



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΙΜUs
ΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΒΑΔΙΣΜΑ**

Δρογώσης Ανάργυρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Ένα πολύ ευρύ και πάντοτε επίκαιρο πεδίο έρευνας, ειδικά στην εποχή της ακμής της ρομποτικής, των προσθετικών μελών αλλά και των ιατρικών συσκευών, αποτελεί η μελέτη του δίποδου και δη του ανθρώπινου βαδίσματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το βάδισμα του ανθρώπου παρουσιάζουν οι διάφορες φάσεις του και κυρίως ο τρόπος με τον οποίο το πέλμα έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αλλά και η συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς, επιτρέπουν την υλοποίηση καινοτόμων διατάξεων και αλγορίθμων ανάλυσης. Το «Internet of Things», το «BLE», τα «Big Data» και οι «Wearable» συσκευές, αποτελούν τις βασικές επίκαιρες τεχνολογίες – λέξεις κλειδιά, των οποίων γίνεται χρήση στην παρούσα εργασία, για την ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος, εστιάζοντας στην κρούση του πέλματος με το έδαφος (Heel Strike).

Για το τεχνολογικό κομμάτι, διερευνήθηκε η χρήση τριών ασύρματων αισθητήριων συσκευών της Dialog Semiconductors, οι οποίες διαθέτουν γυροσκόπιο και επιταχυνσιόμετρο και επικοινωνούν ταυτόχρονα με ένα κινητό τηλέφωνο μέσω πρωτοκόλλου επικοινωνίας Bluetooth Low Energy (BLE). Για την φορητότητα της όλης διάταξης, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα μοντέλο εύκολης πρόσδεσης δυο αισθητήρων στα πέλματα και ενός στη μέση, ενώ για τη σύνδεση και ανάγνωση των αισθητήρων αναπτύχθηκε μια εφαρμογή κινητού τηλεφώνου στο περιβάλλον ανάπτυξης EnoThings. Για την αποθήκευση και ανάκτηση των μετρήσεων, δημιουργήθηκαν δυο διαφορετικές βάσεις δεδομένων, μια τεχνολογίας SQL ενσωματωμένη στον Η/Υ όπου γίνεται η ανάλυση, και μια τεχνολογίας No-SQL σε Cloud Server. Οι λήψεις των μετρήσεων έγιναν κατά το βάδισμα ανθρώπου πάνω σε ηλεκτρικό διάδρομο ρυθμιζόμενης ταχύτητας.

Σε ότι αφορά το κομμάτι της ανάλυσης των δεδομένων, υλοποιήθηκε ένα σύνολο αλγορίθμων στο υπολογιστικό περιβάλλον Matlab. Ένας αλγόριθμος ανάκτησης επικοινωνεί με τη βάση δεδομένων και καταχωρεί τα αποθηκευμένα δεδομένα σε πίνακες για περαιτέρω ανάλυση. Στη συνέχεια, ένας ευριστικός αλγόριθμος αναγνωρίζει τα βασικά γεγονότα βαδίσματος (gait events) αναλύοντας τις μετρήσεις της γωνιακής ταχύτητας και των επιταχύνσεων, με αποτέλεσμα τη διακριτοποίηση του βαδίσματος σε τέσσερις βασικές φάσεις. Η τελική ανάλυση συσχετίζει τις επιταχύνσεις των πελμάτων και της μέσης κατά στη φάση του Heel Strike, κάνοντας χρήση των μεθόδων του *System Identification Toolbox* του Matlab. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός απλοποιημένου μοντέλου ελατηρίου-αποσβεστήρα υποδεικνύει την τάξη του συστήματος. Επίσης, για την πληρότητα της εργασίας εξετάζονται συστήματα μεγαλύτερης τάξης ως προς την προσαρμογή τους στα πειραματικά δεδομένα. Τελικά, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά στην πολυπλοκότητα των μοντέλων που επιχειρούν να περιγράψουν το ανθρώπινο βάδισμα.

Abstract

A very wide and always up-to-date field of research, especially in the age of robotics, prosthetic limbs and medical devices, is the study of bipedal and more specifically human walking. Of particular interest for the human walking are the gait phases and especially the way the foot contacts the ground. The development of new technologies and the constantly increasing computational power allow the implementation of innovative devices and analysis algorithms. The "Internet of Things", "BLE", "Big Data" and "Wearable" devices, are the key current technologies - keywords used in this work to analyze human walking, focusing on Heel Strike phase.

For the technological part, three Dialog Semiconductor wireless sensors have been employed, equipped with a gyroscope and an accelerometer. All communicate simultaneously with a mobile phone, using the Bluetooth Low Energy (BLE) communication protocol. For the wearability of the sensors, an easy-to-attach wearable model was designed in order to hold a sensor at each foot and one at the waist of the user. For the connection and reading of the sensors a mobile phone application was developed in EvoThings development environment. For measurements storage and retrieval, two databases were created, an SQL technology database embedded in the PC where the analysis was performed, and a No-SQL technology database on a Cloud Server. The measurements were taken in the course of a subject walking on an electrical treadmill of adjustable speed.

As for data analysis, a set of algorithms was implemented in Matlab computing environment. A recovery algorithm communicates with the database and records the stored data in tables for further analysis. Then, a heuristic algorithm recognizes the most significant gait events by analyzing angular velocity and acceleration measurements, resulting in the classification of walking in four basic phases. The final analysis associates the foot and waist accelerations during the the Heel Strike phase, using Matlab's System Identification Toolbox methods. The transfer function of a simplified spring-damper model indicates the order of the system. For the completeness of the work, higher order systems are examined as to their adaptation to the experimental data. Ultimately, useful conclusions are drawn regarding the complexity of models that attempt to describe human walking.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσης εργασίας, κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη αυτής, για την αστείρευτη πηγή γνώσης και λύσεων που μου παρείχε και για την τιμή που μου έκανε το να συνεργαστεί μαζί μου ένας επιστήμονας διεθνούς βεληνεκούς.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέποντα μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Γεώργιο Μπέρτο, που με τη διορατικότητά του και τη βαθιά του εξειδίκευση στον τομέα του ανθρώπινου βαδίσματος, συνέβαλλε στην ανάπτυξη του θέματος και στην περαίωση της παρούσης εργασίας.

Στη συνέχεια, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στη συνάδελφο μηχανικό και φίλη μου, Κατερίνα Σμυρλή, με την οποία συναπασχολούμενοι στον τομέα του δίποδου βαδίσματος ανταλλάξαμε πλούτο πληροφοριών, ιδεών αλλά και οράματος σε ό,τι αφορά την έρευνα συνολικότερα.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά το συνάδελφο μηχανικό και φίλο μου Γιάννο Αγγελόπουλο, για την πολύτιμη συνεισφορά του στην υλοποίηση της βάσης δεδομένων της εργασίας αυτής, καθώς επίσης και το φίλο μου Τάσο Καχριμάνη για τις πολύτιμες πληροφορίες στον τομέα των Big Data.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τους Αλέξιο Μίση και Γεώργιο Χαρκοφτάκη της Dialog Semiconductors, που αποκρίθηκαν με αμεσότητα και επαγγελματισμό σε κάθε ερώτημά μου σχετικά με το προϊόν που αντιπροσωπεύουν.

Ευχαριστίες επίσης σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου CSL (Control Systems Lab) του κυρίου Ε.Παπαδόπουλου, για το πολύ ζεστό κλίμα, φιλία και βοήθεια σε εργαστηριακό εξοπλισμό αλλά και γνώσεις, οι οποίοι έκαναν την εκπόνηση της παρούσης εργασίας μια ενδιαφέρουσα και διασκεδαστική διαδρομή.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την πίστη τους σε εμένα και τη στήριξή τους όλα τα χρόνια της ζωής μου.

Αφιερώνεται στους γονείς μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων	12
Κατάλογος Συντημήσεων	13
1 Εισαγωγή	14
1.1 Σκοπός Εργασίας	14
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	15
1.3 Δομή Εργασίας	17
2 Στοιχεία Θεωρίας	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Σύστημα Αξόνων - Συντεταγμένων	18
2.3 Φάσεις Βαδίσματος	19
2.4 Μηχανική Αντίσταση Βαδίσματος – Δυσκαμψία ποδιού	23
2.5 Αναγνώριση Συστήματος (System Identification)	25
3 Τεχνολογίες Υλοποίησης Πειραμάτων	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.2 MEMS (Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα – Micro-Electro-Mechanical Systems)	27
3.3 Μονάδα Αδρανειακής Μέτρησης (Inertial Measurement Unit - IMU)	27
3.4 Επιταχυνσιόμετρα	28
3.5 Γυροσκόπια	35
3.6 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)	37
3.7 Τεχνολογία Bluetooth και Bluetooth Low Energy	38
3.8 Βάσεις Δεδομένων	45
4 Υλοποίηση Πειραματικής Διάταξης	49
4.1 Εισαγωγή	49
4.2 Τοπολογία πειραματικής διάταξης	49
4.3 Αισθητήρας Dialog IoT	50
4.4 Περιβάλλον Ανάπτυξης SmartBond DA14583 IoT	55
4.5 Δημιουργία και Διαχείριση Βάσης Δεδομένων	66
4.6 Εφαρμογή Κινητού Τηλεφώνου	71
4.7 Διατάξεις Πρόσδεσης Αισθητήρων	84
4.8 Ηλεκτρικός διάδρομος	87
5 Ανάλυση Δεδομένων Μετρήσεων και Αναγνώριση Φάσεων Κύκλου Βάδισης	88
5.1 Εισαγωγή	88
5.2 Σύστημα Συντεταγμένων	88

5.3	Ανάκτηση δεδομένων από τις Βάσεις Δεδομένων στο Matlab	89
5.4	Αξιολόγηση δεδομένων – Επιλογή μετρήσεων	92
5.5	Εξομάλυνση χρονικών σημείων (timestamps).....	96
5.6	Αναγνώριση φάσεων βαδίσματος.....	97
6	Αναγνώριση Συστήματος	104
6.1	Λήψη Μέρους Σημάτων Επιτάχυνσης / Ζεύγη Εισόδων – Εξόδων.....	104
6.2	Εφαρμογή Μεθόδων Αναγνώρισης Συστήματος.....	107
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	120
7.1	Συμπεράσματα	120
7.2	Μελλοντική Εργασία	121
8	Βιβλιογραφία.....	123
9	Παράρτημα Α: «Κώδικες».....	126

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1.	Ο κανόνας του δεξιού χεριού: (α) Ορισμός κατεύθυνσης αξόνων, (β) Συμβατική κατεύθυνση του άξονα περιστροφής [43].	18
Σχήμα 2-2.	Συντεταγμένες κανόνα «δεξιού χεριού» στα δεξιά και «αριστερού χεριού» στα αριστερά [43].	19
Σχήμα 2-3.	Τα δυο βασικά τμήματα του κύκλου βαδίσματος [26].	20
Σχήμα 2-4.	Ορισμός Διασκελισμού και Βήματος [26].	20
Σχήμα 2-5.	Οι φάσεις Στάσης και Αιώρησης ενός κύκλου βαδίσματος [26].	20
Σχήμα 2-6.	Οι φάσεις της Φάσης Στάσης: (α) Αρχική Επαφή, (β) Απόκριση Φόρτωσης, (γ) Μέση Στάση, (δ) Τερματική Στάση [26].	22
Σχήμα 2-7.	Διαστήματα και διάρκεια του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος [20].	22
Σχήμα 2-8.	(α) Μοντέλο βαδίσματος μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα [30], (β) Μοντέλο βαδίσματος ελατηρίου-αποσβεστήρα με ημικυκλικά πέλματα [12].	23
Σχήμα 2-9.	Μοντέλο 2 ^{ης} τάξης μηχανικής αντίστασης ενός ποδιού.	24
Σχήμα 2-10.	Black Box Modeling.	25
Σχήμα 3-1.	Σχηματική επεξήγηση λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου [55].	29
Σχήμα 3-2.	(α) Μηχανικό μοντέλο ενός επιταχυνσιόμετρου, (β) Διάγραμμα ελεύθερου σώματος μιας μάζας [9].	29
Σχήμα 3-3.	Διάγραμμα Συχνοτήτων για ένα επιταχυνσιόμετρο [9]. Η μέτρηση είναι αξιοποιήσιμη έως τη συχνότητα f_{ref} .	30
Σχήμα 3-4.	(α) Ένα Χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με διαφορικό πυκνωτή, (β) Κάτοψη μιας σεισμικής μάζας υποστηριζόμενης από 4 ελατήρια [9].	31
Σχήμα 3-5.	Απλοποιημένο κύκλωμα για έναν μετατροπέα χωρητικότητας σε τάση [9].	32
Σχήμα 3-6.	Απλοποιημένη αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου παραμόρφωσης (strain).	33
Σχήμα 3-7.	Απλοποιημένη δομική ανάλυση ενός επιταχυνσιόμετρου Μέτρησης Παραμόρφωσης.	33
Σχήμα 3-8.	Η βασική σχηματική απεικόνιση ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου [9].	34
Σχήμα 3-9.	(α) Τομή του θερμαινόμενου μέρους, (β) Όψη ενός σχεδίου χωρίς οροφή [9].	34
Σχήμα 3-10.	(α) Μηχανικό γυροσκόπιου ενός βαθμού ελευθερίας, (β) Σύγχρονο γυροσκόπιο αυτόματου πιλότου [9].	35
Σχήμα 3-11.	Γυροσκόπιο συχνότητας δόνησης [9].	36
Σχήμα 3-12.	(α) Αισθητήρας fiber optic ring resonator και (β) fiber optic analog coil [9].	36
Σχήμα 3-13.	Internet of Things (IoT) [62].	37
Σχήμα 3-14.	Τα επίπεδα του BLE Protocol Stack [61].	42
Σχήμα 3-15.	Καταστάσεις του Link Layer [61].	42
Σχήμα 3-16.	Παραδείγματα εντολών SQL [57].	46
Σχήμα 3-17.	Παράδειγμα δομής μιας NoSQL βάσης δεδομένων [46].	47
Σχήμα 4-1.	Τοπολογία πειραματικής διάταξης.	49
Σχήμα 4-2.	Η συσκευή IoT της Dialog Semiconductors [62].	51
Σχήμα 4-3.	Dialog Wearable Service (DWS): Μονάδες μέτρησης αισθητήρων [58].	51
Σχήμα 4-4.	Block diagram του Dialog IoT Sensor [62].	52
Σχήμα 4-5.	Τα βασικά δομικά στοιχεία της πλατφόρμας DA1458x [61].	52
Σχήμα 4-6.	Το προγραμματιστικό περιβάλλον Keil 5 της μVision.	56
Σχήμα 4-7.	Αρχιτεκτονική προγράμματος αισθητήρων [58].	56

Σχήμα 4-8.	Ροή της εφαρμογής αισθητήρα IoT [62].	57
Σχήμα 4-9.	Γραμμή εντολών Keil5 – Build [60].	64
Σχήμα 4-10.	Εξαρτήματα και λειτουργίες της πλακέτας DA14583 [60].	64
Σχήμα 4-11.	Σύνδεση για Download προγράμματος στον αισθητήρα [62].	65
Σχήμα 4-12.	Επιλογή προγράμματος στο SmartSnippets Toolbox [62].	65
Σχήμα 4-13.	Εντολές για το SPI στο SmartSnippets Toolbox [62].	66
Σχήμα 4-14.	Το Virtual Machine της Oracle.	66
Σχήμα 4-15.	Βάση δεδομένων InfluxDB.	67
Σχήμα 4-16.	Γραφική απεικόνιση δεδομένων σε γραφήματα InfluxDB - Grafana	69
Σχήμα 4-17.	Παράδειγμα ενός «document» της MongoDB.	70
Σχήμα 4-18.	Το διαδικτυακό περιβάλλον χρήσης της MongoDB – επισκόπηση «Collection»	71
Σχήμα 4-19.	Το κινητό τηλέφωνο Motorola Moto G5 Plus [45].	71
Σχήμα 4-20.	(α) Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Enothings στον Η/Υ, (β) Ο Viewer του Enothings στο κινητό τηλέφωνο.	72
Σχήμα 4-21.	Φόρτωση της εφαρμογής στο κινητό τηλέφωνο.	73
Σχήμα 4-22.	Δομή εφαρμογής κινητού τηλεφώνου.	73
Σχήμα 4-23.	Κομμάτι του Κώδικα – Περιβάλλον προγραμματισμού «Sublime»	82
Σχήμα 4-24.	Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής κινητού τηλεφώνου.	83
Σχήμα 4-25.	Πεδίο Μηνυμάτων - Ψάχνοντας για Bluetooth αισθητήρες.	83
Σχήμα 4-26.	Μήνυμα σύνδεσης εφαρμογής με αισθητήρα IOT.1.	83
Σχήμα 4-27.	Εφαρμογή κινητού τηλεφώνου σε πλήρη λειτουργία.	84
Σχήμα 4-28.	Κομβίο και μήνυμα αποσύνδεσης αισθητήρων.	84
Σχήμα 4-29.	Τοποθέτηση αισθητήρων - οπίσθια όψη χρήστη [47].	85
Σχήμα 4-30.	Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στο παπούτσι (πλάγια όψη).	85
Σχήμα 4-31.	Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στο παπούτσι (επιμέρους στοιχεία).	85
Σχήμα 4-32.	Τοποθέτηση αισθητήρα στο παπούτσι (λεπτομέρεια - άξονες).	86
Σχήμα 4-33.	Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στη μέση. (α) Γενική εικόνα, (β) Λεπτομέρεια Velcro.	86
Σχήμα 4-34.	Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στη μέση (επιμέρους στοιχεία).	87
Σχήμα 4-35.	Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στη μέση (τοποθέτηση - άξονες).	87
Σχήμα 4-36.	Ο ηλεκτρικός διάδρομος γυμναστικής της εταιρίας York Fitness [39].	87
Σχήμα 5-1.	Τοπικό Σύστημα Συντεταγμένων Αισθητήρα (Sensor). Με «a» συμβολίζεται η επιτάχυνση, ενώ με «g» η γωνιακή ταχύτητα.	88
Σχήμα 5-2.	Σωματόδετο Σύστημα Συντεταγμένων (Body). Με «a» συμβολίζεται η επιτάχυνση, ενώ με «g» η γωνιακή ταχύτητα.	89
Σχήμα 5-3.	Επιταχύνσεις ως προς το χρόνο (Raw Data).	90
Σχήμα 5-4.	Γωνιακές Ταχύτητες ως προς το χρόνο (Raw Data).	91
Σχήμα 5-5.	Μετρήσεις όπου κάποιες έχουν το ίδιο timestamp.	92
Σχήμα 5-6.	Ασυνέχειες στις μετρήσεις.	93
Σχήμα 5-7.	Χειροκίνητη τελική επιλογή εύρους σήματος.	93
Σχήμα 5-8.	Κλίση χρόνου – Ιδανική τομή τέλους σημάτων.	95
Σχήμα 5-9.	Επιταχύνσεις – Γωνιακές Ταχύτητες (Επιλεγμένα Σήματα – Μη ομαλός χρόνος).	95
Σχήμα 5-10.	Κλίση χρόνου επιλεγμένων σημάτων.	96
Σχήμα 5-11.	Επιταχύνσεις – Γωνιακές Ταχύτητες (Επιλεγμένα Σήματα – Ομαλός χρόνος).	97

Σχήμα 5-12.	Εύρεση ελαχίστων τιμών γωνιακής ταχύτητας – Αποφυγή ψευδογεγονότων.	98
Σχήμα 5-13.	Εύρεση ελαχίστων – μέγιστων τιμών γωνιακής ταχύτητας για αναγνώριση Heel Strike (Δεξί Πέλημα).	98
Σχήμα 5-14.	Εσφαλμένη αναγνώριση Heel Strike (Δεξί Πέλημα).	99
Σχήμα 5-15.	Αναγνώριση Heel Strike (Δεξί Πέλημα).	99
Σχήμα 5-16.	Αναγνώριση Flat Foot (Δεξί Πέλημα).	100
Σχήμα 5-17.	Αναγνώριση Heel Off (Δεξί Πέλημα).	101
Σχήμα 5-18.	Εύρεση ελαχίστων – μέγιστων τιμών γωνιακής ταχύτητας για αναγνώριση Toe Off (Δεξί Πέλημα).	102
Σχήμα 5-19.	Αναγνώριση Toe Off (Δεξί Πέλημα).	102
Σχήμα 5-20.	Οι βασικές φάσεις του βαδίσματος (Δεξί Πέλημα) – με παράθεση φάσεων βαδίσματος από βιβλιογραφία [20].	103
Σχήμα 6-1.	Τομές σημάτων ποδιού και μέσης για Αναγνώριση Συστήματος (Δεξί Πέλημα).	104
Σχήμα 6-2.	Λήψη μέρους σήματος ποδιού για Αναγνώριση Συστήματος (Δεξί Πέλημα).	105
Σχήμα 6-3.	Λήψη μέρους σήματος μέσης για Αναγνώριση Συστήματος (για το Δεξί Πέλημα).	105
Σχήμα 6-4.	Ανόρθωση μέσης για επαναφορά στην αρχική της θέση.	106
Σχήμα 6-5.	Επιλεγμένα ζεύγη σημάτων δεξιού ποδιού και μέσης για System ID.	106
Σχήμα 6-6.	Περιβάλλον εργασίας του System Identification Toolbox του Matlab.	107
Σχήμα 6-7.	Αποτελέσματα του System Identification Toolbox του Matlab.	107
Σχήμα 6-8.	Working Data για εφαρμογή μεθόδων System ID (HS-FF, Δεξί Πέλημα).	108
Σχήμα 6-9.	Validation Data για εφαρμογή μεθόδων System ID (HS-FF, Δεξί Πέλημα).	108
Σχήμα 6-10.	Σύγκριση εξόδου ζεύγους Working Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2 ^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (HS-FF).	110
Σχήμα 6-11.	Σύγκριση εξόδου ζεύγους Validation Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2 ^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (HS-FF).	110
Σχήμα 6-12.	Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς 2 ^{ης} τάξης από Heel Strike μέχρι Flat Foot (x=πόλοι, o= μηδενιστές).	111
Σχήμα 6-13.	Σύγκριση εξόδου ζεύγους Working Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 4 ^{ης} τάξης με τέσσερις πόλους και τέσσερις μηδενιστές (HS-FF).	112
Σχήμα 6-14.	Σύγκριση εξόδου ζεύγους Validation Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 4 ^{ης} τάξης με τέσσερις πόλους και τέσσερις μηδενιστές (HS-FF).	112
Σχήμα 6-15.	Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς 4 ^{ης} τάξης από Heel Strike μέχρι Flat Foot (x=πόλοι, o= μηδενιστές).	113
Σχήμα 6-16.	Επιλεγμένα ζεύγη σημάτων ποδιού και μέσης για Αναγνώριση Δυσκαμψίας Ποδιού (Δεξί Πόδι).	114
Σχήμα 6-17.	Working Data για εφαρμογή μεθόδων System Identification (IC, Δεξί Πέλημα).	115
Σχήμα 6-18.	Validation Data για εφαρμογή μεθόδων System Identification (IC, Δεξί Πέλημα).	115
Σχήμα 6-19.	Σύγκριση εξόδου ζεύγους Working Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2 ^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (IC).	116
Σχήμα 6-20.	Σύγκριση εξόδου ζεύγους Validation Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2 ^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (IC).	117
Σχήμα 6-21.	Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς Συνεχούς Χρόνου 2 ^{ης} τάξης κατά την αρχική επαφή (Initial Contact) του ποδιού με το έδαφος (x=πόλοι, o=μηδενιστές).	118

