διπλή ολοκλήρωση για να βρούμε την θέση.
pos = cumtrapz(time,v);

% βρίσκουμε τις κορυφές μέσω της συνάρτησης findpeaks
[korufes, time_korufes]= findpeaks(movingz_peaks, time, 'MinPeakHeight',0.05);

% Θέτουμε NaN τιμές στις κορυφές που δεν σχετίζονται με heel strike ή
% toe off
for i = 1:length(korufes)
if korufes(i) >6
korufes(i) = NaN;
end
end
all_peak = korufes;

% Βρίσκουμε όσες τιμές είναι πάνω από 3 και τις μηδενίζουμε για να βρούμε
% τα heel strikes.
for j=1:length(korufes)
if korufes(j) >= 3

```

```

        korufes(j) = NaN;

    end

end

% Συνένωση των πινάκων για να αφαιρέσουμε τις NaN τιμές.
peak=[time_korufes, korufes];

% Αφαίρεση των NaN τιμών
peak(isnan(peak(:,2)),:) = [];

% Βρίσκουμε την χρονική διαφορά του κάθε heel strike.
diafora_peak_time = diff(peak(:,1));

% Βρίσκουμε τους δείκτες για την απόσταση του κάθε βήματος
vhma=[time,pos];
[mhkos_vhmatos, deikths_vhmatos]=intersect(vhma,peak);

% Εμφάνιση αποτελεσμάτων φιλτραρισμένων επιταχύνσεων x, y, z σε γραφήματα
subplot(3,1,1);
plot(time, movingx);
title('Acceleration X, Y, Z --- Moving Average Filter');
ylabel('m/sec^2');
legend('accel X');
subplot(3,1,2);
plot(time, movingy);
ylabel('m/sec^2');
legend('accel Y');
subplot(3,1,3);
plot(time, movingz);
xlabel('Time (sec)');
ylabel('m/sec^2');
legend('accel Z');

```

```

% Εμφάνιση αποτελεσμάτων αφιλτράριστων επιταχύνσεων x, y, z σε γραφήματα
figure(2)
subplot(3,1,1);
plot(time, ax);
title('Acceleration X, Y, Z --- No Filter');
ylabel('m/sec^2');
legend('accel X');
subplot(3,1,2);
plot(time, ay);
ylabel('m/sec^2');
legend('accel Y');
subplot(3,1,3);
plot(time, az);
xlabel('Time (sec)');
ylabel('m/sec^2');
legend('accel Z');

% Εμφάνιση αποτελεσμάτων ταχύτητας και θέσης στον άξονα της κίνησης Z.
figure(3)
subplot(3,1,1);
plot(time, vel);
title('Velocity & Position --- Άξονας Z');
ylabel('m/sec');
legend('velocity');
subplot(3,1,2);
plot(time, v);
title('Διαμορφωμένη Ταχύτητα');
ylabel('m/sec');
legend('filtered velocity');
subplot(3,1,3);
plot(time, pos);

```

```

title('Position');
xlabel('Time (sec)');
ylabel('m');
legend('pos');

% Εμφάνιση αποτελεσμάτων
figure(4)
subplot(3,1,1);
plot(time,movingz_peaks);
title('Acceleration Z axis');
ylabel('m/sec^2');
%plot(time, movingz);hold on
subplot(3,1,2);
plot(time, movingz_peaks);hold on
title('Κορυφές toe-off & heel strike');
ylabel('peaks');
plot(time_korufes, all_peak, '*', 'MarkerFaceColor', 'g');
subplot(3,1,3);
plot(time, movingz_peaks);hold on
title('Κορυφές heel strike');
ylabel('peaks');
xlabel('Time (sec)');
plot(time_korufes, korufes, 'x', 'MarkerFaceColor', 'r');

%----- Συνάρτηση moving average filter -----

function sV = movingaveragesmooth2x(fax,order)

% MOVINGAVERAGESMOOTH makes a smoothing of the given time series using a
% moving average filter of a given order. It makes use of the 'filtfilt'
% Matlab function and produces a time series of the same length as the
% given time series with the first and last maorder/2 values being somehow

```

```

n = length(fax);
fax = fax(:);
if order > 1
    b = ones(1,order)/order;
    sV = filtfilt(b,1,fax);
else
    sV = NaN*ones(n,1);
end