Σχήμα 6-22. Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς Διακριτού Χρόνου 2^{ης} τάξης κατά την αρχική επαφή (Initial Contact) του ποδιού με το έδαφος (x =πόλοι, o =μηδενιστές).119

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Παράδειγμα δομής σχεσιακής βάσης δεδομένων.....	45
Πίνακας 4-1. Μέγιστος αριθμός πακέτων αποστολής / λήψης ανά χρονικό διάστημα (interval) σύνδεσης [59].....	59
Πίνακας 4-2. Διατηρούμενος ρυθμός αποστολής / λήψης δεδομένων ανα χρονικό διάστημα (interval) σύνδεσης [59].....	60
Πίνακας 4-3. Δομή και μέγεθος αναφορών για το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο και το μαγνητόμετρο [62].....	61
Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά Dialog Service [58].....	62
Πίνακας 4-5. Βασικές παράμετροι διαμόρφωσης αισθητήρα [62].....	63
Πίνακας 5-1. Συχνότητες δειγματοληψίας επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων.....	96
Πίνακας 6-1. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την ARX (HS-FF).	109
Πίνακας 6-2. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την TFest (HS-FF).	109
Πίνακας 6-3. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την ARX (IC).	116
Πίνακας 6-4. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την TFest (IC).	116

Κατάλογος Συντμήσεων

API	= Application Programming Interfaces
APK	= Android Package Kit
ATT	= Attribute Protocol
BE	= Βαθμοί Ελευθερίας
BLE	= Bluetooth Low Energy
BR	= Basic Rate
CIB	= Communication Interface Board
DB	= DataBase
EC	= End Contact
EDR	= Enhanced Data Rate
EMG	= Electromyography
FF	= Flat Foot
FFT	= Fast Fourier Transform
FIFO	= First In First Out
FTDI	= Future Technology Devices International
GAP	= Generic Access Profile
GATT	= Generic Attribute Profile
GPIO	= General-purpose input / output
H/Y	= Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
HCI	= Host Controller Interface
HID	= Human Interface Device
HO	= Heel Off
HS	= Heel Strike
HTTP	= HyperText Transfer Protocol
IC	= Initial Contact
I2C	= Inter-integrated Circuit
ID	= Identification
IDE	= Intergrated Development Environment
IMU	= Inertial Measurement Unit
IoT	= Internet of Things
LL	= Link Layer
L2CAP	= Logical Link Control and Adaptation Protocol
MAC	= Media Access Control
MEMS	= Micro-Electro-Mechanical Systems
OTP	= One Time Programmable
PCB	= Printed Circuit Board
PHY	= Physical Layer
RF	= Radio Frequency
RX	= Receive
SDIO	= Secure Digital Input Output
SDK	= Software Development Kit
SFL	= Sensor Fusion Library
SISO	= Single Input Single Output
SM	= Security Manager
SMP	= Security Manager Protocol
SPI	= Serial Peripheral Interface bus
SQL	= Structured Query Language
SRAM	= Sys-RAM
TO	= Toe Off
TX	= Transmit
UART	= Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
USB	= Universal Serial Bus
WLAN	= Wireless Local Area Network

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό τη χρήση νέων τεχνολογιών για την ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος, εστιάζοντας στην κρούση του πέλματος με το έδαφος. Ένα από τα βασικά προβλήματα τέτοιων αναλύσεων είναι η χρήση ενσύρματων, πολύπλοκων και κοστοβόρων διατάξεων, οι οποίες βρίσκονται συνήθως σε εργαστηριακό περιβάλλον. Τα βασικά θέματα που εξετάζονται στην εργασία αυτή είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας πλήρως ασύρματης και φορέσιμης πειραματικής διάταξης χαμηλού κόστους, προσιτής στο μέσο χρήστη, και ένας αυτοματοποιημένος αλγόριθμος ανάλυσης, χωρίς την ανάγκη χρήσης πολλών διαφορετικών δεδομένων εισόδου.

Για την ανάλυση του βαδίσματος, συνήθως χρησιμοποιούνται διατάξεις με κάμερες υψηλής ταχύτητας λήψης και αισθητήρες δύναμης στα πέλματα, σε συνδυασμό με ενσύρματα επιταχυνσιόμετρα και γυροσκοπία. Τα δεδομένα είτε αποθηκεύονται σε κάρτες SD, με αποτέλεσμα τη δυσκολία στην ανάκτηση των δεδομένων, είτε μεταφέρονται με καλώδιο σε έναν Η/Υ, γεγονός που καθιστά το χρήστη δυσκίνητο και περιορισμένο σε συγκεκριμένο χώρο χρήσης. Στην παρούσα εργασία, τα IMUs και η ασύρματη διάταξη που χρησιμοποιούνται και η εφαρμογή κινητού τηλεφώνου που αναπτύχθηκε, επιτρέπουν την αποστολή δεδομένων απευθείας στον Η/Υ όπου γίνεται η ανάλυση, και προσδίδουν στο χρήστη απεριόριστη ελευθερία κινήσεων σε οποιονδήποτε επιθυμητό χώρο επιλογής του. Επίσης, η τεχνολογία BLE των αισθητήρων αυξάνει κατά πολύ τη χρονική διάρκεια λήψης μετρήσεων και καθιστά αυτές τις συσκευές IMU εξαιρετικά πιο ελαφρές, λόγω της λειτουργίας τους με μια απλή μπαταρία coin cell.

Η διάταξη πρόσδεσης στο παπούτσι και στη μέση έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εξαιρετικά απλή στη χρήση και να μπορεί να αφαιρεθεί, χωρίς την απαίτηση μόνιμης προσκόλλησης του αισθητήρα, όπως συμβαίνει σε άλλες σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Επίσης, η πρόσδεση των αισθητήρων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από απόσβεση ή πρόσθεση επιπλέον κραδασμών εξ' αιτίας αυτής καθαυτής της διάταξης.

Σε ότι αφορά την αναγνώριση των φάσεων του βαδίσματος, στην εργασία αυτή υλοποιήθηκε ένας ευριστικός αλγόριθμος κάνοντας χρήση κυρίως των γωνιακών ταχυτήτων των πελμάτων, με αποτέλεσμα την αποφυγή πολύπλοκων μετρητικών διατάξεων αλλά και την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος και του χρόνου ανάλυσης.

Ένας από τους στόχους αυτής της εργασίας, είναι η εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς που διέπει το πόδι κατά την κρούση με το έδαφος (Heel Strike) χρησιμοποιώντας μόνο τις επιταχύνσεις του πέλματος και της μέσης που συμμετέχουν σε αυτή τη φάση, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μέχρι πρότινος απαιτούμενων διατάξεων και την απλοποίηση της όλης διαδικασίας ανάλυσης, με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σε τελική ανάλυση, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη μαθηματική περιγραφή του δίποδου βαδίσματος και στην αναγνώριση των χαρακτηριστικών παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου σε υγιείς ανθρώπους, με απώτερο στόχο τον εντοπισμό προβλημάτων κατά το βάδισμα ενός πιθανός

ασθενούς ανθρώπου και την παραμετροποίηση του δίποδου βαδίσματος για χρήση σε ιατρικές συσκευές και σχεδιασμό προσθετικών μελών.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης από πληθώρα ερευνητικών ομάδων. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση του κύκλου βάδισης και η μελέτη της δυσκαμψίας του ποδιού, έχουν συμβάλει στη βελτίωση του βαδίσματος των δίποδων ρομπότ, στην αναγνώριση παθήσεων ορθοπεδικής φύσης στον άνθρωπο, αλλά και στην κατασκευή τεχνητών προσθετικών κάτω άκρων. Επίσης, οι διάφορες μέθοδοι λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων και η τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων, έχουν βελτιώσει την ποιότητα των δεδομένων και την ευκολία ανάκτησής τους. Οι αρχικές θεωρητικές μελέτες, εμπλουτιζόμενες διαρκώς από νέα στοιχεία, και η εν συνεχεία πειραματική τους επικύρωση, έχουν συντελέσει στην τεχνολογική ανάπτυξη και διαρκή βελτίωση των ρομπότ με πόδια βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα ζωής πολλών ανθρώπων με κινητικά προβλήματα.

Το 1992, η Perry μελέτησε το ανθρώπινο βάδισμα και έθεσε τις κατευθυντήριες γραμμές για την κατηγοριοποίηση των φάσεων του βαδίσματος και τη διάκριση μεταξύ φυσιολογικού και παθολογικού τρόπου περπατήματος [26]. Με την ανάπτυξη των φορητών αισθητήρων να διευκολύνουν τη λήψη μετρήσεων, σχεδιάστηκαν διάφορες μέθοδοι αναγνώρισης των φάσεων του βαδίσματος, κάνοντας χρήση επιταχυνσιόμετρων, γυροσκοπίων και αισθητήρων δύναμης. Το 2002, οι Auvinet et al. αναγνώρισαν φάσεις του ανθρώπινου βαδίσματος από τις επιταχύνσεις της μέσης, εφαρμόζοντας ένα επιταχυνσιόμετρο στη μέση του χρήστη [3]. Λίγο αργότερα, οι Jasiewicz et al. εφάρμοσαν ένα IMU στο παπούτσι του χρήστη, και με μετρήσεις από επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο σχεδίασαν τρεις διαφορετικές μεθόδους αναγνώρισης των Heel Strike και Toe Off [18]. Οι Mijailovic et al., το 2009 χρησιμοποίησαν επιταχυνσιόμετρα σε τέσσερα διαφορετικά σημεία ενός ποδιού και αισθητήρες δύναμης στο κάτω μέρος του πέλματος για τη λήψη διαφόρων μετρητικών δεδομένων, το σχεδιασμό ενός νευρωνικού δικτύου, και την ανάλυση και διακριτοποίηση του βαδίσματος στις δυο κύριες φάσεις του: Stance Phase και Swing Phase [23]. Το 2012, το βιβλιογραφικό έργο των Tao et al. έδωσε χρήσιμες πληροφορίες γύρω από τους διάφορους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος [32], ενώ την ίδια χρονιά η χρήση του ενσωματωμένου επιταχυνσιόμετρου ενός κινητού τηλεφώνου και η ανάλυση του κύκλου βαδίσματος επέτρεψε στους Thang et al. την ταυτοποίηση ατόμων ανάλογα με τον τρόπο περπατήματος [33]. Το 2015 οι Tileylioglu και Yilmaz, τοποθετώντας μια μονάδα IMU στο γόνατο ενός ασθενούς με προσθετικό μέλος, αναγνώρισαν τις δυο βασικές φάσεις του ανθρώπινου βαδίσματος (Stance και Swing Phase) επαληθεύοντάς τες με δεδομένα εικόνας από κάμερα, με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο του τεχνητού άκρου [34]. Την ίδια χρονιά, οι Wang et al. με τη χρήση μιας ενσύρματης IMU μονάδας στο παπούτσι του χρήστη, υλοποίησαν έναν αλγόριθμο αναγνώρισης συμβάντων στις μετρήσεις της γωνιακής ταχύτητας και της επιτάχυνσης, διακριτοποιώντας τον κύκλο βαδίσματος σε τέσσερις φάσεις, με σκοπό την αναγνώριση της θέσης του χρήστη κατά την κίνησή του σε κλειστό χώρο [36].

Πέραν όμως της αναγνώρισης των φάσεων του ανθρώπινου βαδίσματος, η μοντελοποίηση και ο πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων της μηχανικής συμπεριφοράς του ποδιού έχει επίσης αποτελέσει πόλο ενδιαφέροντος για πολλούς ερευνητές.

Ένα απλοποιημένο μοντέλο για το περπάτημα και συγκεκριμένα για τη δυσκαμψία των ποδιών (leg stiffness - impedance) αποτελεί το μοντέλο του ανάστροφου εκκρεμούς με ελατήριο και αποσβεστήρα (SLIP - Spring Loaded Inverted Pendulum), που χρησιμοποιείται από πολλές ερευνητικές ομάδες για την απλοποίηση της μοντελοποίησης του ανθρώπινου βαδίσματος. Από τους θεμελιωτές αυτής της προσέγγισης θεωρείται ο McMahon, ο οποίος το 1984 ανέλυσε και παραμετροποίησε θεωρητικά το ανθρώπινο βάδισμα με βάση το μοντέλο του ανάστροφου εκκρεμούς [21], ενώ το 1990 με τον Cheng επέκτεινε την μέθοδο και στο τρέξιμο [22]. Αρκετά αργότερα, το 2003, στο βιβλιογραφικό έργο των Butler et al. συνοψίζονται οι βασικοί τύποι εύρεσης της δυσκαμψίας του ποδιού σε φυσιολογικά αλλά και τραυματισμένα άτομα [7].

Πολλές πειραματικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς για την αναγνώριση των παραμέτρων του μοντέλου SLIP. Μια κλασική μέθοδος αποτελεί το άλμα στο ένα πόδι και η μέτρηση της μετατόπισης της μέσης, με δεδομένα εικόνας από κάμερα ταχείας λήψης, σε σχέση με τη δύναμη που αναπτύσσεται στο πέλμα κατά την επαφή του με το έδαφος, συνήθως μετρούμενο με μια πλατφόρμα αισθητήρα δύναμης [31][11][24] αλλά και με την επιπλέον χρήση αισθητήρων EMG (Electromyography) για συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τη συμπεριφορά των μυών του ποδιού [8][19][14]. Οι Zhang et al. εφαρμόζουν μια παρόμοια μέθοδο, υπολογίζοντας τη δυσκαμψία των ποδιών από επαναλαμβανόμενα βαθιά καθίσματα ενός ανθρώπου, μετρώντας παράλληλα τις δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στην πλατφόρμα δύναμης στην οποία βρίσκεται [37]. Το 2003 οι Bertos et al., με βάση το μοντέλο SLIP με ημικυκλικά πέλματα, μελέτησαν θεωρητικά τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της σύνθετης αντίστασης του ποδιού [5] ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 2005 προχώρησαν στην εύρεση παραμέτρων για το μοντέλο τους, λαμβάνοντας πειραματικά δεδομένα κίνησης κατά το βάδισμα ανθρώπου από κάμερες ταχείας λήψης και με τη χρήση του System Identification Toolbox του Matlab [6]. Με τη μεσολάβηση αρκετών παρόμοιων μοντέλων και πειραμάτων είτε κατά το περπάτημα είτε με άλμα, το 2013 παρουσιάζεται το θεωρητικό έργο των Hogan και Sternad, οι οποίοι προτείνουν πιο περίπλοκες μεθόδους εύρεσης της σύνθετης αντίστασης του ποδιού, και αναλύουν τη σημασία της ενδοτικότητας των ποδιών κατά το βάδισμα [15]. Την ίδια χρονική περίοδο, οι Aghasadeghi et al. σχεδιάζουν ένα μοντέλο πέντε βαθμών ελευθερίας, διακρίτοποιούν το βάδισμα σε τέσσερις φάσεις και εφαρμόζουν δυο διαφορετικές μεθόδους εύρεσης των παραμέτρων της σύνθετης αντίστασης του ποδιού από δεδομένα λήψης εικόνας καμερών, για την εφαρμογή τους σε αλγόριθμο ελέγχου προσθετικού μέλους [1], ενώ ένα χρόνο μετά, οι Zhao et al. χρησιμοποιούν το ίδιο μοντέλο για έλεγχο των κάτω άκρων του ρομπότ AMBER κάνοντας χρήση της θεωρίας ευστάθειας Lyapunov [38]. Επίσης το 2014, οι Fu et al. σχεδιάζουν ένα μοντέλο με ακόμη περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, εφαρμόζοντας στρατηγικές ελέγχου βασισμένες στην σύνθετη αντίσταση των διαφόρων αρθρώσεων, για την επίτευξη ευσταθούς βάδισης διατηρώντας τις τροχιές και τις γωνίες των αρθρώσεων όπως αυτές ελήφθησαν από κάμερες καταγραφής κίνησης [10].

Τέλος, ως γενικότερες προσεγγίσεις στην αναγνώριση παραμέτρων, στην εργασία του Viksten εφαρμόζονται μέθοδοι αναγνώρισης συστημάτων (System Identification) για ένα ρομποτικό βραχίονα,

με έμφαση στη μέθοδο ARX (Autoregressive), κάνοντας χρήση επιταχυνσιομέτρων [35], ενώ οι Pham et al. πραγματοποιούν αναγνώριση παραμέτρων μηχανικών συστημάτων με τη μέθοδο σταθμισμένων τετραγώνων, επίσης με λήψη δεδομένων από επιταχυνσιόμετρα, διεξάγοντας μια σειρά πειραμάτων αλλάζοντας κάθε φορά τη θέση των αισθητήρων [27].

1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε έξι βασικές ενότητες.

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη αλγορίθμων και την ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος .

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 γίνεται ανασκόπηση των βασικών τεχνολογιών των οποίων γίνεται χρήση για την ανάπτυξη της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση της πειραματικής διάταξης. Γίνεται εκτενής περιγραφή των τεχνολογικών στοιχείων που την απαρτίζουν και των μεθόδων σχεδιασμού, προγραμματισμού, υλοποίησης και χρήσης της διάταξης.

Το αναλυτικό σκέλος της εργασίας ξεκινάει με το Κεφάλαιο 5, όπου αναλύονται οι μέθοδοι ανάκτησης των μετρήσεων από τη βάση δεδομένων, η επιλογή των μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, καθώς επίσης και οι μεθοδολογίες συγχρονισμού και εξομάλυνσής τους. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη ενός ευριστικού αλγορίθμου για την αναγνώριση των φάσεων βαδίσματος και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του.

Η ανάλυση των δεδομένων συνεχίζεται και ολοκληρώνεται στο Κεφάλαιο 6, με την εφαρμογή μεθόδων για την εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς του ποδιού και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η εργασία ολοκληρώνεται στο Κεφάλαιο 7, όπου παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε ό,τι αφορά την πειραματική διάταξη αλλά και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσης εργασίας και αναλύονται τα στοιχεία θεωρίας βάσει των οποίων γίνεται η μελέτη του βαδίσματος.

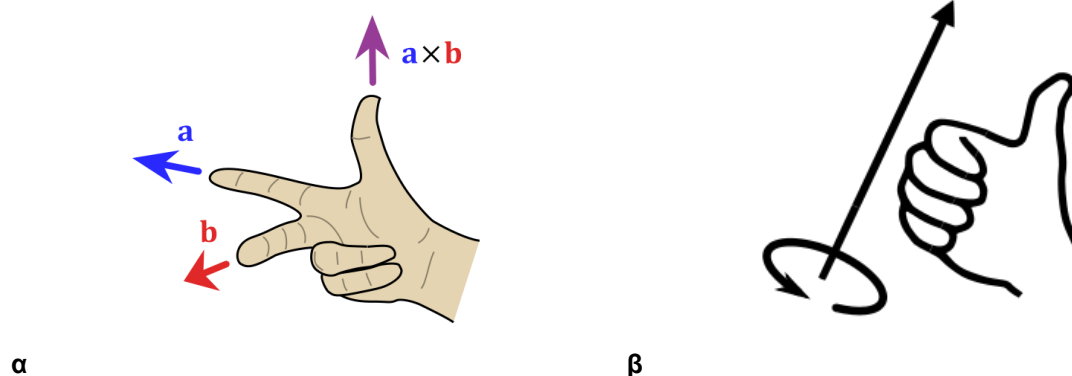
Αρχικά στην Ενότητα 2.2 γίνεται μια αναλυτική περιγραφή στον τρόπο ορισμού του συστήματος συντεταγμένων και της φοράς περιστροφής. Στη συνέχεια, ακολουθεί η Ενότητα 2.3, ένα από τα σημαντικότερα θεωρητικά κεφάλαια, όπου αναλύεται το βάδισμα και οι διάφορες φάσεις του. Στην Ενότητα 2.4 αναλύεται το φαινόμενο της σύνθετης αντίστασης του ποδιού κατά το βάδισμα, και συγκεκριμένα κατά την επαφή του με το έδαφος. Ως λογική συνέχεια, αναλύεται το απλοποιημένο μηχανικό μοντέλο που επιλέγεται για να περιγράψει το πόδι κατά τη φάση αυτή του βαδίσματος. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό κλείνει με την Ενότητα 2.5, όπου περιγράφονται οι μέθοδοι που εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία για την αναγνώριση συστημάτων.

2.2 Σύστημα Αξόνων - Συντεταγμένων

Κανόνας Δεξιού Χεριού

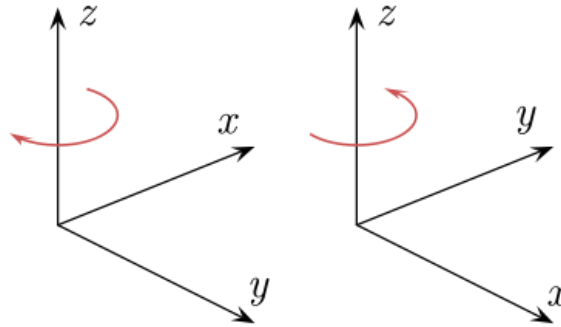
Στα μαθηματικά και τη φυσική, ο κανόνας του δεξιού χεριού αποτελεί έναν κοινό μνημονικό κανόνα για την κατανόηση των συμβάσεων προσανατολισμού διανυσμάτων σε τρεις διαστάσεις.

Ο κανόνας του δεξιού χεριού δηλώνει ότι ο προσανατολισμός του εξωτερικού γινομένου δυο διανυσμάτων ($a \times b$) καθορίζεται τοποθετώντας τα a και b σε κοινή αρχή αξόνων, εκτείνοντας το δείκτη του δεξιού χεριού προς την κατεύθυνση του a , και στη συνέχεια περιστρέφοντας το μεσαίο δάχτυλο προς την κατεύθυνση του b . Τότε ο αντίχειρας δείχνει προς την κατεύθυνση $a \times b$ (Σχήμα 2-1α) [51].



Σχήμα 2-1. Ο κανόνας του δεξιού χεριού: (α) Ορισμός κατεύθυνσης αξόνων, (β) Συμβατική κατεύθυνση του άξονα περιστροφής [43].

Ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων στο οποίο οι άξονες ικανοποιούν τον παραπάνω κανόνα ονομάζεται «σύστημα ορθογωνίων συντεταγμένων δεξιού χεριού». Το αντίστροφο ονομάζεται «σύστημα ορθογωνίων συντεταγμένων αριστερού χεριού» (Σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-2. Συντεταγμένες κανόνα «δεξιού χεριού» στα δεξιά και «αριστερού χεριού» στα αριστερά [43].

Φορά Περιστροφής

Στα μαθηματικά, ένα περιστρεφόμενο σώμα αντιπροσωπεύεται συνήθως από ένα διάνυσμα συγγραμικό με τον άξονα περιστροφής (μέθοδος άξονα - γωνίας). Το μήκος του διανύσματος δίνει την ταχύτητα περιστροφής και η κατεύθυνση του άξονα δίνει την κατεύθυνση περιστροφής σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Τα δάκτυλα του δεξιού χεριού καμπυλωμένα προς την κατεύθυνση περιστροφής και ο δεξιός αντίχειρας δείχνει προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα (Σχήμα 2-1β). Αυτή η μέθοδος διευκολύνει στην ύπαρξη μιας κοινής σύμβασης και στους υπολογισμούς.

2.3 Φάσεις Βαδίσματος

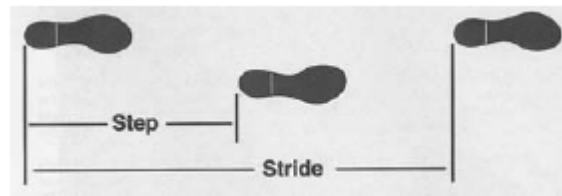
Το βάδισμα χρησιμοποιεί μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία κίνησης των κάτω άκρων, ώστε να μετακινείται το σώμα προς τα εμπρός διατηρώντας ταυτόχρονα την ευστάθειά του. Καθώς το σώμα κινείται προς τα εμπρός, το ένα άκρο χρησιμεύει ως σταθερή βάση στήριξης, ενώ το άλλο άκρο προωθείται προς τα εμπρός και προς νέο σημείο στήριξης. Τότε, οι ρόλοι των άκρων αντιστρέφονται. Για την παραλαβή του σωματικού βάρους από το ένα άκρο στο άλλο, και τα δύο πόδια έρχονται σε επαφή με το έδαφος. Αυτή η σειρά γεγονότων επαναλαμβάνεται από κάθε κάθε άκρο έως ότου διανυθεί η επιθυμητή απόσταση. Μια μεμονωμένη ακολουθία αυτών των γεγονότων από ένα πόδι, ονομάζεται κύκλος βαδίσματος (Gait Cycle - GC). Λόγω του ότι η στιγμή που το πόδι έρχεται σε επαφή με το έδαφος είναι εύκολα προσδιορίσιμη, αυτό το συμβάν έχει γενικά επιλεγεί ως αρχή του κύκλου βαδίσματος. Επειδή οι περισσότεροι άνθρωποι φέρνουν το πόδι τους για πρώτη φορά σε επαφή με το έδαφος με την πτέρνα, το συμβάν αυτό ονομάζεται συνήθως *Heel Strike* (HS). Παρ'όλα αυτά, λόγω του ότι πολλοί ασθενείς με κινητικά προβλήματα δεν πατούν με αυτόν τον τρόπο, στη βιβλιογραφία η πρώτη επαφή του ποδιού με το έδαφος ονομάζεται και *Initial Contact* (IC).

Κάθε κύκλος βάδισης έχει δύο βασικές φάσεις: τη Φάση Στάσης (*Stance Phase*) και τη Φάση Αιώρησης (*Swing Phase*) (Σχήμα 2-3). Η Φάση Στάσης είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία το πόδι βρίσκεται στο έδαφος. Η στάση αρχίζει με την αρχική επαφή (IC / HS) και τελειώνει με την απομάκρυνση των δαχτύλων του πέλματος από το έδαφος (*Toe-Off* – TO). Η Φάση Αιώρησης είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία το πόδι αποχωρίζεται το έδαφος και βρίσκεται στον αέρα. Η Φάση Αιώρησης, αντιστρόφως της Φάση Στάσης, ξεκινά με το TO και τελειώνει με την αρχική επαφή (IC / HS).



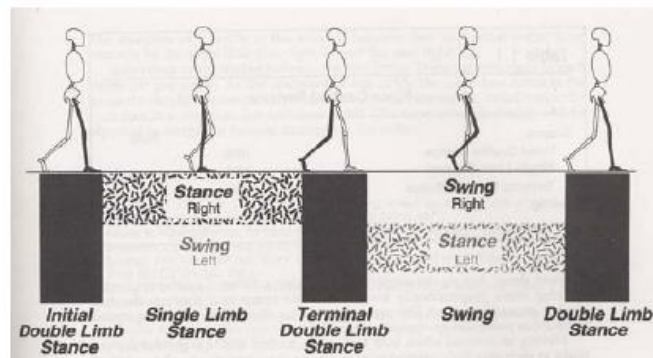
Σχήμα 2-3. Τα δυο βασικά τμήματα του κύκλου βαδίσματος [26].

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στους παρακάτω βασικούς ορισμούς για το περπάτημα. Ο όρος *Διασκελισμός* (Stride) είναι το διάστημα του κύκλου βαδίσματος (GC) μεταξύ δύο διαδοχικών αρχικών επαφών (IC) του *ίδιου* ποδιού. Από την άλλη, ο όρος *Βήμα* (Step) είναι το διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών αρχικών επαφών μεταξύ των *δυο* ποδιών (δηλαδή αριστερό και στη συνέχεια δεξί πόδι). Υπάρχουν δύο βήματα σε κάθε Διασκελισμό (Σχήμα 2-4). Τέλος, όρος *Ρυθμός Περιπατήματος* (Cadence) είναι ο αριθμός των βημάτων (steps) που πραγματοποιούνται ανά μονάδα χρόνου και θεωρείται θεμελιώδης παράμετρος που επηρεάζει το πρότυπο του περπατήματος [4].



Σχήμα 2-4. Ορισμός Διασκελισμού και Βήματος [26].

Η *Φάση Στάσης* υποδιαιρείται σε τρία διαστήματα, ανάλογα με τη θέση των δύο ποδιών (Σχήμα 2-5). Η αρχή και το τέλος της φάσης αυτής περιλαμβάνουν μια περίοδο επαφής και των δυο ποδιών με το έδαφος (Initial και Terminal Double Stance), ενώ το μεσαίο τμήμα της κάθε Στάσης περιλαμβάνει την επαφή ενός μόνο ποδιού με το έδαφος (Single Limb Stance). Η μονή στήριξη του ενός ποδιού ισούται με την αιώρηση του άλλου, καθώς συμβαίνουν ταυτόχρονα (Σχήμα 2-5).



Σχήμα 2-5. Οι φάσεις Στάσης και Αιώρησης ενός κύκλου βαδίσματος [26].

Η χρονική διάρκεια των φάσεων του κύκλου βαδίσματος είναι περίπου 10% για κάθε διάστημα διπλής στήριξης και 40% για στήριξη μεμονωμένων άκρων. Έτσι, συνολικά το 60% του χρόνου GC δαπανάται για στάση και 40% για αιώρηση. Η ακριβής διάρκεια αυτών των χρονικών διαστημάτων ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα περπατήματος.

Για την επίτευξη του βαδίσματος, πρέπει να ικανοποιηθούν με τη σειρά τρία βασικά στάδια. Αυτά είναι η αποδοχή βάρους, η στήριξη στο ένα άκρο και η προοδευτική κίνηση του άλλου άκρου. Για την καλύτερη κατανόηση των σταδίων αυτών, ακολουθεί μια πιο λεπτομερής περιγραφή των αντίστοιχων φάσεων και της διάρκειάς τους.

Στάδιο A: Παραλαβή Βάρους (Weight Acceptance)

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το σωματικό βάρος μεταφέρεται στο άκρο του οποίου η αιώρηση μόλις ολοκληρώθηκε. Αυτό το έργο είναι και το πιο απαιτητικό κατά τη διάρκεια του κύκλου βαδίσματος. Λειτουργικά, παρέχει την απορρόφηση κραδασμών, την αρχική σταθεροποίηση των άκρων και τη διατήρηση της προώθησης. Περιλαμβάνει δύο φάσεις.

Φάση 1: Αρχική Επαφή (Initial contact – IC)

Διάρκεια: 0-2% του κύκλου βαδίσματος (GC). Αυτή η φάση περιλαμβάνει τη στιγμή που το πόδι αγγίζει το έδαφος (Σχήμα 2-6α). Το πόδι τοποθετείται έτσι ώστε να ξεκινά η στάση του με την πτέρνα.

Φάση 2: Απόκριση Φόρτωσης (Loading Response)

Διάρκεια: 0-10% GC. Πρόκειται για την αρχική περίοδο διπλής στάσης (Σχήμα 2-6β). Η φάση αυτή ξεκινά με την αρχική επαφή με το έδαφος, συνεχίζει μέχρι το άλλο πόδι να ανυψωθεί για αιώρηση, και είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση κρούσης, τη σταθεροποίηση παραλαβής βάρους και τη διατήρηση της προώθησης του σώματος.

Στάδιο B: Στήριξη Ενός Άκρου (Single Limb Support)

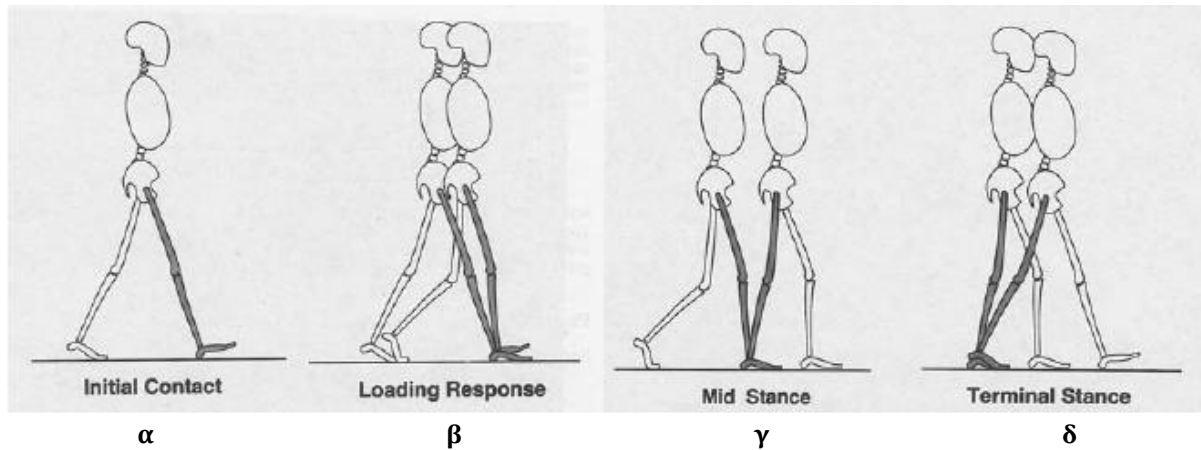
Υψώνοντας το άλλο πόδι για αιώρηση ξεκινά το διάστημα στήριξης ενός άκρου. Αυτό το διάστημα λήγει όταν το άλλο πόδι έρθει ξανά σε επαφή με το έδαφος. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος, το άκρο στήριξης έχει την ευθύνη υποστήριξης ολόκληρου του σώματος, ενώ η εξέλιξη του βαδίσματος συνεχίζεται. Αυτό το διάστημα περιλαμβάνει τη φάση Μέσης Στάσης (Mid-Stance) και τη φάση Τερματικής Στάσης (Terminal Stance).

Φάση 3: Μέση Στάση (Mid-Stance)

Διάρκεια: 10-30% GC. Αυτή είναι η πρώτη φάση της στήριξης του ενός άκρου (Σχήμα 2-6γ). Αρχίζει όταν υψώνεται το άλλο πόδι και αρχίζει να αιωρείται και τελειώνει όταν το σωματικό βάρος ευθυγραμμίζεται πάνω από το πόδι που προηγείται. Αυτή η φάση είναι υπεύθυνη για την πρόοδο του σώματος πάνω από το σταθερό πόδι και την ευστάθεια άκρων και κορμού.

Φάση 4: Τερματική Στάση (Terminal Stance)

Διάρκεια: 30-50% GC. Αυτή είναι η δεύτερη και τελευταία φάση στήριξης ενός άκρου (Σχήμα 2-6δ). Αρχίζει με το σήκωμα της πτέρνας του ποδιού στήριξης και τελειώνει όταν το άλλο πόδι αγγίζει το έδαφος. Η φάση αυτή ευθύνεται για την μετατόπιση του σώματος πέρα από το πόδι στήριξης.

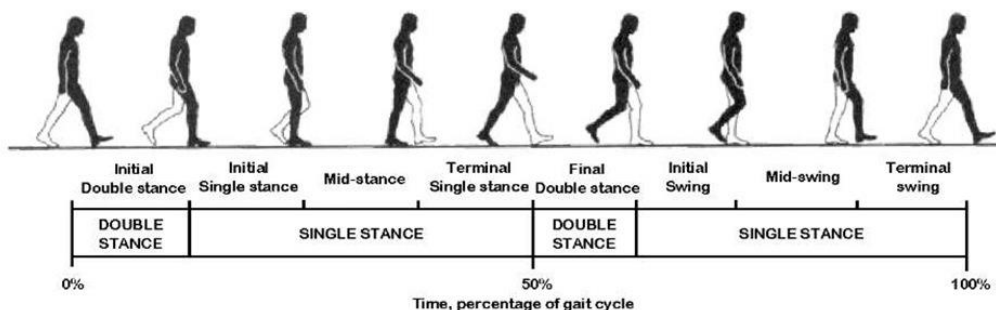


Σχήμα 2-6. Οι φάσεις της Φάσης Στάσης: (α) Αρχική Επαφή, (β) Απόκριση Φόρτωσης, (γ) Μέση Στάση, (δ) Τερματική Στάση [26].

Στάδιο Γ: Προώθηση του Άκρου (Limb Advancement)

Η προώθηση του αιωρούμενου ποδιού αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο του κύκλου βαδίσματος. Αυτό το στάδιο απαιτεί τον αποχωρισμό από το έδαφος, πράγμα που σημαίνει ότι το άκρο πρέπει να ξεπεράσει τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το έδαφος κατά την προώθηση. Επίσης απαιτεί τον έλεγχο της προώθησης του ποδιού. Περιλαμβάνονται τέσσερις φάσεις βαδίσματος κατά την αιώρηση: προ-αιώρηση, αρχική αιώρηση, μέση αιώρηση και τερματική αιώρηση (pre-swing, initial swing, mid swing και terminal swing αντίστοιχα). Η προ-αιώρηση αρχίζει με την αρχική επαφή του άλλου ποδιού και τελειώνει με τον αποχωρισμό των δαχτύλων του ποδιού που ξεκινά να αιωρείται από το έδαφος (toe-off). Η αρχική αιώρηση αρχίζει με την ανύψωση του ποδιού από το πάτωμα και τελειώνει όταν το αιωρούμενο πόδι περνάει μπροστά από τη μέση γραμμή του άκρου στήριξης. Η προώθηση του ποδιού και ο αποχωρισμός του εδάφους επιτυγχάνεται εν μέρει μέσω αυτής της φάσης και συνεχίζεται στην επόμενη φάση της μέσης αιώρησης, για να ολοκληρωθεί κατά την τερματική αιώρηση. Στο εντωμεταξύ, το αντίθετο άκρο βρίσκεται στη Φάση Στάσης [4].

Ένας τυπικός κύκλος βαδίσματος με τα διακριτά γεγονότα, περιόδους και φάσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7.

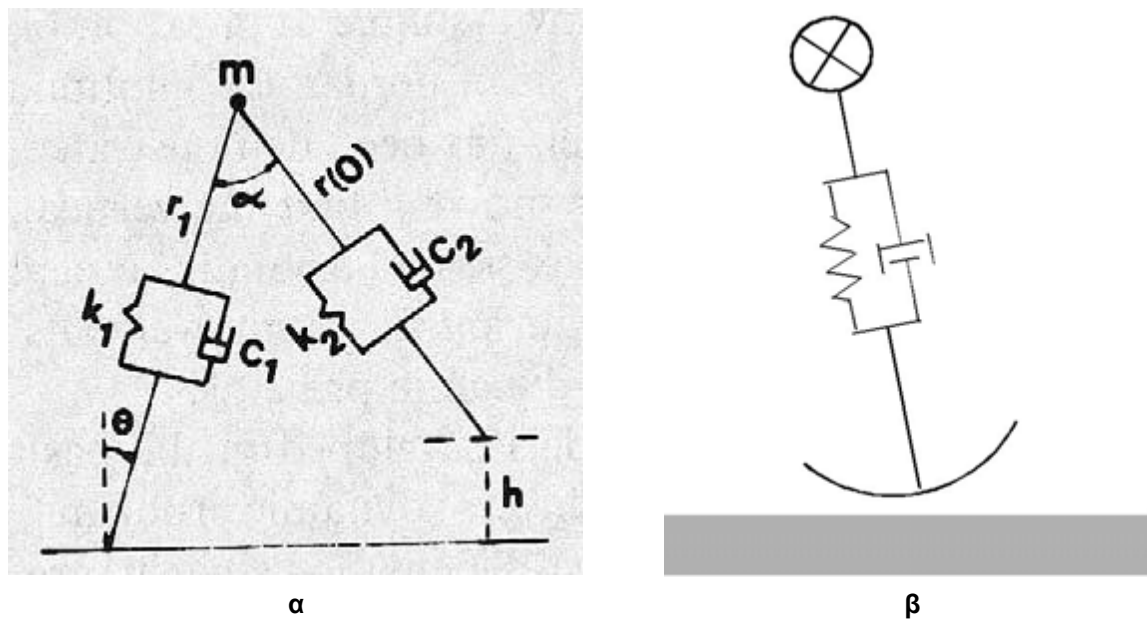


Σχήμα 2-7. Διαστήματα και διάρκεια του κύκλου του ανθρώπινου βαδίσματος [20].

2.4 Μηχανική Αντίσταση Βαδίσματος – Δυσκαμψία ποδιού

Η μηχανική αντίσταση (Mechanical Impedance) είναι ένα μέτρο που περιγράφει το πόσο μια δομή αντιστέκεται στην κίνηση όταν της ασκείται μια αρμονική δύναμη. Συσχετίζει τις δυνάμεις που δρουν σε ένα μηχανικό σύστημα με τις ταχύτητες ή μετατοπίσεις που αναπτύσσονται σε αυτό [29]. Κατά το βάδισμα, ο άνθρωπος είναι σε θέση να κάνει νευρομυϊκές προσαρμογές των παραμέτρων απόσβεσης και δυσκαμψίας των κάτω άκρων του προκειμένου να διατηρηθεί μια ομαλή και σταθερή κίνηση της λεκάνης. Ουσιαστικά, οι παράμετροι αυτές, οι αντιστάσεις δηλαδή που αναπτύσσονται στο πόδι κατά το βάδισμα, ονομάζονται *Μηχανική Αντίσταση Βαδίσματος* (Gait ή Walking Mechanical Impedance).

Η Δυσκαμψία του ποδιού (leg stiffness) αποτελεί τη γενίκευση της μηχανικής (ή σύνθετης) αντίστασής του [15]. Το μηχανικό ανάλογο της σύνθετης αντίστασης του ποδιού απλοποιείται σε ένα μοντέλο μαζας-αποσβεστήρα-ελατηρίου, οι παράμετροι του οποίου καθορίζονται από τη μετατόπιση της μέσης σε σχέση με τις δυνάμεις που ασκούνται στο πόδι κατά την επαφή του με το έδαφος. Τα μοντέλα για τη μοντελοποίηση του ανθρώπινου βαδίσματος, όσον αφορά στην δυσκαμψία του ποδιού, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-8.

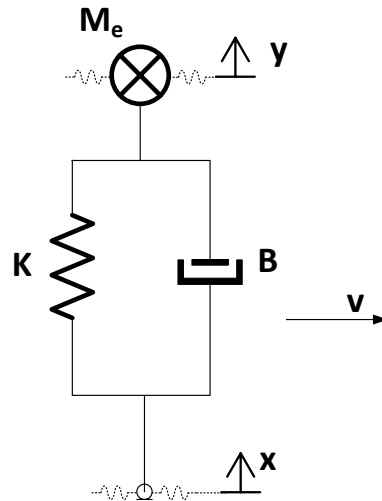


Σχήμα 2-8. (α) Μοντέλο βαδίσματος μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα [30], (β) Μοντέλο βαδίσματος ελατηρίου-αποσβεστήρα με ημικυκλικά πέλματα [12].