%----- Συνάρτηση adraneia_vel () -----

function v = adraneia_vel(vel)
% Συνάρτηση για τον μηδενισμό των δεδομένων που βρίσκονται σε περιόδους
% αδράνειας.
v = vel;
for i= 1:length(v)
    if v(i) < 0
        v(i) = 0;
    elseif (v(i) > 0) && (v(i) <= 0.10)
        v(i) = 0.01;
    elseif (v(i) > 0.10) && (v(i) <= 0.20)
        v(i) = 0.02;
    elseif (v(i) > 0.20) && (v(i) <= 0.30)
        v(i) = 0.03;
    elseif (v(i) > 0.30) && (v(i) <= 0.40)
        v(i) = 0.04;
    elseif (v(i) > 0.40) && (v(i) <= 0.60)
        v(i) = 0.05;
    elseif (v(i) > 0.60) && (v(i) <= 0.70)
        v(i) = 0.06;

```

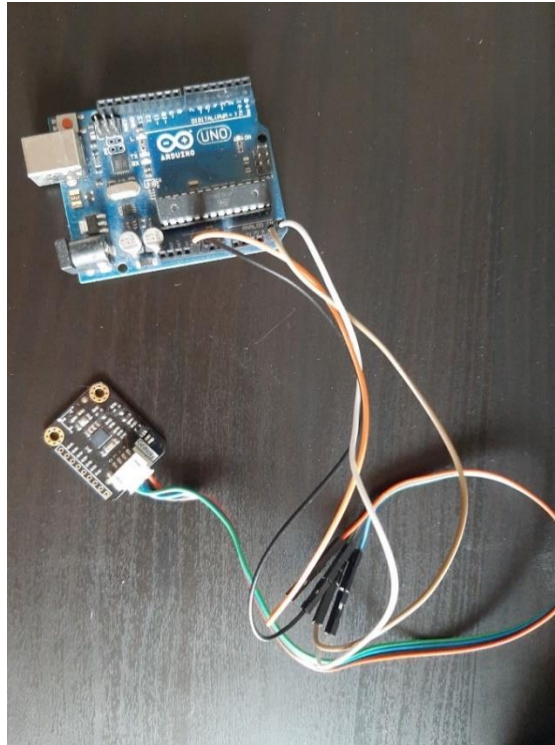


```
elseif (v(i) > 0.70) && (v(i) <=0.80)
    v(i) = 0.07;
elseif (v(i) > 0.80) && (v(i) <=0.90)
    v(i) = 0.08;
elseif (v(i) > 0.90) && (v(i) <=0.95)
    v(i) = 0.09;
elseif (v(i) > 0.95) && (v(i) <= 1)
    v(i) = 0.10;
elseif (v(i) > 1) && (v(i) <= 1.05)
    v(i) = 0.11;
elseif (v(i) > 1.05) && (v(i) <= 1.10)
    v(i) = 0.12;
elseif (v(i) > 1.10) && (v(i) <= 1.15)
    v(i) = 0.13;
elseif (v(i) > 1.15) && (v(i) <= 1.20)
    v(i) = 0.14;
elseif (v(i) > 1.20) && (v(i) <= 1.25)
    v(i) = 0.15;
elseif (v(i) > 1.25) && (v(i) <= 1.30)
    v(i) = 0.16;
elseif (v(i) > 1.30) && (v(i) <= 1.40)
    v(i) = 0.17;
elseif (v(i) > 1.40) && (v(i) <= 1.50)
    v(i) = 0.18;
elseif (v(i) > 1.50) && (v(i) <= 1.60)
    v(i) = 0.19;
elseif (v(i) > 1.60) && (v(i) <= 1.70)
    v(i) = 0.19;
end
```

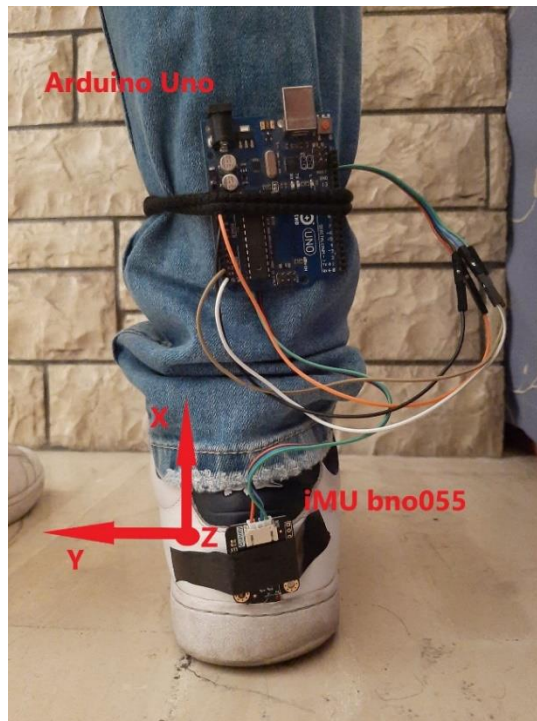
```
end
```

```
end
```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ



Εικόνα 75 Τελικό σύστημα



Εικόνα 76 Τελικό σύστημα ενσωματωμένο στον βαδιστή