Στην παρούσα εργασία, θα γίνει απόπειρα εύρεσης των παραμέτρων δυσκαμψίας του ποδιού, με ένα μοντέλο δεύτερης τάξης μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα, λαμβάνοντας υπ'όψιν ως είσοδο του συστήματος τις επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στο πέλμα κατά την επαφή του με το έδαφος και ως έξοδο τις επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στη μέση του ανθρώπου που βαδίζει. Στην ουσία θεωρείται ότι το πόδι μεταφέρει τους κραδασμούς που προκαλούνται από την κρούση του πέλματος με το έδαφος στη μέση, με απορρόφηση των κραδασμών αυτών. Το μοντέλο που εξετάζεται αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου των Bertos et al. [5].

Το υπο εξέταση μοντέλο 2^{ης} τάξης απεικονίζεται στο Σχήμα 2-9. Με x συμβολίζονται οι κραδασμοί (μετατοπίσεις) του πέλματος κατά την επαφή με το έδαφος, ενώ y είναι οι αντίστοιχοι

κραδασμοί της μέσης στο πεδίο του χρόνου. Με M_e (effective) συμβολίζεται η ενεργή μάζα του ατόμου που λαμβάνεται υπ'όψιν κατά το Stance Phase, με K η σταθερά του ελατηρίου, με B η σταθερά απόσβεσης και με V η ταχύτητα του βαδίσματος προς τα εμπρός.



Σχήμα 2-9. Μοντέλο 2^{ης} τάξης μηχανικής αντίστασης ενός ποδιού.

Αν $X(s)$ και $Y(s)$ είναι οι μετασχηματισμοί Laplace των X και Y αντίστοιχα, τότε οι εξισώσεις κίνησης για το μηχανικό μοντέλο 2^{ης} τάξης είναι:

$$K[-Y(s) + X(s)] + B[-sY(s) + sX(s)] = M_e s^2 Y(s) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow -KY(s) - BsY(s) - M_e s^2 Y(s) = -KX(s) - BsX(s) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow M_e s^2 Y(s) + BsY(s) + KY = X(s)(Bs + K) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Y(s)[M_e s^2 + Bs + K] = X(s)(Bs + K) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Y(s) = \frac{Bs + K}{M_e \left(s^2 + \frac{B}{M_e} s + \frac{K}{M_e} \right)} X(s) \Leftrightarrow$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{B}{M_e} s + \frac{K}{M_e}}{s^2 + \frac{B}{M_e} s + \frac{K}{M_e}} = \frac{s^2 Y(s)}{s^2 X(s)} \quad (2-1)$$

Το σύστημα έχει ένα μηδενιστή:

$$s_{z1} = -\frac{K}{B} \quad (2-2)$$

Και 2 πόλους:

$$s_{p1,2} = -\frac{B}{2M_e} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{B}{2M_e}\right)^2 - \frac{K}{M_e}\right)} \quad (2-3)$$

Στην παρούσα εργασία, οι μετρήσεις που λαμβάνονται ως είσοδος και έξοδος είναι οι επιταχύνσεις του πέλματος και της μέσης αντίστοιχα, και ισχύει:

$$\frac{s^2 Y(s)}{s^2 X(s)} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{B}{M_e}s + \frac{K}{M_e}}{s^2 + \frac{B}{M_e}s + \frac{K}{M_e}} \quad (2-4)$$

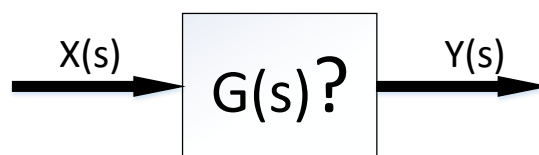
2.5 Αναγνώριση Συστήματος (System Identification)

Η αναγνώριση ενός συστήματος (System identification) είναι η μεθοδολογία για την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων δυναμικών συστημάτων με χρήση των σημάτων εισόδου και εξόδου του συστήματος [48].

Η διαδικασία αναγνώρισης ενός συστήματος απαιτεί:

- Μέτρηση των σημάτων εισόδου και εξόδου του συστήματος στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας.
- Επιλογή μιας δομής μοντέλου.
- Εφαρμογή μιας μεθόδου εκτίμησης για τον υπολογισμό της τιμής των παραμέτρων της υποψήφιας δομής του μοντέλου.
- Αξιολόγηση του εκτιμώμενου μοντέλου για να διαπιστωθεί αν το μοντέλο είναι κατάλληλο για τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί κατά την πρώτη φάση είναι η «Μοντελοποίηση Μαύρου Κουτιού» (Black Box Modeling) (Σχήμα 2-10). Σε αυτού του είδους τη μοντελοποίηση, είναι γνωστές μόνο οι εισοδοί και οι εξοδοί, ενώ υπάρχει πλήρης άγνοια για τη συνάρτηση μεταφοράς που τις συνδέει. Παρά το ότι στην εργασία αυτή θα εξεταστεί συγκεκριμένο μοντέλο (Σχήμα 2-9), επιλέγεται το Black Box Modeling για την εξέταση και συστημάτων μεγαλύτερης τάξης.



Σχήμα 2-10. Black Box Modeling.

Για την αναγνώριση του συστήματος θα γίνει χρήση του System Identification Toolbox του Matlab, και συγκεκριμένα δυο εκ των βασικότερων συναρτήσεών του, της *tfest* και της *arx*. Και οι δυο συναρτήσεις μπορούν να διαχειριστούν μοντέλα μέχρι και 20^{ns} τάξης. Η *tfest* μπορεί να εκτιμήσει μοντέλα συνεχούς ή διακριτού χρόνου, ενώ η *arx* μόνο διακριτού. Οι αλγόριθμοι που υλοποιούνται στις συναρτήσεις αυτές είναι αρκετά περίπλοκοι και περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

Συνάρτηση tfest

- **Συνεχούς χρόνου:** Ο αλγόριθμος εκτίμησης αρχικοποιεί τις προς εκτίμηση παραμέτρους, οι οποίες καθορίζονται από τη βασική μέθοδο Instrument Variable (IV) ή και άλλες μεθόδους. Οι αρχικές παράμετροι ανανεώνονται κάνοντας χρήση της μεθόδου αναζήτησης μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Το ζητούμενο της μεθόδου αναζήτησης είναι η ελαχιστοποίηση της σταθμισμένης νόρμας των σφαλμάτων [50].
- **Διακριτού χρόνου:** Ο αλγόριθμος εκτίμησης λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως και στο συνεχή χρόνο, με την αρχικοποίηση των παραμέτρων να εκτελείται από τη συνάρτηση *arx*.

Συνάρτηση arx

- **Διακριτού χρόνου:** Η παραγοντοποίηση QR επιλύει το υπερπροσδιορισμένο σύνολο γραμμικών εξισώσεων που συνιστούν το πρόβλημα εκτίμησης ελάχιστων τετραγώνων [49].

3 Τεχνολογίες Υλοποίησης Πειραμάτων

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι διάφορες τεχνολογίες που εφαρμόστηκαν σε αυτήν την εργασία.

Στην Ενότητα 3.2 περιγράφονται τα Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (MEMS), ενώ στην Ενότητα 3.3 γίνεται αναφορά στη λειτουργία της Μονάδας Αδρανεϊακής Μέτρησης (IMU). Τα αισθητήρια όργανα που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή, επιταχυνσιόμετρα και γυροσκοπία, αναλύονται στις Ενότητες 3.4 και 3.5 αντίστοιχα, καθώς επίσης αναφέρονται οι διάφοροι τύποι τους που υπάρχουν σήμερα. Στη συνέχεια, στην Ενότητα 3.6, περιγράφεται το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things) και αναδεικνύεται ο ρόλος που διαδραματίζει στη σύγχρονη εποχή. Στην επόμενη Ενότητα (3.7) αναλύεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου επικοινωνίας Bluetooth, με έμφαση στο Bluetooth Low energy (BLE) βάσει του οποίου επικοινωνούν οι αισθητήριες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη μετρήσεων. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την Ενότητα 3.8, όπου περιγράφονται αναλυτικά τα είδη των βάσεων δεδομένων των οποίων γίνεται χρήση στην παρούσα εργασία.

3.2 MEMS (Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα – Micro-Electro-Mechanical Systems)

Τα Μικρο-Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS) είναι η τεχνολογία των εξαιρετικά μικρών συσκευών. Τα MEMS αναφέρονται επίσης ως micromachines στην Ιαπωνία ή Micro Systems Technology (MST) στην Ευρώπη.

Τα MEMS αποτελούνται από εξαρτήματα από 1 έως 100 μικρόμετρα σε μέγεθος. Οι MEMS συσκευές κυμαίνονται σε μέγεθος από 20 μικρόμετρα έως ένα χιλιοστό. Συνήθως αποτελούνται από κεντρική μονάδα που επεξεργάζεται δεδομένα (μικροεπεξεργαστής), και διάφορα εξαρτήματα που αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον, όπως μικροαισθητήρες. Πολλοί από τους «έξυπνους» αισθητήρες είναι τύπου MEMS ή συνδιάζονται με μια MEMS διάταξη που τους προσδίδει «ευφυΐα».

Σε γενικές γραμμές τα MEMS αποτελούνται από Μικροαισθητήρες, Μικροεπενεργητές, Μικροηλεκτρονικά και Μικροδομές. Τα MEMS χρησιμοποιούνται στην οξειδωση, διάχυση, LPCVD (low-pressure chemical vapor deposition), φωτολιθογραφία, διαδικασίες μικρομηχανικής, μικρομηχανουργική επιφανειών, συγκόλληση μεμβρανών, στη μικροδιαμόρφωση και αλλού.

Μπορεί τα MEMS να είναι εξαιρετικά μικρές συσκευές (π.χ. ηλεκτρικός κινητήρας μικρότερος από τη διάμετρο μιας ανθρώπινης τρίχας), αλλά η τεχνολογία MEMS δεν χαρακτηρίζεται μόνο από το μέγεθος. Τα MEMS είναι στην ουσία μια κατασκευαστική τεχνολογία, ένας νέος τρόπος δημιουργίας πολύπλοκων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων με χρήση τεχνικών κατασκευής παρομοίων με αυτές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [41].

3.3 Μονάδα Αδρανεϊακής Μέτρησης (Inertial Measurement Unit - IMU)

Οι βασικές συσκευές που απαρτίζουν μια μονάδα αισθητήρα κίνησης, επίσης αναφερόμενη ως Αδρανεϊακή Μονάδα Μέτρησης (Inertial Measurement Unit - IMU), είναι το επιταχυνσιόμετρο και το

γυροσκόπιο. Το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της γραμμικής κίνησης, μέσω μέτρησης της γραμμικής επιτάχυνσης, ενώ το γυροσκόπιο για τη μέτρηση της περιστροφικής κίνησης, μέσω μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας. Αυτές οι συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες, αλλά η εκτεταμένη εξάπλωση της χρήσης τους από την αρχή της δεύτερης χιλιετίας οφείλεται στην έρευνα και τη βιομηχανική πρόοδο που επιτυγχάνεται με την τεχνολογία MEMS.

Αρχικά, η δυνατότητα εφαρμογής τέτοιων συσκευών σε πολύ μικρές διαστάσεις και με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ήταν πολύ ελκυστική και οδήγησε στην ανάπτυξη πρωτόγονων συσκευών IMU για μετρήσεις μονοαξονικών παραμέτρων. Αλλά είναι μόλις τα τελευταία χρόνια (από το 2009) που η ευφυΐα που αποκτήθηκε από το συνδυασμό των πολυαξονικών και πολυπαραμετρικών μονάδων MEMS άνοιξε νέους τομείς εφαρμογής για τις IMU και συνέβαλε στην ενσωμάτωση νέων λειτουργιών σε υπάρχοντα ηλεκτρονικά συστήματα.

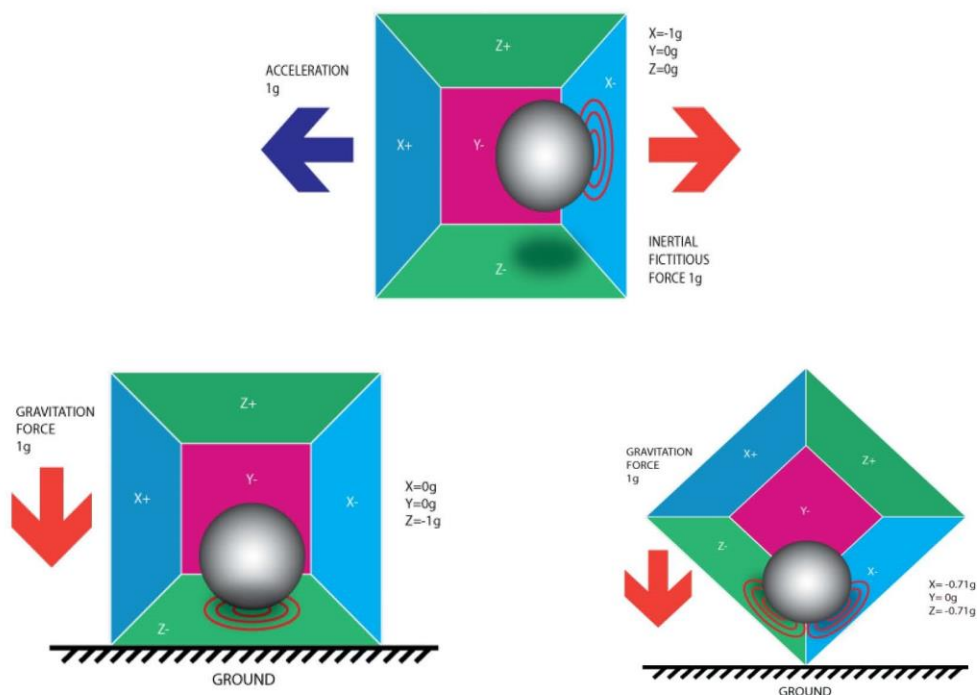
Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας των IMUs με αισθητήρες MEMS αντιπροσωπεύεται από τις μονάδες «6 αξόνων» (ή «μονάδες 6 βαθμών ελευθερίας»), που ενσωματώνουν 3-αξονικά επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια που κατασκευάζονται με την ίδια διαδικασία. Περαιτέρω ευφυΐα και μεγαλύτερος αριθμός χαρακτηριστικών θα μπορούσαν να αποκτηθούν εάν το IMU ήταν επίσης σε θέση να μετρήσει τον απόλυτο προσανατολισμό του αντικειμένου που το ενσωματώνει. Ο απόλυτος προσανατολισμός μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα μαγνητόμετρο, ή ψηφιακή πυξίδα [25]. Τέτοιες συσκευές είναι και οι αισθητήρες της Dialog Semiconductors που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

3.4 Επιταχυνσιόμετρα

Το επιταχυνσιόμετρο (accelerometer) είναι μια συσκευή που μετρά την επιτάχυνση ενός σώματος. Ένα επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων ανιχνεύει γραμμικές επιταχύνσεις σε τρεις κάθετες κατευθύνσεις. Μια απλή προσέγγιση του τρόπου λειτουργίας του είναι η απεικόνιση μιας σφαίρας μέσα σε ένα κουτί με τοίχους ευαίσθητους στην πίεση. Καθώς το κουτί κινείται σε διάφορες κατευθύνσεις, η σφαίρα πιέζει διαφορετικά τοιχώματα, με αποτέλεσμα να γίνεται γνωστή η κατεύθυνση της επιτάχυνσης (Σχήμα 3-1). Συγκρίνοντας τις μετρήσεις στους άξονες x, y και z, επιτυγχάνεται η επεξεργασία του προσανατολισμού ενός ακίνητου αντικειμένου. Όταν το επιταχυνσιόμετρο μένει ακίνητο, η σφαίρα θα ασκεί πίεση στα τοιχώματα απλά λόγω της βαρύτητας με συνισταμένη $-1g$ ($\approx 9,81 \text{ m / s}^2$). Αντίθετα, ένα επιταχυνσιόμετρο σε ελεύθερη πτώση θα δίνει μέτρηση ίση με το μηδέν [55][40].

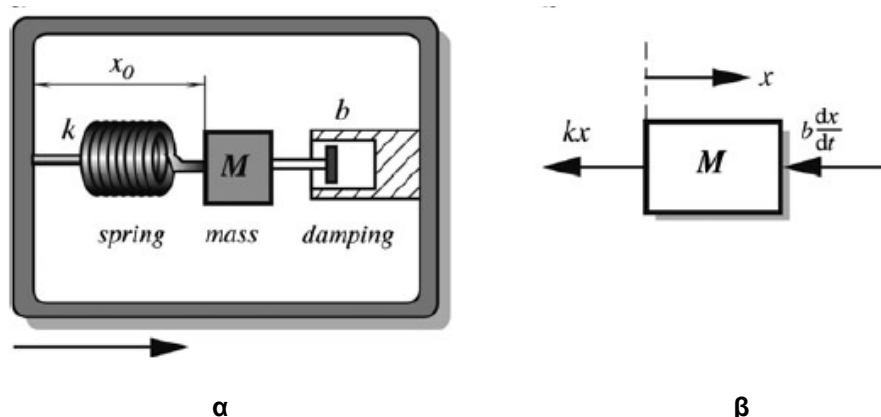
Η επιτάχυνση ενός σώματος είναι ένα δυναμικό χαρακτηριστικό, διότι σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα προϋποθέτει την εφαρμογή μιας δύναμης. Μια σταθερή θέση δεν απαιτεί την εφαρμογή μιας δύναμης. Μια αλλαγή σε μια θέση συνδέεται με την ταχύτητα και δεν απαιτεί δύναμη, εκτός κι αν υπάρχει μια αντιτιθέμενη δύναμη, όπως η τριβή. Η επιτάχυνση από την άλλη, απαιτεί πάντα μια δύναμη. Στην πραγματικότητα, η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση είναι όλα συνδεδεμένα – η ταχύτητα είναι η πρώτη παράγωγος της θέσης και η επιτάχυνση είναι η δεύτερη παράγωγος. Ωστόσο, σε ένα θορυβώδες περιβάλλον, η χρήση παραγώγων μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα, παρά τα πολύπλοκα και εξελιγμένα κυκλώματα επεξεργασίας σήματος που μπορεί να χρησιμοποιούνται. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα και η επιτάχυνση δεν προέρχονται από ανιχνευτές

θέσης, αλλά μετρώνται από ειδικούς αισθητήρες. Ως γενικός κανόνας, σε εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων (με εύρος ζώνης από 0 έως 10 Hz), οι μετρήσεις θέσης και μετατόπισης παρέχουν γενικά καλή ακρίβεια. Στις εφαρμογές μέσων συχνοτήτων (λιγότερο από 1 kHz), συνήθως επιλέγεται η μέτρηση της ταχύτητας. Όμως, για τη μέτρηση κινήσεων υψηλών συχνοτήτων με σημαντικά επίπεδα θορύβου, προτιμάται η μέτρηση της επιτάχυνσης.



Σχήμα 3-1. Σχηματική επεξήγηση λειτουργίας επιταχυνσιομέτρου [55].

Πολλοί αισθητήρες ταχύτητας ή επιτάχυνσης περιέχουν εξαρτήματα τα οποία είναι ευαίσθητα στη μετατόπιση. Έτσι, οι αισθητήρες θέσης και μετατόπισης είναι τα αναπόσπαστα τμήματα των αισθητήρων ταχύτητας και των επιταχυνσιομέτρων.



Σχήμα 3-2. (α) Μηχανικό μοντέλο ενός επιταχυνσιομέτρου, (β) Διάγραμμα ελεύθερου σώματος μιας μάζας [9].

Η δόνηση είναι ένα δυναμικό μηχανικό φαινόμενο που περιλαμβάνει μια περιοδική ταλαντωτική κίνηση γύρω από μια θέση αναφοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις (shock analysis, γραμμική

επιτάχυνση, κ.λπ.), το ταλαντευόμενο στοιχείο μπορεί να λείπει, αλλά η μέτρηση και ο σχεδιασμός του αισθητήρα να παραμένουν ίδια. Ένα επιταχυνσιόμετρο μπορεί να οριστεί ως συσκευή ενός βαθμού ελευθερίας, η οποία έχει κάποιο είδος σεισμικής μάζας (proof mass), ένα ελατήριο ως σύστημα υποστήριξης και μια δομή πλαισίου με ιδιότητες απόσβεσης (Σχήμα 3-2α).

Το μαθηματικό μοντέλο ενός επιταχυνσιομέτρου είναι:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = -M \frac{d^2y}{dt^2} \quad (3-1)$$

όπου M είναι η μάζα της σεισμικής μάζας, b η σταθερά απόσβεσης, k η σταθερά του ελατηρίου, x η μετατόπιση της σεισμικής μάζας, y η επιβαλλόμενη μετατόπιση στο σώμα του αισθητήρα και συνεπώς d^2y/dt^2 είναι η επιτάχυνση που μετράει το επιταχυνσιόμετρο. Για να λυθεί η εξίσωση, χρησιμοποιούμε το μετασχηματισμό Laplace:

$$Ms^2 X(s) + bsX(s) + kX(s) = -Ms^2 Y(s) \quad (3-2)$$

όπου $X(s)$ και $Y(s)$ είναι οι μετασχηματισμοί Laplace των $x(t)$ και $y(t)$ αντίστοιχα. Λύνοντας ως προς $X(s)$:

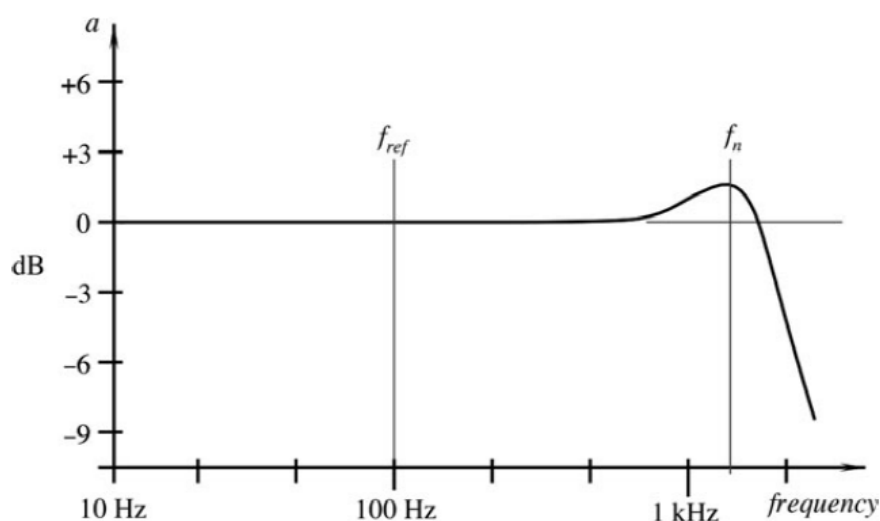
$$X(s) = -\frac{Ms^2 Y(s)}{Ms^2 + bs + k} \quad (3-3)$$

Εισάγωντας τη μεταβλητή $\omega_n = \sqrt{k/M}$ και $2\zeta\omega_n = b/M$, τότε:

$$X(s) = -\frac{Ms^2 Y(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-4)$$

Το ω_n συμβολίζει την φυσική κυκλική συχνότητα του επιταχυνσιομέτρου και το ζ είναι η σταθερά απόσβεσης. Τελικά, η συνάρτηση μεταφοράς από επιτάχυνση σε θέση είναι:

$$G(s) = -\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{X(s)}{s^2 Y(s)} \quad (3-5)$$



Σχήμα 3-3. Διάγραμμα Συχνοτήτων για ένα επιταχυνσιόμετρο [9]. Η μέτρηση είναι αξιοποιήσιμη έως τη συχνότητα f_{ref} .

Ένα σωστά σχεδιασμένο, εγκατεστημένο και βαθμονομημένο επιταχυνσιόμετρο θα πρέπει να έχει μια σαφώς αναγνωρίσιμη συχνότητα (φυσική) συντονισμού και σταθερή απόκριση συχνότητας, όπου μπορεί να γίνει η πιο ακριβής μέτρηση (Σχήμα 3-3). Σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων, καθώς η συχνότητα δόνησης μεταβάλλεται, η έξοδος x του αισθητήρα θα αντικατοπτρίζει σωστά την επιτάχυνση. Σε πολλά επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιείται ιξώδης απόσβεση, ώστε να βελτιωθεί το χρήσιμο εύρος συχνοτήτων περιορίζοντας τις επιδράσεις του συντονισμού. Ως μέσο απόσβεσης, χρησιμοποιείται αρκετά συχνά έλαιο σιλικόνης.

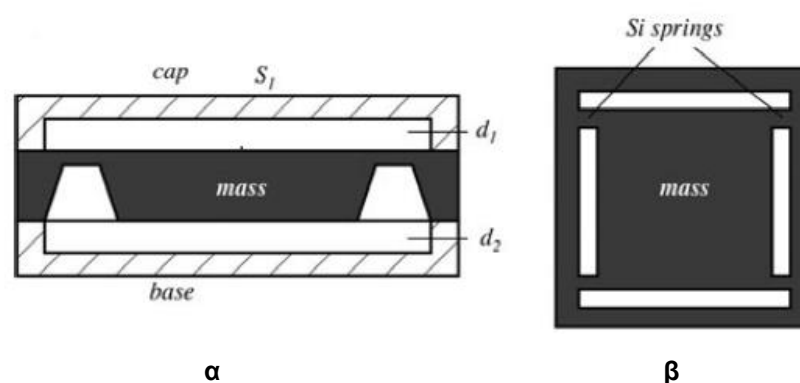
Κατα τη βαθμονόμηση ενός επιταχυνσιομέτρου, τα βασικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπ'όψιν είναι συνοπτικά τα εξής:

1. Ευαισθησία, δηλαδή η αναλογία μιας ηλεκτρικής εξόδου προς τη μηχανική είσοδο.
2. Συχνотική απόκριση, το σήμα εξόδου που ανήκει στο εύρος σημάτων κατά τα οποία ο αισθητήρας 'ανοίγει'.
3. Συχνότητα συντονισμού, που σε έναν αισθητήρα χωρίς απόσβεση φαίνεται ως μια ανύψωση περίπου 3-4 dB παραπάνω από το επίπεδο που αντιστοιχεί στη συχνότητα αναφοράς.
4. Έξοδος μηδενικής διέγερσης (κυρίως για χωρητικούς και piezoresistive αισθητήρες), όπου ο ενεργός άξονας του αισθητήρα είναι κάθετος προς την επιτάχυνση της βαρύτητας.
5. Η γραμμική συμπεριφορά του αισθητήρα.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των βασικών τύπων επιταχυνσιομέτρων.

3.4.1 Χωρητικά Επιταχυνσιόμετρα (Capacitive Accelerometers)

Ένα επιταχυνσιόμετρο απαιτεί ένα ειδικό και σχετικώς βαρύ στοιχείο, του οποίου η κίνηση υστερεί σε σχέση με το περίβλημα του επιταχυνσιομέτρου, το οποίο είναι συζευγμένο με το υπό μελέτη αντικείμενο. Στη συνέχεια, ένας μετατροπέας μετατόπισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα ως συνάρτηση της επιτάχυνσης. Αυτό το βαρύ στοιχείο συνήθως ονομάζεται σεισμική, αδρανειακή μάζα ή proof mass.

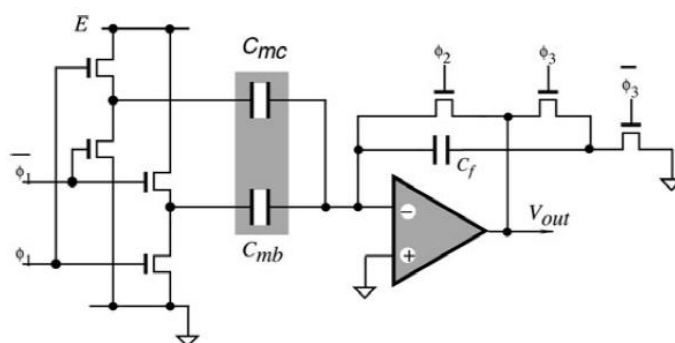


Σχήμα 3-4. (α) Ένα Χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με διαφορικό πυκνωτή, (β) Κάτοψη μιας σεισμικής μάζας υποστηριζόμενης από 4 ελατήρια [9].

Έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή του πυκνωτή διαμορφώνεται από την επιτάχυνση. Μια μέγιστη μετατόπιση, η οποία μετράται από το χωρητικό επιταχυνσιόμετρο, σπανίως υπερβαίνει τα 20 nm. Ως εκ τούτου, μια τέτοια μικρή μετατόπιση απαιτεί μια αξιόπιστη εξάλειψη επιδράσεων, όπως εκτροπές και διάφορες παρεμβολές. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση μιας τεχνικής διαφορίσης, όπου

ένας πρόσθετος πυκνωτής κατασκευάζεται με την ίδια δομή. Η αξία του δεύτερου πυκνωτή θα πρέπει να είναι κοντά σε εκείνη του πρώτου, και θα πρέπει να υποβάλλονται σε μεταβολές με μετατόπιση φάσης 180°. Στη συνέχεια, η επιτάχυνση μπορεί να αντιπροσωπεύεται από μία διαφορά στις τιμές μεταξύ των δύο πυκνωτών.

Το Σχήμα 3-4α απεικονίζει ένα διάγραμμα εγκάρσιας τομής ενός χωρητικού επιταχυνσιομέτρου, όπου μια εσωτερική μάζα περιλαμβάνεται μεταξύ του άνω καλύμματος και της βάσης. Η μάζα υποστηρίζεται από τέσσερις πηγές πυριτίου (Σχήμα 3-4β). Η άνω πλάκα και η βάση διαχωρίζονται από αυτό με τις αντίστοιχες αποστάσεις d_1 και d_2 . Όλα τα τρία μέρη μικροκατασκευάζονται από ένα πλακίδιο πυριτίου. Το Σχήμα 3-5 είναι ένα απλοποιημένο κύκλωμα για έναν μετατροπέα χωρητικότητας σε τάση.



Σχήμα 3-5. Απλοποιημένο κύκλωμα για έναν μετατροπέα χωρητικότητας σε τάση [9].

Το παραπάνω κύκλωμα διέπεται από την ακόλουθη εξίσωση:

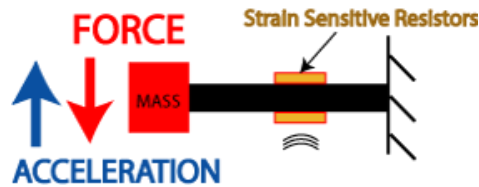
$$V_{out} = 2E \frac{C_{mc} - C_{mb}}{C_f} \quad (3-6)$$

όπου C_{mc} η χωρητικότητα του πυκνωτή μεταξύ των ηλεκτροδίων μάζας και καλύμματος (mass, cap), C_{mb} η χωρητικότητα του πυκνωτή μεταξύ των ηλεκτροδίων μάζας και βάσης (mass, base), C_f η χωρητικότητα του πυκνωτή που συνδέεται παράλληλα με τον ενισχυτή, E η τάση εισόδου του κυκλώματος και V_{out} η τάση εξόδου του κυκλώματος (Σχήμα 3-5).

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για τις μικρές αλλαγές στις χωρητικότητες του αισθητήρα. Η έξοδος του επιταχυνσιομέτρου είναι επίσης μια συνάρτηση της θερμοκρασίας. Καλό είναι ο αισθητήρας να βαθμονομείται για μια ολόκληρη περιοχή θερμοκρασιών και η κατάλληλη διόρθωση να γίνεται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των σημάτων. Μια άλλη αποτελεσματική μέθοδος εξασφάλισης της υψηλής σταθερότητας, είναι ο σχεδιασμός αυτο-βαθμονομούμενων συστημάτων, τα οποία θα κάνουν χρήση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που εμφανίζονται στο επιταχυνσιόμετρο όταν εφαρμόζεται υψηλή τάση είτε σε ένα κάλυμμα είτε σε μια βάση ηλεκτροδίου.

3.4.2 Επιταχυνσιόμετρα Μέτρησης Παραμόρφωσης (Piezoresistive Accelerometers)

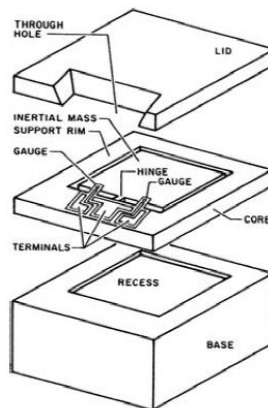
Ως αισθητήριο στοιχείο, τα επιταχυνσιόμετρα αυτού του τύπου, ενσωματώνουν επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges) τα οποία μετρούν τη μηχανική τάση που προκαλείται από μια μάζα προσαρτημένη σε μια ελαστική δοκό [54]. Μια απλοποιημένη εκδοχή τέτοιου αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6. Απλοποιημένη αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου παραμόρφωσης (strain) [53].

Ένα παράδειγμα επιταχυνσιόμετρου ευρέους δυναμικού φάσματος στερεάς κατάστασης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-7. Αναπτύχθηκε από την εταιρία Endevco / Allied Signal Aerospace Co. Ο μικροαισθητήρας αυτός κατασκευάζεται από τρία στρώματα πυριτίου. Το εσωτερικό στρώμα του πυρήνα αποτελείται από μια αδρανειακή μάζα, και μια ελαστική άρθρωση (hinge). Η μάζα αιωρείται μέσα σε ένα χαραγμένο χείλος επί της αρθρώσεως, η οποία σε κάθε πλευρά έχει piezoresistive αισθητήρες. Οι αισθητήρες ανιχνεύουν την κίνηση γύρω από την άρθρωση. Τα εξωτερικά δύο στρώματα, η βάση και το καπάκι, προστατεύουν τα κινούμενα μέρη από το εξωτερικό περιβάλλον. Και τα δύο μέρη έχουν εσοχές ώστε η αδρανειακή μάζα να κινείται ελεύθερα. Πολλά σημαντικά χαρακτηριστικά έχουν ενσωματωθεί σε αυτόν τον αισθητήρα. Το ένα είναι ότι ο ενεργός άξονας βρίσκεται στο επίπεδο του πλακιδίου του πυριτίου, σε αντίθεση με πολλούς άλλους σχεδιασμούς όπου ο άξονας είναι κάθετος προς το φύλλο. Η μηχανική ακεραιότητα και η αξιοπιστία εξασφαλίζονται από την κατασκευή όλων των συστατικών του αισθητήρα από έναν ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου.

Όταν επιταχύνεται αυτή η διάταξη, η μάζα, λόγω αδράνειας, επιβάλλει παραμόρφωση στους αισθητήρες η οποία μετατρέπεται σε μετρούμενη επιτάχυνση.

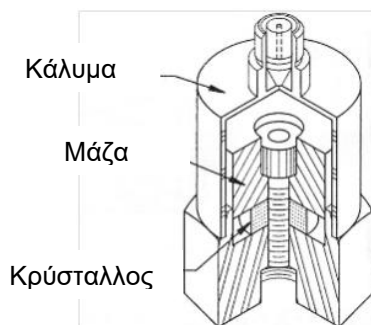


Σχήμα 3-7. Απλοποιημένη δομική ανάλυση ενός επιταχυνσιόμετρου Μέτρησης Παραμόρφωσης [9].

3.4.3 Πιεζοηλεκτρικά Επιταχυνσιόμετρα (Piezoelectric Accelerometers)

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχει άμεση εφαρμογή στους αισθητήρες επιτάχυνσης. Μέσω αυτού του φαινομένου υπάρχει μια άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός κρυσταλλικού υλικού, όπως οι κρύσταλλοι χαλαζία, οι οποίοι χρησιμοποιούνται περιστασιακά ως αισθητήρια στοιχεία, ή τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά, όπως το τιτανικό βάριο. Ένας τέτοιος αισθητήρας φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Μέσα σε μια θήκη βρίσκεται ο κρύσταλλος προσαρμοσμένος κάτω από μια μάζα. Όταν το σύστημα επιταχύνεται, η μάζα πιέζει τον κρύσταλλο

και μετρώντας τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου μπορούμε να υπολογίσουμε την επιτάχυνση που υφίσταται το σύστημα.



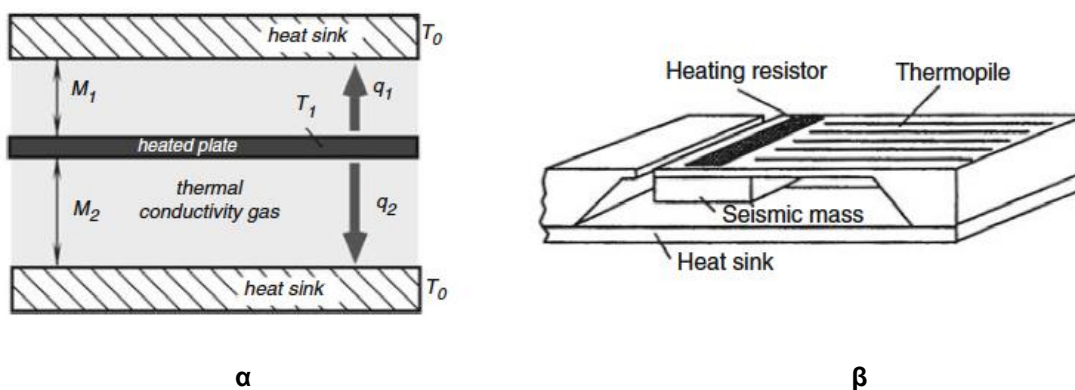
Σχήμα 3-8. Η βασική σχηματική απεικόνιση ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου [9].

3.4.4 Θερμικά Επιταχυνσιόμετρα (Thermal Accelerometers)

Δεδομένου ότι η βασική ιδέα πίσω από ένα επιταχυνσιόμετρο είναι η μέτρηση της κίνησης μιας σεισμικής μάζας, ένας θεμελιώδης τύπος μεταφοράς θερμότητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εν λόγω μέτρηση.

Ένα θερμικό επιταχυνσιόμετρο *Θερμαινόμενης Πλάκας* (Heated Plate Accelerometer), όπως και κάθε άλλο επιταχυνσιόμετρο, περιέχει μια σεισμική μάζα που συγκρατείται από μια λεπτή πρόβολο δοκό και τοποθετείται πολύ κοντά σε μια ψύκτρα, ή μεταξύ δύο ψυκτρών (Σχήμα 3-9). Η μάζα και η δομή του προβόλου είναι κατασκευασμένες με τη χρήση της μικρομηχανουργίας. Ο χώρος μεταξύ αυτών των στοιχείων είναι γεμισμένος με ένα θερμικά αγωγίμο αέριο. Η μάζα θερμαίνεται από μια επιφάνεια ή έναν ενσωματωμένο θερμαντήρα σε μια καθορισμένη θερμοκρασία T_1 . Κάτω από συνθήκες μηδενικής επιτάχυνσης, υπάρχει θερμική ισορροπία μεταξύ μάζας και ψυκτρών: το ποσό της θερμότητας q_1 και q_2 που άγεται στις ψύκτρες μέσω του αερίου από τη μάζα, είναι μια συνάρτηση των αποστάσεων M_1 και M_2 (Σχήμα 3-9α).

Η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο της προβόλου δοκού που συγκρατεί τη σεισμική μάζα εξαρτάται από την απόσταση από το σημείο στήριξης και τις αποστάσεις από τις ψύκτρες. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να μετρηθεί με δίοδους πυριτίου ή θερμοζεύγη προσαρμοσμένα πάνω στη δοκό. Τελικά, η μετρούμενη θερμοκρασία της δοκού, υπο τη μορφή ενός ηλεκτρικού σήματος, αποτελεί τη μέτρηση της επιτάχυνσης.

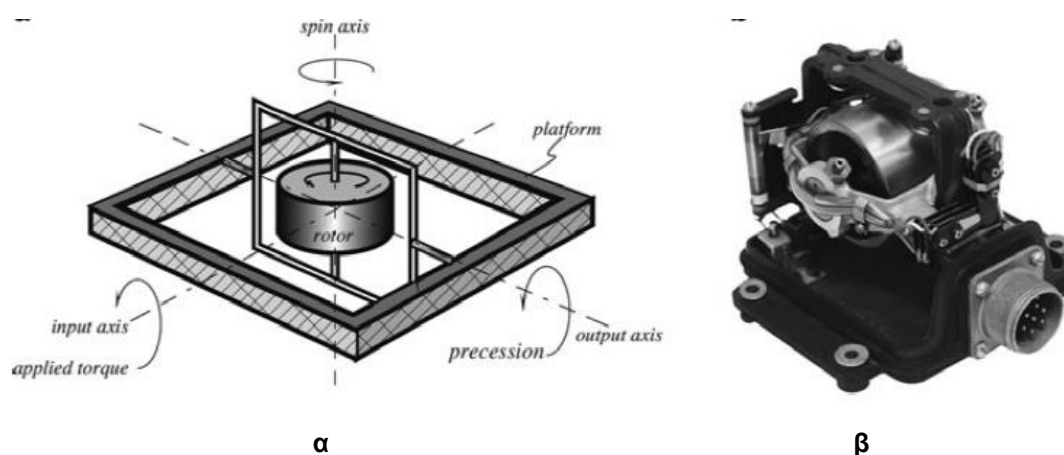


Σχήμα 3-9. (α) Τομή του θερμαινόμενου μέρους, (β) Όψη ενός σχεδίου χωρίς οροφή [9].

Ένα άλλο ενδιαφέρον θερμικό επιταχυνσιόμετρο, είναι αυτό του *Θερμαινόμενου Αερίου* (Heated Gas Accelerometer - HGA), που χρησιμοποιεί ένα αέριο ως σεισμική μάζα. Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα αυτού βασίζεται στην μεταφορά θερμότητας μέσω εξαναγκασμένης συναγωγής. Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Η συναγωγή μπορεί να είναι φυσική (που προκαλείται από τη βαρύτητα) ή εξαναγκασμένη (με την εφαρμογή μιας τεχνητής εξωτερικής δύναμης, π.χ. από ένα φουσητήρα). Στους HGA, μια τέτοια δύναμη παράγεται από την επιτάχυνση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ευαισθησία του αισθητήρα μεταβάλλεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου, γι' αυτό πολλές φορές η όλη διάταξη συμπεριλαμβάνει κι ένα ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας (RTD).

3.5 Γυροσκόπια

Σε πολλές περιπτώσεις όπου ένα γήινο μαγνητικό πεδίο είναι είτε απόν (Διάστημα) ή μεταβάλλεται από την παρουσία κάποιων διαταραχών, το γυροσκόπιο είναι ένας απαραίτητος αισθητήρας για τον καθορισμό της θέσης ενός οχήματος, όπως ενός αεροσκάφους ή βλήματος (Σχήμα 3-10β). Σήμερα, οι εφαρμογές των γυροσκοπίων είναι πολύ ευρύτερες από ό,τι απλά για πλοήγηση. Χρησιμοποιούνται σε συσκευές σταθεροποίησης, στη ρομποτική, στην εξόρυξη μετάλλων και σε πολλά άλλα συστήματα όπου απαιτείται μια σταθερή κατευθυντήρια αναφορά.



Σχήμα 3-10. (α) Μηχανικό γυροσκόπιου ενός βαθμού ελευθερίας, (β) Σύγχρονο γυροσκόπιο αυτόματου πιλότου [9].

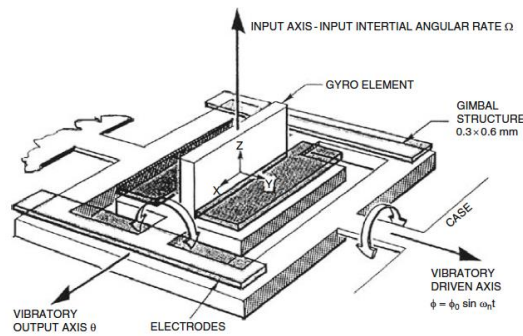
Υπάρχουν διάφοροι τύποι γυροσκοπίων, στους οποίους θα γίνει μια σύντομη αναφορά.

3.5.1 Στροφικό Γυροσκόπιο

Το *Στροφικό Γυροσκόπιο* (Rotor Gyroscope), είναι ένα μηχανικό γυροσκόπιο και αποτελείται από έναν ελεύθερο δίσκο μεγάλης μάζας που περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα, ο οποίος περιορίζεται από ένα πλαίσιο που περιστρέφεται γύρω από έναν ή δύο άξονες. Ως εκ τούτου, ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων περιστροφής, τα γυροσκόπια μπορεί να είναι είτε ενός ή δυο βαθμών ελευθερίας. Η βασική ιδιότητα που καθιστά το επιταχυνσιόμετρο εξαιρετικά χρήσιμο, είναι το ότι λόγω της κατασκευής του δε μεταφέρονται ροπές, με αποτέλεσμα η στροφορμή να διατηρείται σταθερή.

3.5.2 Γυροσκόπιο Μονολιθικού Πυριτίου

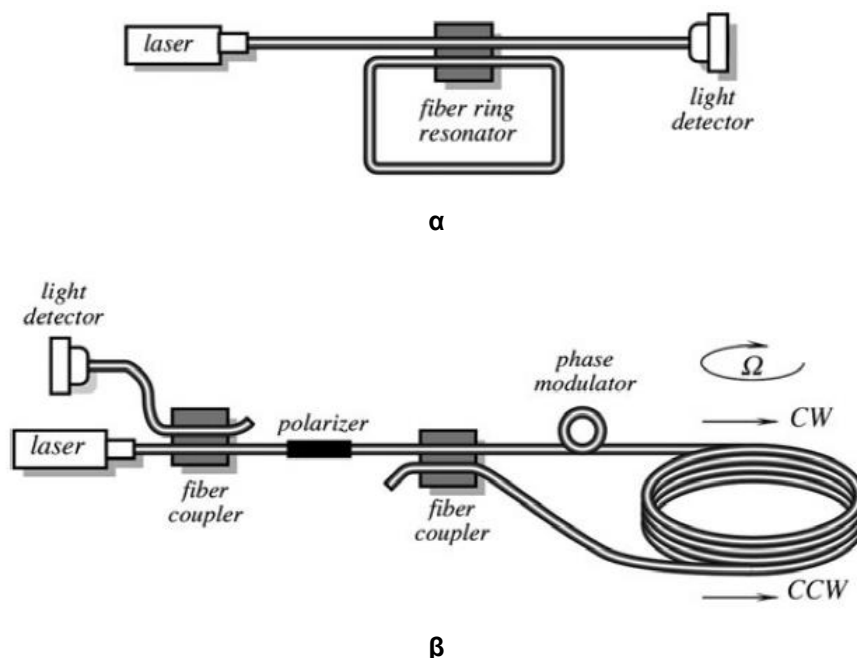
Το *Γυροσκόπιο Μονολιθικού Πυριτίου* (Monolithic Silicon Gyroscope), είναι το αποτέλεσμα της προσπάθειας για κατασκευή πιο μικρών γυροσκοπίων. Η χρήση των MEMS και της τεχνολογίας της μικροεπεξεργασίας, επιτρέπουν το σχεδιασμό μιας μικρογραφίας γυροσκοπίου, όπου ο περιστρεφόμενος δίσκος έχει αντικατασταθεί από ένα δονούμενο στοιχείο (Σχήμα 3-11). Ένα δονούμενο γυροσκόπιο είναι πολύ πιο στιβαρό και μπορεί να αντέξει σε περιβάλλοντα που αφορούν κυρίως σε στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές.



Σχήμα 3-11. Γυροσκόπιο συχνότητας δόνησης [9].

3.5.3 Οπτικά (Laser) Γυροσκόπια

Τέλος, τα *Οπτικά Γυροσκόπια* (Optical (laser) Gyroscopes), αποτελούν τους πλέον σύγχρονους αισθητήρες για οδήγηση και εφαρμογές ελέγχου με την αρχή λειτουργίας τους να βασίζεται στο φαινόμενο Sagnac.



Σχήμα 3-12. (α) Αισθητήρας fiber optic ring resonator και (β) fiber optic analog coil [9].

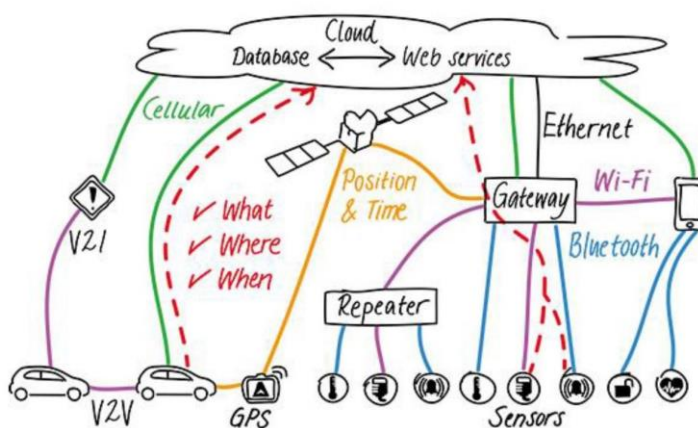
Στην πράξη, τα οπτικά γυροσκόπια σχεδιάζονται είτε με ένα συντονιστή δακτυλίου ινών (fiber ring resonator - Σχήμα 3-12α), ή μια σπείρα ινών (fiber coil) όπου ο δακτύλιος έχει πολλές στροφές μιας οπτικής ίνας. Αποτελείται από ένα βρόχο οπτικής ίνας που σχηματίζεται από ένα διαιρέτη

δέσμης ίνας (fiber beam splitter) που έχει μια πολύ χαμηλή αναλογία διασταυρούμενης σύζευξης. Όταν η εισερχόμενη δέσμη είναι στη συχνότητα συντονισμού του δακτυλίου ίνας, το φως ενώνεται μέσα στην κοιλότητα της ίνας και η ένταση στο εξερχόμενο φως μειώνεται. Το γυροσκόπιο σπείρας ινών (fiber coil resonator) (Σχήμα 3-12β) περιέχει μια πηγή φωτός και τον ανιχνευτή συνδεδεμένο με την ίνα. Οι δύο ακτίνες αναμειγνύονται και προσκρούουν πάνω στον ανιχνευτή, ο οποίος παρακολουθεί τις μεταβολές στην συνημιτονοειδή ένταση που προκαλούνται από τις αλλαγές φάσης μεταξύ των ακτίνων, οι οποίες οφείλονται σε περιστροφική κίνηση.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των οπτικών γυροσκοπίων είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν κάτω από δύσκολα περιβάλλοντα που θα ήταν δύσκολο, ή και αδύνατο, για τα μηχανικά γυροσκόπια.

3.6 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)

Το «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» (IoT) είναι το δίκτυο των φυσικών συσκευών, των οχημάτων, των οικιακών συσκευών και άλλων αντικειμένων που ενσωματώνονται με ηλεκτρονικά, λογισμικά, αισθητήρες, επενεργητές και συνδεσιμότητα δικτύου που επιτρέπει σε αυτά τα αντικείμενα να συνδέονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα [16]. Κάθε «πράγμα» είναι μοναδικά αναγνωρίσιμο μέσω του ενσωματωμένου του συστήματος πληροφορικής, αλλά και είναι σε θέση να αλληλεπιδράσει και να ελεγχθεί εξ'αποστάσεως μέσα στην υπάρχουσα υποδομή του Διαδικτύου. Αυτές οι συσκευές συλλέγουν χρήσιμα δεδομένα με τη βοήθεια διαφόρων υφιστάμενων τεχνολογιών και στη συνέχεια μεταφέρουν αυτόνομα τα δεδομένα μεταξύ άλλων συσκευών [13]. Η τεχνολογία IoT περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τεχνολογίες όπως τα έξυπνα δίκτυα, οι εικονικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, τα έξυπνα σπίτια, οι έξυπνες μεταφορές και οι έξυπνες πόλεις (Σχήμα 3-13).



Σχήμα 3-13. Internet of Things (IoT) [62].

Στην Ιατρική και την υγειονομική περίθαλψη, οι συσκευές IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης της υγείας και σε συστήματα ειδοποίησης έκτακτης ανάγκης. Αυτές οι συσκευές παρακολούθησης της υγείας μπορούν να κυμαίνονται από μετρητές της πίεσης του αίματος και του καρδιακού ρυθμού έως προηγμένες συσκευές που είναι σε θέση να παρακολουθούν εξειδικευμένα εμφυτεύματα, όπως βηματοδότες, ηλεκτρονικά βραχιολάκια ή προηγμένα ακουστικά βοηθήματα. Ορισμένα νοσοκομεία έχουν αρχίσει να εφαρμόζουν «έξυπνα κρεβάτια» που μπορούν να ανιχνεύσουν πότε είναι κατελιημμένα και πότε ένας ασθενής προσπαθεί

να σηκωθεί. Μπορεί επίσης να προσαρμοστεί για να εξασφαλίσει την κατάλληλη πίεση και υποστήριξη στον ασθενή χωρίς τη χειρωνακτική αλληλεπίδραση των νοσηλευτών [28].

Οι εξειδικευμένοι αισθητήρες μπορούν επίσης να τοποθετηθούν σε χώρους διαβίωσης για την παρακολούθηση της υγείας και της γενικής ευημερίας των ηλικιωμένων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη σωστή θεραπεία και βοηθώντας τους ανθρώπους να ανακτήσουν την απώλεια της κινητικότητας μέσω της θεραπείας [17]. Υλοποιούνται όλο και περισσότερες ολοκληρωμένες πλατφόρμες IoT για την παρακολούθηση προγεννητικών και χρόνιων ασθενών, βοηθώντας τους να διαχειριστούν τις ζωτικές τους ανάγκες και τις επαναλαμβανόμενες φαρμακευτικές απαιτήσεις.

Ο όρος "the Internet of Things" σχεδιάστηκε από τον Kevin Ashton της Procter & Gamble, αργότερα του Auto-ID Center του MIT, το 1999 [2].

3.7 Τεχνολογία Bluetooth και Bluetooth Low Energy

3.7.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Το Bluetooth Low Energy εισήχθη το 2010 ως μέρος της προδιαγραφής Bluetooth® 4.0 Core Specification από την Bluetooth Special Interest Group (SIG). Από την έκδοση 4.0 και πάνω του προτύπου Bluetooth υποστηρίζονται δύο νέα συστήματα ασύρματης τεχνολογίας: το Basic Rate (BR, που συνήθως ονομάζεται «BR / EDR» για το «Basic Rate / Enhanced Data Rate» αντίστοιχα) και το Bluetooth Low Energy (BLE).

Για το BLE, οι στόχοι του SIG επικεντρώθηκαν από την αρχή στο σχεδιασμό ενός ασύρματου προτύπου το οποίο θα υποστήριζε τη χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, βελτιστοποιημένη για χαμηλό εύρος ζώνης και χαμηλή πολυπλοκότητα, ώστε να επιτρέπει εφαρμογές χαμηλού κόστους. Σε αυτό το πλαίσιο, το BLE έχει σχεδιαστεί για να μεταδίδει πολύ μικρά πακέτα δεδομένων κάθε φορά, ενώ καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια από τις συσκευές BR / EDR. Επιπλέον, έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει αποτελεσματικές εφαρμογές χαμηλού ενεργειακού και κατασκευαστικού κόστους και να επιτρέπει εφαρμογές που μπορούν να υποστηριχθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα από μια μπαταρία single coin cell.

3.7.2 Συσκευές Dual-mode και Single-mode

Οι συσκευές που υποστηρίζουν τα BR / EDR και BLE αναφέρονται ως συσκευές Dual-mode (διπλής λειτουργίας) και εμπίπτουν στην κατηγορία Bluetooth Smart Ready. Συνήθως σε ένα σύστημα Bluetooth, ένα κινητό τηλέφωνο ή φορητός υπολογιστής είναι μια συσκευή Dual-mode. Οι συσκευές που υποστηρίζουν μόνο BLE αναφέρονται ως συσκευές Single-mode (μονής λειτουργίας) και κυκλοφορούν στο εμπόριο με το Bluetooth Smart branding.

Δεδομένης της λειτουργικότητας αυτών των δύο τύπων συσκευών, είναι:

- Η συσκευή Single-mode (BLE, Bluetooth Smart), ως συσκευή που υλοποιεί μόνο BLE, μπορεί να επικοινωνεί με συσκευές μονής και διπλής λειτουργίας, αλλά όχι με συσκευές που υποστηρίζουν μόνο BR / EDR.
- Η συσκευή Dual-mode (BR / EDR / LE, Bluetooth Smart Ready), ως συσκευή που χρησιμοποιεί τόσο BR / EDR όσο και BLE, μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε συσκευή Bluetooth.

3.7.3 Κύρια δομικά στοιχεία

Στο αρχικό πρότυπο Bluetooth, η Στοιβά Πρωτοκόλλου (*Protocol Stack*) αποτελείται από δύο μπλοκ: τον ελεγκτή και τον κεντρικό υπολογιστή, καθώς στις τυπικές συσκευές BR / EDR Bluetooth, αυτές οι δύο εφαρμοζόταν συνήθως ξεχωριστά. Στο πλαίσιο αυτό, κάθε συσκευή Bluetooth περιλαμβάνει τρία κύρια δομικά στοιχεία.

- *Εφαρμογή* (Application), όπου υλοποιείται η εφαρμογή που διασυνδέεται με τη Στοιβά Πρωτοκόλλου του Bluetooth για να καλύψει μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης,
- *Κεντρικός Υπολογιστής* (Host), που περιέχει τα ανώτερα επίπεδα του protocol stack του Bluetooth, και
- *Ελεγκτής* (Controller), ο οποίος περιέχει τα κατώτερα επίπεδα του protocol stack του Bluetooth, συμπεριλαμβανομένου του ασυρμάτου (radio). Η προδιαγραφή Bluetooth προσφέρει επίσης ένα τυπικό πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του κεντρικού υπολογιστή και του ελεγκτή που ονομάζεται Host Controller Interface (HCI), το οποίο επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ κεντρικών υπολογιστών και ελεγκτών όταν αυτά αναπτύσσονται από διαφορετικούς φορείς.

Οι περισσότερες εφαρμογές αισθητήρων τείνουν να χρησιμοποιούν τη διαμόρφωση του ενσωματωμένου επεξεργαστή (SoC), καθώς οδηγούν τη συνολική πολυπλοκότητα του συστήματος και τα σχετικά έξοδα υλοποίησης της πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων () σε χαμηλότερα επίπεδα, ενώ οι ισχυρές υπολογιστικές συσκευές, όπως τα smartphones και τα tablets, επιλέγονται συνήθως ως χρήση εξωτερικού επεξεργαστή - σε πολλές περιπτώσεις αυτή είναι και η προτιμώμενη λύση για να προστεθεί συνδεσιμότητα BLE σε εξειδικευμένους μικροελεγκτές χωρίς να τροποποιηθεί ο συνολικός σχεδιασμός.

3.7.4 Βασικά στοιχεία δικτύωσης

Μια συσκευή BLE διαθέτει δύο μεθόδους επικοινωνίας: είτε μέσω broadcasting (εκπομπής) είτε μέσω σύνδεσης. Παρόλο που κάθε μέθοδος έχει τα δικά της οφέλη και περιορισμούς και οι δύο τηρούν συγκεκριμένες διαδικασίες, όπως αυτές καθορίζονται από το προφίλ γενικής πρόσβασης (Generic Access Profile - GAP) που περιγράφεται παρακάτω.

Broadcasting και Παρατήρηση

Κατά τη χρήση ασύρματης μετάδοσης (Broadcasting), μια συσκευή BLE στέλνει δεδομένα προς οποιαδήποτε συσκευή ή συσκευή σάρωσης που βρίσκεται εντός αποδεκτού εύρους λήψης. Ουσιαστικά, αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει σε μια συσκευή BLE να στέλνει δεδομένα μονόδρομα σε οποιονδήποτε ή οτιδήποτε είναι ικανό να λάβει αυτά τα μεταδιδόμενα δεδομένα.

Η μετάδοση ορίζει δύο διακριτούς ρόλους:

- *Μεταδότης* (Broadcaster): Αποστέλλει περιοδικά μη συνδεδεμένα πακέτα διαφήμισης (advertising) για οποιονδήποτε επιθυμεί να τα λάβει.
- *Παρατηρητής* (Observer): Σαρώνει επανειλημμένα τις προκαθορισμένες συχνότητες για λήψη τυχόν μη συνδεδεμένων advertising πακέτων που εκπέμπονται τη συγκεκριμένη στιγμή.

Η μέθοδος broadcasting είναι ο μόνος τρόπος για μια συσκευή να μεταδίδει δεδομένα σε περισσότερους από έναν ομότιμων εταίρων (peers) την ώρα. Τα δεδομένα που μεταδίδονται αποστέλλονται χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες advertising του BLE.

Συνδέσεις

Για τη μετάδοση δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις στο BLE πρέπει να γίνει χρήση μιας σύνδεσης (connection). Μια σύνδεση στο BLE δεν είναι παρά μια καθιερωμένη περιοδική ανταλλαγή δεδομένων σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία (συμβάντα σύνδεσης) μεταξύ των δύο peers του BLE που συμμετέχουν σε αυτήν. Συνήθως, τα δεδομένα αποστέλλονται και λαμβάνονται μόνο από τους δύο peers BLE που συμμετέχουν στη σύνδεση και δεν εμπλέκεται άλλη συσκευή.

Οι συνδέσεις περιλαμβάνουν δύο διαφορετικούς ρόλους:

- *Κεντρική* (master): Επαναλαμβάνει τις προκαθορισμένες συχνότητες BLE για πακέτα advertising που μπορούν να συνδεθούν και, όταν είναι εφικτό, ξεκινά μια σύνδεση. Μόλις δημιουργηθεί η σύνδεση, η κεντρική συσκευή διαχειρίζεται το χρονοδιάγραμμα και εκκινεί τις περιοδικές ανταλλαγές δεδομένων.
- *Περιφερειακή* (slave): Μια συσκευή που στέλνει περιοδικά συνδέσιμα πακέτα διαφήμισης και δέχεται εισερχόμενες συνδέσεις. Μόλις συνδεθεί ενεργά, ακολουθεί το χρονοδιάγραμμα της κεντρικής συσκευής και ανταλλάσσει τακτικά δεδομένα μαζί της.

Για να ξεκινήσει μια σύνδεση, η κεντρική συσκευή συλλέγει τα συνδέσιμα advertising πακέτα από μια περιφερειακή και στη συνέχεια στέλνει αίτημα στην περιφερειακή συσκευή για να δημιουργήσει μια αποκλειστική σύνδεση μεταξύ των δύο συσκευών. Μόλις επιτευχθεί η σύνδεση, η περιφερειακή σταματά να διαφημίζεται και οι δύο συσκευές μπορούν να αρχίσουν να ανταλλάσσουν δεδομένα αμφίδρομα. Αν και η κεντρική μονάδα είναι η συσκευή που διαχειρίζεται την εγκατάσταση της σύνδεσης, τα δεδομένα μπορούν να αποστέλλονται ανεξάρτητα από οποιαδήποτε συσκευή κατά τη διάρκεια κάθε συμβάντος σύνδεσης και οι ρόλοι δεν επιβάλλουν περιορισμούς στη διακίνηση δεδομένων ή την προτεραιότητα. Επομένως είναι δυνατή για μια συσκευή να ενεργεί ως κεντρική και περιφερειακή ταυτόχρονα, για την κεντρική συσκευή που θα συνδέεται σε πολλαπλά περιφερειακά καθώς και για την σύνδεση μιας περιφερειακής συσκευής σε πολλαπλές κεντρικές μονάδες.

Οι συνδέσεις παρέχουν τη δυνατότητα οργάνωσης των δεδομένων με πολύ λεπτομερή έλεγχο σε κάθε πεδίο ή ιδιότητα μέσω της χρήσης επιπρόσθετων επιπέδων πρωτοκόλλου. και ειδικότερα του γενικού προφίλ χαρακτηριστικών (Generic Attribute Profile - GATT). Τα δεδομένα οργάνωνονται γύρω από μονάδες που ονομάζονται υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Επιπλέον, οι συνδέσεις επιτρέπουν υψηλότερη διακίνηση, έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν ασφαλή κρυπτογραφημένη σύνδεση, καθώς και διαπραγματεύσεις παραμέτρων σύνδεσης για να ταιριάζουν στο μοντέλο δεδομένων.

Μια συσκευή BLE μπορεί να παρέχει πολλές υπηρεσίες και χαρακτηριστικά, οργανωμένα σε μια ουσιαστική δομή. Οι υπηρεσίες μπορούν να περιέχουν πολλαπλά χαρακτηριστικά, το καθένα με τα δικά του δικαιώματα πρόσβασης και περιγραφικά μεταδεδομένα (metadata).

3.7.5 Πρωτόκολλα και Προφίλ

Εξαρχής η προδιαγραφή Bluetooth από την έναρξή της έχει εισαγάγει ένα σαφή διαχωρισμό μεταξύ των διακριτών εννοιών των πρωτοκόλλων και των προφίλ. Επομένως, στο Bluetooth έχουμε:

- *Πρωτόκολλα*: τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται από όλες τις συσκευές σύμφωνα με τις προδιαγραφές Bluetooth. Τα πρωτόκολλα αποτελούν ουσιαστικά τα επίπεδα που εφαρμόζουν τις διαφορετικές μορφές πακέτων, τη δρομολόγηση, την πολυπλεξία, την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση που επιτρέπει την αποτελεσματική αποστολή των δεδομένων μεταξύ των peers.
- *Προφίλ*: οι κατακόρυφες φέτες λειτουργικότητας που ορίζουν είτε βασικούς τρόπους λειτουργίας που απαιτούνται από όλες τις συσκευές (όπως το GAP και το GATT) είτε ειδικές περιπτώσεις χρήσης (προφίλ εγγύτητας, προφίλ γλυκόζη). Τα προφίλ καθορίζουν το πώς τα πρωτόκολλα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου, είτε γενικού είτε ειδικού.

Γενικά Προφίλ

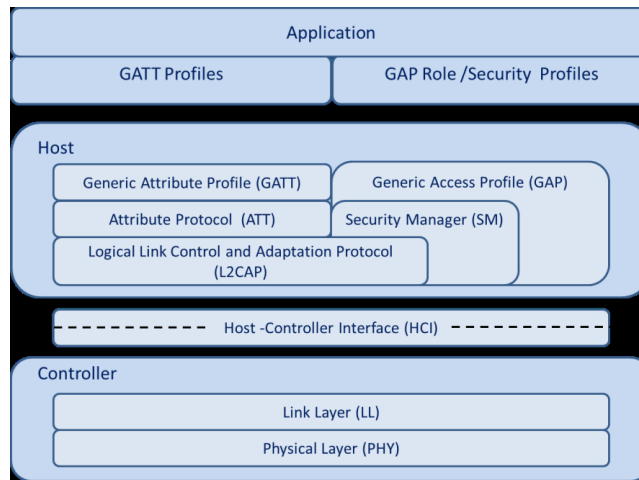
Τα Γενικά Προφίλ (Generic Profiles) ορίζονται από την προδιαγραφή και δύο από αυτά είναι θεμελιώδη, καθώς εξασφαλίζουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών BLE από διαφορετικούς προμηθευτές:

- *Προφίλ Γενικής Πρόσβασης* (Generic Access Profile - GAP): Καθορίζει το μοντέλο χρήσης των ασύρματων πρωτοκόλλων χαμηλότερου επιπέδου για τον καθορισμό των ρόλων, των διαδικασιών και των τρόπων λειτουργίας που επιτρέπουν στις συσκευές να εκπέμπουν δεδομένα, να ανακαλύπτουν συσκευές, να δημιουργούν συνδέσεις, να διαχειρίζονται συνδέσεις και να διαπραγματεύονται τα επίπεδα ασφαλείας. Το GAP είναι ουσιαστικά το ανώτατο επίπεδο ελέγχου του BLE. Είναι υποχρεωτικό να υπάρχει σε όλες τις συσκευές BLE και όλες πρέπει να είναι συμμορφωμένες με αυτό.
- *Προφίλ Γενικών Χαρακτηριστικών* (Generic Attribute Profile - GATT): Διευθύνει τις ανταλλαγές δεδομένων με BLE, καθορίζοντας το βασικό μοντέλο δεδομένων και τις διαδικασίες που επιτρέπουν στις συσκευές να ανακαλύπτουν, να διαβάζουν, να γράφουν και να ωθούν στοιχεία δεδομένων μεταξύ τους. Είναι το ανώτατο επίπεδο δεδομένων του BLE.

Το GAP και το GATT είναι τόσο σημαντικά για το BLE που χρησιμοποιούνται συχνά ως βάση για την παροχή διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interfaces - API) που δρουν ως σημείο εισόδου της αλληλεπίδρασης της εφαρμογής με τη Στοιβή Πρωτοκόλλου.

3.7.6 Στοιβή Πρωτοκόλλου (Protocol Stack)

Ως συσκευή Bluetooth, μια συσκευή BLE μονής λειτουργίας χωρίζεται επίσης σε τρία μπλοκ: ελεγκτής (controller), υποδοχέας (host) και εφαρμογή (application). Κάθε ένα από αυτά τα βασικά δομικά στοιχεία χωρίζεται σε πολλά επίπεδα που παρέχουν τη λειτουργικότητα που απαιτείται για να λειτουργήσει το κάθε στοιχείο. Όλη αυτή η δομή ονομάζεται Στοιβή Πρωτοκόλλου (Protocol Stack) και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

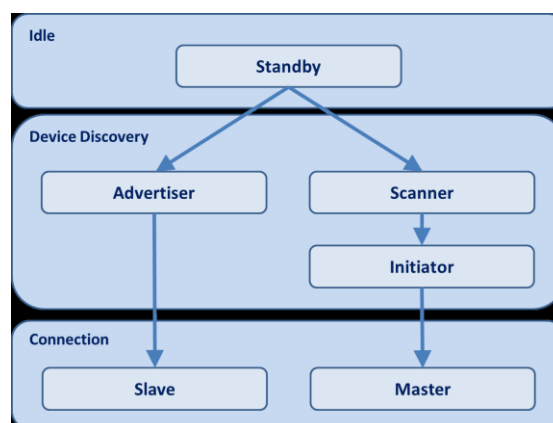


Σχήμα 3-14. Τα επίπεδα του BLE Protocol Stack [61].

Ελεγκτής (Controller)

Επιγραμματικά, ο ελεγκτής (controller) περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες χαμηλότερου επιπέδου που είναι απαραίτητες για την επικοινωνία μιας συσκευής BLE. Στο Physical Layer (PHY) ένα βασικό μπλοκ μεταξύ άλλων είναι ο ασύρματος (radio) που λειτουργεί σε συχνότητα 2.4 GHz. Το Link Layer (LL) συνδέεται άμεσα με το PHY και είναι το περιορισμένο σε πραγματικό χρόνο επίπεδο του protocol stack, επειδή πρέπει να συμμορφώνεται με όλες τις απαιτήσεις χρονισμού που ορίζονται στην προδιαγραφή. Το LL ελέγχει κυρίως την κατάσταση ραδιοσυχνοτήτων της συσκευής και διαχειρίζεται την κατάσταση σύνδεσης του ασυρμάτου.

Συνήθως, συσκευές όπως τα smartphones ή τα tablets τείνουν να δρουν ως masters, ενώ μικρότερες, απλούστερες και συσκευές με περιορισμένη μνήμη όπως αυτόνομοι αισθητήρες, υιοθετούν γενικά τον ρόλο του slave. Μια συσκευή μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις πέντε πιθανές καταστάσεις: αναμονή, διαφήμιση, σάρωση, εκκίνηση ή σύνδεση (standby, advertising, scanning, initiating ή connected αντίστοιχα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-15.



Σχήμα 3-15. Καταστάσεις του Link Layer [61].

Host Controller Interface (HCI) – Πλευρά Controller

Η διεπαφή διασύνδεσης υποδοχέα ελεγκτή (HCI) στην πλευρά του ελεγκτή είναι ένα σύνολο εντολών και γεγονότων ώστε ο host και ο ελεγκτής να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Επιπλέον, η προδιαγραφή

Bluetooth ορίζει διάφορες μεταφορές, καθεμία από τις οποίες επαυξάνει το πρωτόκολλο HCI για μια συγκεκριμένη φυσική μεταφορά (UART, USB, SDIO, κλπ.). Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί είτε μέσω λογισμικού API είτε μέσω φυσικής διασύνδεσης, συμπεριλαμβανομένων των UART και SPI.

Υποδοχέας (Host)

Host Controller Interface (HCI) – Πλευρά Host

Η διεπαφή διασύνδεσης υποδοχέα ελεγκτή (HCI) στην πλευρά του υποδοχέα, παρέχει ένα μέσο επικοινωνίας με τον ελεγκτή μέσω μιας τυποποιημένης διασύνδεσης. Και πάλι αυτό το επίπεδο μπορεί να εφαρμοστεί είτε μέσω λογισμικού είτε μέσω φυσικής διασύνδεσης.

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)

Το επίπεδο Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP) παρέχει υπηρεσίες ενσωμάτωσης δεδομένων στα ανώτερα επίπεδα, επιτρέποντας την end-to-end (άκρο σε άκρο) λογική επικοινωνία δεδομένων. Επίσης, το επίπεδο L2CAP είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση δύο βασικών πρωτοκόλλων: το Πρωτόκολλο Χαρακτηριστικών (Attribute Protocol - ATT) και το Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ασφαλείας (Security Manager Protocol - SMP).

Attribute Protocol (ATT)

Το επίπεδο Πρωτοκόλλου Χαρακτηριστικών (ATT) επιτρέπει σε μια συσκευή BLE να παρέχει ορισμένα στοιχεία, ονομαζόμενα attributes, σε μια άλλη συσκευή BLE. Στο πλαίσιο του ATT, η συσκευή που εκθέτει τα χαρακτηριστικά αναφέρεται ως διακομιστής (server) και η συσκευή peer που ενδιαφέρεται και εργάζεται με αυτά τα χαρακτηριστικά αναφέρεται ως πελάτης (client). Η κατάσταση του Link Layer (master ή slave) της συσκευής είναι ανεξάρτητη από τον ρόλο ATT της συσκευής.

Security Manager (SM)

Το επίπεδο Διαχειριστή Ασφαλείας (SM) ορίζει τα μέσα «ζευγαρώματος» (pairing) και βασικής διανομής, και παρέχει λειτουργίες για τα υπόλοιπα επίπεδα του protocol stack για την ασφαλή σύνδεση και ανταλλαγή δεδομένων με μια άλλη συσκευή BLE. Επιπλέον, παρέχει υποστήριξη για τις ακόλουθες τρεις σημαντικές διαδικασίες:

- *Pairing* (ζευγάρωμα): η διαδικασία με την οποία δημιουργείται και ρυθμίζεται ένα κλειδί κρυπτογράφησης ασφαλείας, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μια ασφαλής, κρυπτογραφημένη σύνδεση. Αυτό το κλειδί είναι προσωρινό και δεν αποθηκεύεται ή διατίθεται για ακόλουθες συνδέσεις.
- *Bonding* (δεσμός): μια ακολουθία ζευγαρώματος που ακολουθείται από την παραγωγή και την ανταλλαγή μόνιμων κλειδιών ασφαλείας, που τυπικά αποθηκεύονται σε non-volatile μνήμη και επομένως επιτρέπουν τη δημιουργία μόνιμου δεσμού μεταξύ δύο συσκευών, η οποία θα τους επιτρέψει να δημιουργήσουν γρήγορα έναν ασφαλή δεσμό και σε μεταγενέστερες συνδέσεις χωρίς να χρειάζεται να εκτελεστεί ξανά η διαδικασία του Bonding.

- *Encryption Re-establishment* (Αποκατάσταση κρυπτογράφησης): Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία bonding, ενδέχεται να έχουν αποθηκευτεί κλειδιά και στις δύο πλευρές της σύνδεσης. Εάν έχουν αποθηκευτεί κλειδιά κρυπτογράφησης, αυτή η διαδικασία καθορίζει τον τρόπο χρήσης αυτών σε επακόλουθες συνδέσεις για την επαναφορά ασφαλούς, κρυπτογραφημένης σύνδεσης χωρίς να χρειάζεται ξανά η ίδια διαδικασία.

Το Pairing μπορεί επομένως να δημιουργήσει έναν ασφαλή σύνδεσμο ο οποίος θα διαρκέσει μόνο για τη διάρκεια της σύνδεσης, ενώ το Bonding δημιουργεί μια μόνιμη συσχέτιση (bond) με τη μορφή κοινών κλειδιών ασφαλείας που θα χρησιμοποιηθούν σε μεταγενέστερες συνδέσεις, μέχρι να αποφασίσει η κάθε πλευρά να τα διαγράψει.

Generic Access Profile (GAP)

Το επίπεδο Προφίλ Γενικής Πρόσβασης (GAP) είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία της σύνδεσης. Χειρίζεται τις λειτουργίες και τις διαδικασίες πρόσβασης της συσκευής συμπεριλαμβανομένης της ανεύρεσης συσκευών, συνδεόμενο άμεσα με το επίπεδο του application ή και τα προφίλ, καθώς και ευθύνεται για τον εντοπισμό συσκευών και υπηρεσιών σχετικών για σύνδεση για τη συσκευή. Επιπλέον, το GAP χειρίζεται την εκκίνηση χαρακτηριστικών ασφαλείας.

Ουσιαστικά, το GAP μπορεί να θεωρηθεί ως το ανώτατο επίπεδο ελέγχου του BLE, δεδομένου ότι καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές εκτελούν διαδικασίες ελέγχου όπως ανακάλυψη συσκευών, σύνδεση και εγκατάσταση ασφάλειας, προκειμένου να διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα και να επιτραπεί η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών από διαφορετικούς προμηθευτές.

Generic Attribute Profile (GATT)

Το επίπεδο Προφίλ Γενικών Χαρακτηριστικών (GATT) είναι ένα πλαίσιο υπηρεσίας που καθορίζει τις υπο-διαδικασίες για τη χρήση του Πρωτοκόλλου Χαρακτηριστικών (ATT). Καθορίζει και εγκαθιστά λεπτομερώς τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να ανταλλάσσονται όλα τα δεδομένα προφίλ και χρήστη μέσω μιας σύνδεσης BLE. Σε αντίθεση με το GAP που ορίζει τις αλληλεπιδράσεις χαμηλού επιπέδου με τις συσκευές, το GATT ασχολείται μόνο με τις πραγματικές διαδικασίες και μορφές μεταφοράς δεδομένων. Το GATT ορίζει δύο ρόλους για τις συσκευές BLE που αλληλεπιδρούν:

- *Client* (Πελάτης): που αποστέλλει αιτήματα σε ένα διακομιστή και λαμβάνει απαντήσεις και πιθανώς επίσης ενημερώσεις που ξεκίνησαν από το διακομιστή.
- *Server* (Διακομιστής): ο οποίος λαμβάνει αιτήματα από έναν πελάτη και στέλνει πίσω απαντήσεις.

Το GATT χρησιμοποιεί το ATT ως πρωτόκολλο μεταφοράς για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών. Αυτά τα δεδομένα οργανώνονται ιεραρχικά σε ενότητες που ονομάζονται «services» (υπηρεσίες), οι οποίες ομάδες εννοιολογικά συσχετίζονται με στοιχεία χρήστη που ονομάζονται «attributes» (χαρακτηριστικά).

Εφαρμογή (Application)

Η Εφαρμογή, όπως και σε όλους τους άλλους τύπους συστημάτων, βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο και είναι υπεύθυνη για τη λογική, το περιβάλλον χρήστη και το χειρισμό των δεδομένων όλων

όσων σχετίζονται με την πραγματική χρήση που υλοποιεί η εφαρμογή. Η αρχιτεκτονική μιας εφαρμογής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από κάθε συγκεκριμένη υλοποίηση και στο BLE συνήθως χρησιμοποιεί τις δυνατότητες που παρέχονται από τα προφίλ BLE.

3.7.7 Διεύθυνση συσκευής Bluetooth

Η διεύθυνση συσκευής Bluetooth είναι το πρωτεύον αναγνωριστικό μιας συσκευής Bluetooth, παρόμοια με τη διεύθυνση Ethernet Media Access Control (MAC). Είναι ένας αριθμός 48-bit (6 byte) που αναγνωρίζει μοναδικά μια συσκευή μεταξύ των εταίρων (peers). Υπάρχουν δύο τύποι διευθύνσεων συσκευών και ένας ή και οι δύο μπορούν να οριστούν σε μια συγκεκριμένη συσκευή:

- Δημόσια (Public) διεύθυνση συσκευής, η οποία ισοδυναμεί με μια σταθερή, προγραμματισμένη από το εργοστάσιο διεύθυνση. Πρέπει να καταχωριστεί στην Αρχή Εγγραφής IEEE και δεν πρέπει ποτέ να αλλάξει κατά τη διάρκεια της ζωής της συσκευής.
- Τυχαία (Random) διεύθυνση συσκευής, η οποία μπορεί είτε να είναι προ-προγραμματισμένη είτε να παράγεται δυναμικά κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής [61].

3.8 Βάσεις Δεδομένων

3.8.1 Σχισιακές Βάσεις Δεδομένων και SQL (Relational Databases)

Μια Σχισιακή Βάση Δεδομένων είναι ένα σύνολο πινάκων που περιέχουν δεδομένα τοποθετημένα σε προκαθορισμένες κατηγορίες. Κάθε πίνακας, αποκαλούμενος «σχέση», περιέχει μία ή περισσότερες κατηγορίες δεδομένων σε στήλες. Κάθε σειρά, περιέχει μια μοναδική εμφάνιση δεδομένων για τις κατηγορίες που ορίζονται από τις στήλες. Για παράδειγμα, μια τυπική βάση δεδομένων για την καταχώρηση επιχειρησιακών παραγγελιών περιλαμβάνει έναν πίνακα που περιγράφει έναν πελάτη με στήλες για όνομα, διεύθυνση, αριθμό τηλεφώνου κ.ο.κ. Ένας άλλος πίνακας θα περιγράφει μια παραγγελία: προϊόν, πελάτη, ημερομηνία, τιμή πώλησης κ.λπ [57](Πίνακας 3-1).

Πίνακας 3-1. Παράδειγμα δομής σχισιακής βάσης δεδομένων

Πίνακας πελατών

ID Key	Όνομ/νυμο	Διεύθυνση	Αρ. Τηλεφώνου
1	Ε.Παπαδόπουλος	Πλαστήρα 9, Αγ.Μαρίνα	6935621475
2	Κ.Σμυρλή	Βαλιτετσίου 3, Πάτρα	6933695524
3	Γ.Μπέρτος	Τροίας 3, Κυψέλη	2103245666
4	Α.Δρογώσης	Δόλιανης 7, Μαρούσι	6936073671

Πίνακας παραγγελιών

Πελάτης (χρήση ID)	Προϊόν	Ημ/μηνία	Τιμή Πώλησης (€)
2	Γόβες	23/2/17	369
2	Τσάντα	01/15/18	225
3	Παντόφλες	15/6/17	49,99
4	Τραγιάσκα	01/15/18	20

Η διαχείριση σχεσιακών βάσεων δεδομένων και η εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών σε αυτές επιτυγχάνεται με την τυποποιημένη γλώσσα προγραμματισμού SQL (Structured Query Language). Οι εντολές SQL χρησιμοποιούνται τόσο για διαδραστικές αναζητήσεις πληροφοριών από μια σχεσιακή βάση δεδομένων όσο για συλλογή δεδομένων για αναφορές.

Αρχικά η SQL δημιουργήθηκε στη δεκαετία του 1970, από την E. F. Codd στην IBM, και έγινε η βασική πρότυπη γλώσσα προγραμματισμού για σχεσιακές βάσεις δεδομένων. Οι χρήσεις της περιλαμβάνουν την τροποποίηση των πινάκων και της δομής της βάσης δεδομένων - προσθήκη, ενημέρωση και διαγραφή σειρών δεδομένων, καθώς επίσης την ανάκτηση υποσυνόλων πληροφοριών για εφαρμογές επεξεργασίας συναλλαγών και αναλύσεων. Οι αναζητήσεις (query) και άλλες λειτουργίες SQL έχουν τη μορφή εντολών γραμμένων ως δηλώσεις. Κοινές δηλώσεις SQL περιλαμβάνουν επιλογή, προσθήκη, εισαγωγή, ενημέρωση, διαγραφή, δημιουργία, αλλαγή και περικοπή (Σχήμα 3-16).

Εκτός από τη σχετικά εύκολη δημιουργία και πρόσβαση, μια σχεσιακή βάση δεδομένων έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι είναι εύκολο να επεκταθεί. Μετά την αρχική δημιουργία βάσης δεδομένων, μπορεί να προστεθεί μια νέα κατηγορία δεδομένων, χωρίς να απαιτείται η τροποποίηση όλων των υπάρχουσών εφαρμογών.

```
Use tempdb
GO

CREATE TABLE Sample (Numbers INT ) ;
GO

INSERT INTO Sample(Numbers) VALUES (10)
GO 20

ALTER TABLE Sample
  ALTER COLUMN Numbers DECIMAL (4, 2) WITH (ONLINE = ON);
GO

SP_HELP Sample
GO

DROP TABLE Sample
GO
```

Σχήμα 3-16. Παραδείγματα εντολών SQL [57].

Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων, μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του χρήστη. Για παράδειγμα, ο διευθυντής ενός υποκαταστήματος ίσως επιθυμεί μια αναφορά για όλους τους πελάτες που αγόρασαν προϊόντα μετά από μια συγκεκριμένη ημερομηνία, ενώ ένας διαχειριστής χρηματοπιστωτικών υπηρεσιών στην ίδια εταιρεία θα μπορούσε, από τους ίδιους πίνακες, να λάβει μια έκθεση σχετικά με τους λογαριασμούς που έπρεπε να καταβληθούν.

Τέλος, η MySQL αποτελεί ένα σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Το πρόγραμμα τρέχει έναν εξυπηρετητή (server) παρέχοντας πρόσβαση πολλών χρηστών σε ένα σύνολο βάσεων δεδομένων.

Ο κώδικας του εγχειρήματος είναι διαθέσιμος μέσω της GNU General Public License, καθώς και μέσω ορισμένων ιδιωτικών συμφωνιών. Ανήκει και χρηματοδοτείται από μία και μοναδική κερδοσκοπική εταιρία, τη σουηδική MySQL AB, η οποία σήμερα ανήκει στην Oracle [42].

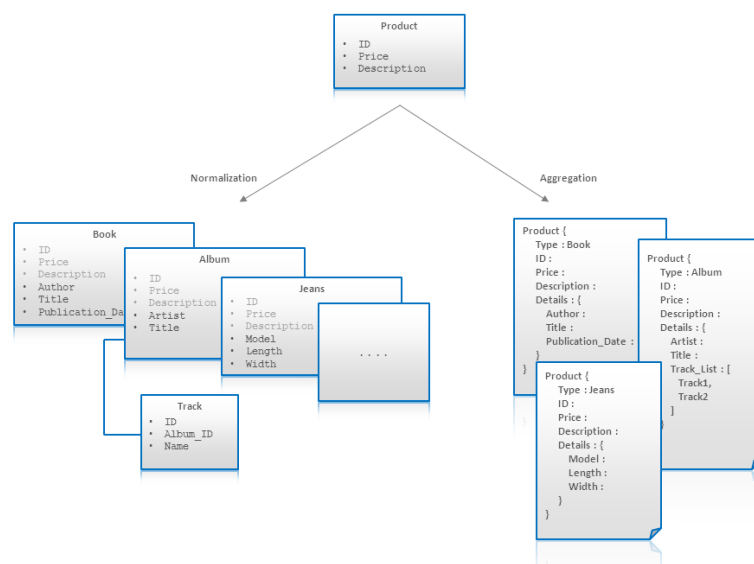
3.8.2 Μη-Σχεσιακές Βάσεις Δεδομένων - NoSQL (Non-Relational Databases)

Μη-σχεσιακή βάση δεδομένων είναι οποιαδήποτε βάση δεδομένων που δεν ακολουθεί το σχεσιακό μοντέλο που παρέχεται από τα παραδοσιακά συστήματα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Αυτή η κατηγορία βάσεων δεδομένων, που επίσης αναφέρονται ως βάσεις δεδομένων NoSQL, έχει σημειώσει σταθερή αύξηση χρήσης τα τελευταία χρόνια με την άνοδο των εφαρμογών Big Data.

Οι Μη-σχεσιακές βάσεις δεδομένων έχουν αυξηθεί σε δημοτικότητα επειδή σχεδιάστηκαν για να ξεπεράσουν τους περιορισμούς των σχεσιακών βάσεων δεδομένων για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων Big Data. Τα Big Data αναφέρονται σε δεδομένα τα οποία αναπτύσσονται και κινούνται πολύ γρήγορα και είναι πολύ διαφορετικά σε δομή από τις παραδοσιακές τεχνολογίες.

Οι Μη-Σχεσιακές βάσεις δεδομένων εξελίχθηκαν από τη σχετική τεχνολογία με τους ακόλουθους τρόπους:

- **Μοντέλα δεδομένων:** Σε αντίθεση με τα μοντέλα Σχεσιακών βάσεων δεδομένων, που απαιτούν προκαθορισμένο σχήμα, οι βάσεις δεδομένων NoSQL προσφέρουν ευέλικτο σχεδιασμό σχήματος που καθιστά πολύ πιο εύκολη την ενημέρωση της βάσης δεδομένων για την αντιμετώπιση μεταβαλλόμενων απαιτήσεων εφαρμογής.
- **Δομή δεδομένων:** Οι Μη-σχεσιακές βάσεις δεδομένων έχουν σχεδιαστεί να χειρίζονται μη δομημένα δεδομένα που δεν ταιριάζουν απόλυτα σε σειρές και στήλες. Αυτό έχει σημασία καθώς τα περισσότερα από τα δεδομένα που δημιουργούνται σήμερα δεν είναι δομημένα.
- **Κλιμάκωση:** Το κόστος του συστήματος κλιμακώνεται ανάλογα με τις ανάγκες του, όπως ο όγκος και η ροή δεδομένων.
- **Πρότυπο ανάπτυξης:** Οι βάσεις δεδομένων NoSQL είναι συνήθως ανοιχτού κώδικα (open source), πράγμα που σημαίνει ότι δεν απαιτείται η καταβολή εκ των προτέρων τελών άδειας χρήσης λογισμικού.



Σχήμα 3-17. Παράδειγμα δομής μιας NoSQL βάσης δεδομένων [46].

Η NoSQL περιλαμβάνει ποικιλία διαφορετικών τεχνολογιών βάσεων δεδομένων που αναπτύχθηκαν ως απάντηση στις αυξανόμενες απαιτήσεις που παρουσιάζονται στην κατασκευή σύγχρονων εφαρμογών:

- Οι προγραμματιστές συνεργάζονται με εφαρμογές που δημιουργούν τεράστιους όγκους νέων, ταχέως μεταβαλλόμενων τύπων δεδομένων - δομημένα, ημι-δομημένα, μη δομημένα και πολυμορφικά δεδομένα.

- Πλέον μικρές ομάδες εργάζονται ευέλικτα, αλλάζοντας γρήγορα τον κώδικα κάθε εβδομάδα ή πολλές φορές κάθε μέρα.

- Οι εφαρμογές οι οποίες κάποτε εξυπηρετούσαν ένα πεπερασμένο κοινό, παρέχονται τώρα ως υπηρεσίες που πρέπει πάντα να είναι προσβάσιμες από πολλές διαφορετικές συσκευές και να κλιμακώνονται παγκοσμίως σε εκατομμύρια χρήστες.

- Οι οργανισμοί στρέφονται πλέον σε αρχιτεκτονικές κλιμάκωσης χρησιμοποιώντας λογισμικό ανοιχτού κώδικα, διακομιστές βασικών προϊόντων και υπολογιστικά clouds αντί για μεγάλους μονολιθικούς διακομιστές και υποδομές αποθήκευσης.

Οι Σχεσιακές βάσεις δεδομένων δεν έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις της κλίμακας και της ευελιξίας που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες εφαρμογές, ούτε δημιουργήθηκαν έτσι ώστε να μπορούν να επωφεληθούν από την αποθηκευτική και την επεξεργαστική ικανότητα που διατίθενται σήμερα [52].

4 Υλοποίηση Πειραματικής Διάταξης

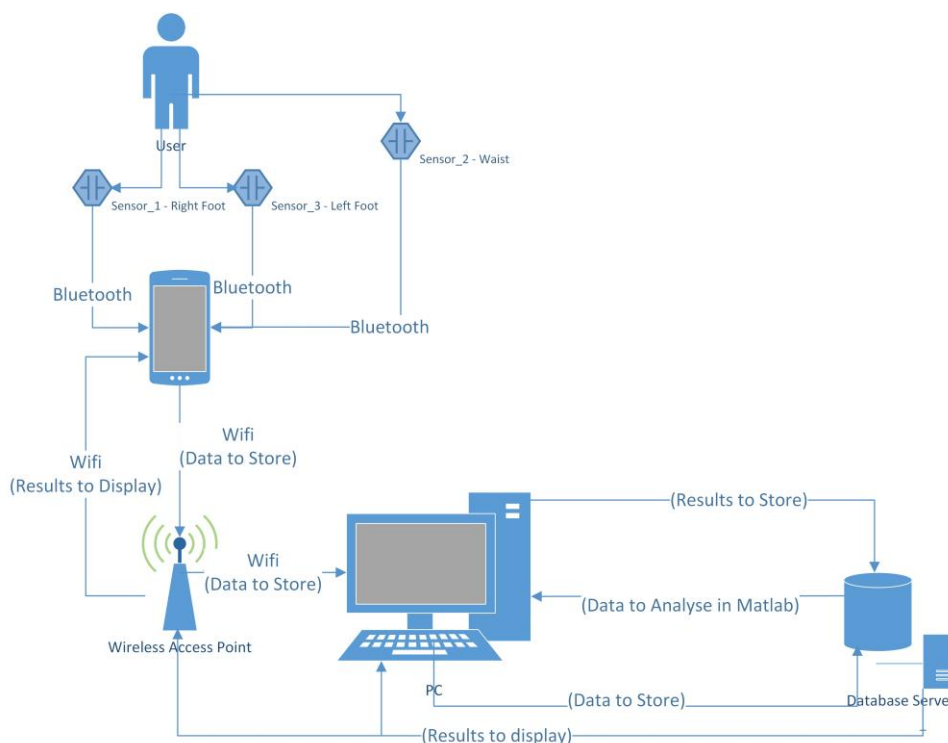
4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για τη λήψη μετρήσεων κατά το ανθρώπινο βάδισμα και πειγράφονται τα επιμέρους στοιχεία που τη συνθέτουν.

Στην Ενότητα 4.2 γίνεται μια γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και του τρόπου με τον οποίο συνεργάζονται τα επιμέρους στοιχεία που τη συνθέτουν. Στην Ενότητα 4.3 αναλύεται η αισθητήρια συσκευή της Dialog Semiconductor που επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία. Στη συνέχεια (Ενότητα 4.4) παρατίθενται και αναλύονται τα στοιχεία της πλατφόρμας ανάπτυξης για τη συσκευή αυτή, καθώς επίσης και η μεθοδολογία προγραμματισμού της. Στην Ενότητα 4.5 αναλύεται η δημιουργία και η επικοινωνία με τις δυο βάσεις δεδομένων που υλοποιήθηκαν για την αποθήκευση των μετρήσεων των αισθητήρων. Η Ενότητα 4.6 περιλαμβάνει την ανάπτυξη της εφαρμογής του κινητού τηλεφώνου για την πειραματική λήψη δεδομένων από τους αισθητήρες, με παράθεση και επεξήγηση του βασικού κώδικα της εφαρμογής. Τέλος, στην Ενότητα 4.7 παρουσιάζονται οι διατάξεις πρόσδεσης των αισθητήρων πάνω στο χρήστη, και το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του ηλεκτρικού διαδρόμου που χρησιμοποιήθηκε για το περπάτημα του χρήστη, στην Ενότητα 4.8.

4.2 Τοπολογία πειραματικής διάταξης

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τη λήψη πειραματικών μετρήσεων, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια εφαρμογή που αποτελείται από διάφορα συνεργαζόμενα μέρη (Σχήμα 4-1).



Σχήμα 4-1. Τοπολογία πειραματικής διάταξης.

Τρείς συνολικά συσκευές IMU είναι προσαρμοσμένες στο πίσω μέρος του κάθε πέλματος και στη μέση του χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, η *Συσκευή 1* τοποθετείται στο Δεξί Πέλημα (Right Foot), η *Συσκευή 2* στη Μέση (Waist) και η *Συσκευή 3* στο Αριστερό Πέλημα (Left Foot).

Οι αισθητήρες αποστέλλουν τις μετρήσεις τους σε μια συσκευή κινητού τηλεφώνου με την οποία συνδέονται μέσω πρωτοκόλλου επικοινωνίας Bluetooth Low Energy. Για το σκοπό αυτό και για συμβατότητα με τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των Bluetooth, επιλέχθηκε η συσκευή κινητού τηλεφώνου Moto g5 plus.

Στο κινητό τηλέφωνο, οι μετρήσεις των αισθητήρων απεικονίζονται σε γραφήματα σε μια εφαρμογή που υλοποιήθηκε ειδικά για αυτό το σκοπό, με τη χρήση της πλατφόρμας EnoThings. Τα δεδομένα αυτά συγκεντρώνονται και αποθηκεύονται προσωρινά στη μνήμη του κινητού σε 'πακέτα' του 1 sec και αποστέλλονται μέσω Wi-Fi ή 4G στον Η/Υ για αποθήκευση σε μια βάση δεδομένων.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα αντλούνται από τη βάση δεδομένων και αναλύονται στο Matlab, όπου έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι με σκοπό την ανάλυση του ανθρώπινου βαδίσματος και την εύρεση διαφόρων παραμέτρων, κάποιες από τις οποίες αποθηκεύονται επίσης στη βάση δεδομένων.

Τέλος, κάποια από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποστέλλονται από τη βάση δεδομένων στην εφαρμογή του κινητού τηλεφώνου μέσω Wi-Fi, ώστε να γίνονται αντιληπτά και από το χρήστη.

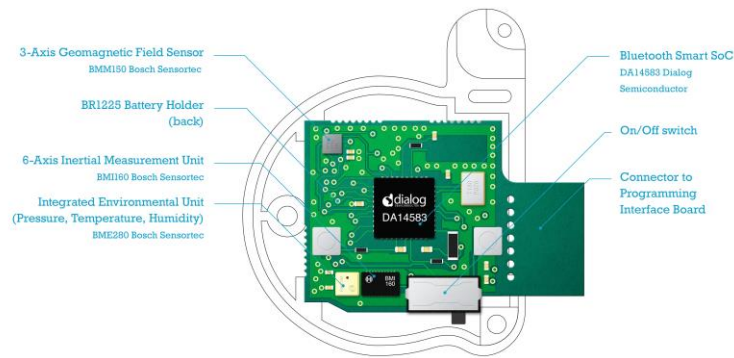
4.3 Αισθητήρας Dialog IoT

4.3.1 Γενικά

Η συσκευή Dialog Semiconductor IoT Sensor board, και συγκεκριμένα το μοντέλο DA14583 Bluetooth Smart device (Σχήμα 4-2), παρέχει τα μέσα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων από έξι διαφορετικούς αισθητήρες για την ανάπτυξη μιας εφαρμογής IoT. Περιλαμβάνει επίσης το SmartFusion, μια μοναδική βιβλιοθήκη λογισμικού της Dialog για την απόκτηση δεδομένων, τη βαθμονόμηση του αισθητήρα και την ενοποίηση των αισθητήρων (sensor fusion). Είναι ιδανική για συστήματα περιορισμένων πόρων, ελαχιστοποιεί τη μνήμη, τις απαιτήσεις επεξεργασίας και την κατανάλωση ενέργειας. Από διάφορους αισθητήρες και MEMS συσκευές που υπάρχουν στο εμπόριο, η συγκεκριμένη αποτελεί τεχνολογία αιχμής που συνδιάζει ασύρματη επικοινωνία BLE, εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης λειτουργία και IMU τριών αξόνων με δειγματοληψία που φτάνει έως και 100Hz. Τα χαρακτηριστικά της αυτά, καθώς και άλλα που παρατίθενται πιο αναλυτικά παρακάτω, την καθιστούν ιδανική λύση για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας, επιλύοντας τα μέχρι τώρα προβλήματα μεγέθους, βάρους, φορητότητας αλλά και κόστους αγοράς.

Αναπτύχθηκε από την εταιρία Dialog Semiconductor με βάση τους αισθητήρες της Bosch Sensortec, λειτουργεί με πολύ χαμηλή κατανάλωση ρεύματος συνδυάζοντας ασύρματη επικοινωνία Bluetooth και επεξεργαστή ARM Cortex-M0 με επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο, μαγνητόμετρο, περιβαλλοντικούς αισθητήρες και εσωτερική Flash μνήμη, σε μια πλακέτα μόλις 16 x 15 mm.

Ο ενσωματωμένος μετατροπέας DC-DC και μια θύρα ραδιοεπικοινωνίας (RF) μονής λήψης την καθιστούν μια πολύ ελκυστική συσκευή για χρήση σε εφαρμογές με μπαταρίες που απαιτούν πολύ μικρό μέγεθος [62].



Σχήμα 4-2. Η συσκευή IoT της Dialog Semiconductors [62].

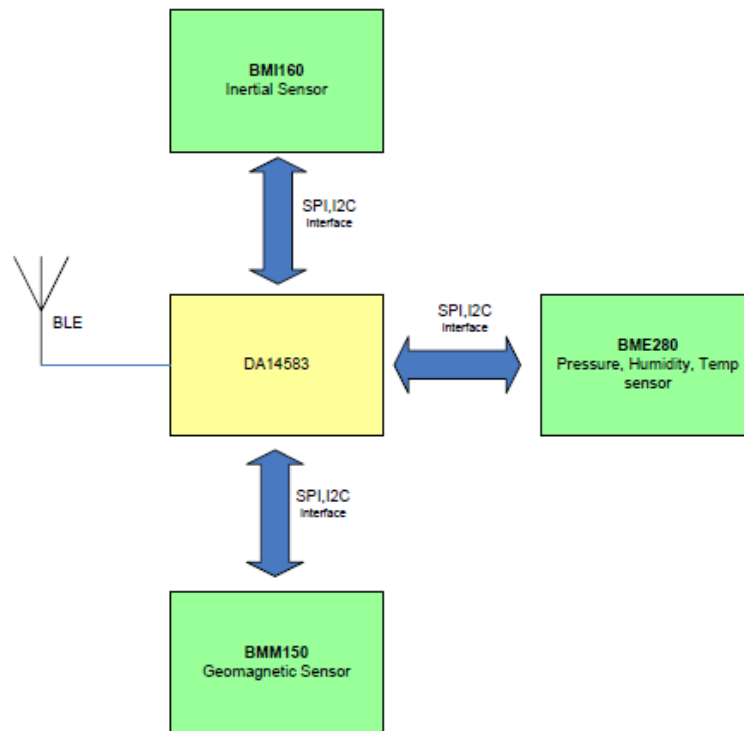
Βασικά χαρακτηριστικά:

- Πλατφόρμα ανάπτυξης ασύρματων αισθητήρων 12 Βαθμών Ελευθερίας (B.E.).
- DA14583 Bluetooth Smart SoC χαμηλής κατανάλωσης.
- BMI160: Μονάδα μέτρησης αδρανείας (IMU) χαμηλής ισχύος, χαμηλού θορύβου, στα 16 bit (τριαξονικό γυροσκόπιο και επιταχυνσιόμετρο συχνότητας δειγματοληψίας μέχρι 100 Hz).
- BMM150: αισθητήρας γεωμαγνητικού πεδίου 3 αξόνων.
- BME280: Ενσωματωμένη περιβαλλοντική μονάδα (πίεση, θερμοκρασία και υγρασία).
- Συχνότητα δειγματοληψίας επιταχυνσιόμετρου και γυροσκοπίου: 0.78 – 100 Hz.
- Εύρος μερήσεων επιταχυνσιόμετρου: 2 – 16 G.
- Εύρος μερήσεων γυροσκοπίου: 250 – 2000 deg/s.
- Έξυπνο λογισμικό για sensor fusion που περιλαμβάνει αυτόματη βαθμονόμηση.
- Μέγεθος συσκευής: 16 x 15 x 5 mm.
- Ροή δεδομένων αισθητήρων ή και προσανατολισμού (quaternion) μέσω διασύνδεσης Bluetooth Smart.
- Καταναλισκόμενο ρεύμα: Συνδεδεμένο: <1,3 mA | Advertising: <110 μA | Sleep: <11 μA [62].

Στο Σχήμα 4-3, παρατίθενται οι μονάδες μέτρησης των αισθητήρων της συσκευής, ενώ στο Σχήμα 4-4 που ακολουθεί απεικονίζεται η διασύνδεση των αισθητήρων και του Bluetooth Smart SoC με την κεντρική πλατφόρμα της συσκευής.

Sensor Type	Notes	Unit
3D Accelerometer	16 bit @ +/-2g	g
3D Gyrometer	16 bit @ +/-262.4 LSB/°/sec	°/sec
3D Magnetometer	Compensated, 13x,y/15z bits. For X,Y axis, raw value x 0,317 For Z axis, raw value x 0,305	μT
Pressure	Compensated, 20 bit range	Pascal
Relative Humidity	Compensated, 16 bit range, %RH is raw value/1024	%
Temperature	Compensated, 20 bit range, °C is raw value x 0.01	°C

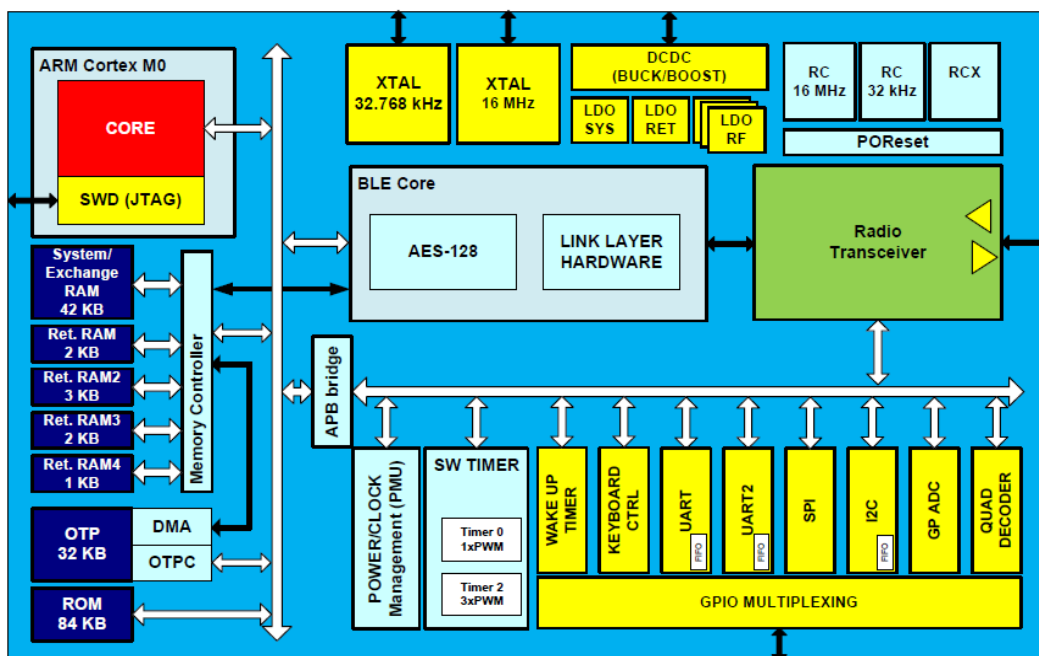
Σχήμα 4-3. Dialog Wearable Service (DWS): Μονάδες μέτρησης αισθητήρων [58].



Σχήμα 4-4. Block diagram του Dialog IoT Sensor [62].

4.3.2 Η Πλατφόρμα System on Chip DA1458x

Η πλατφόρμα DA1458x περιλαμβάνει έναν αριθμό μπλοκ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-5, της οποίας τα επιμέρους στοιχεία περιγράφονται παρακάτω.



Σχήμα 4-5. Τα βασικά δομικά στοιχεία της πλατφόρμας DA1458x [61].

ARM CORTEX M0 CPU

Ο επεξεργαστής Cortex-M0 είναι ένας επεξεργαστής RISC (Reduced Instruction Set Computing) 32-bit με αρχιτεκτονική von Neumann (single bus interface). Χρησιμοποιεί ένα σύνολο εντολών (instructions) που ονομάζεται Thumb, το οποίο εισήχθη και υποστηρίχθηκε για πρώτη φορά στον επεξεργαστή ARM7TDMI. Ωστόσο, συμπεριλαμβάνονται επίσης αρκετά νεότερα σύνολα εντολών από την αρχιτεκτονική ARMv6 καθώς και μερικά από την τεχνολογία Thumb-2. Η τεχνολογία Thumb-2 επέκτεινε το προηγούμενο σύνολο εντολών Thumb για να επιτρέπει όλες τις λειτουργίες να εκτελούνται σε μία κατάσταση CPU. Το σύνολο εντολών που έχει οριστεί στο Thumb-2 περιλαμβάνει εντολές 16-bit και 32-bit. Οι περισσότερες εντολές που δημιουργούνται από τον μεταγλωττιστή C χρησιμοποιούν τις εντολές 16-bit και οι εντολές 32-bit χρησιμοποιούνται όταν η έκδοση 16-bit δεν μπορεί να εκτελέσει τις απαιτούμενες λειτουργίες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή πυκνότητα κώδικα και αποφεύγεται η επιβάρυνση της εναλλαγής μεταξύ δύο συνόλων εντολών. Συνολικά, ο επεξεργαστής Cortex-M0 υποστηρίζει μόνο 56 βασικές εντολές, αν και ορισμένες μπορούν να έχουν περισσότερες από μία φόρμες. Παρόλο που το σετ εντολών είναι μικρό, ο επεξεργαστής Cortex-M0 είναι πολύ ικανός επειδή το σετ εντολών Thumb είναι εξαιρετικά βελτιστοποιημένο. Ακαδημαϊκά, ο επεξεργαστής Cortex-M0 ταξινομείται ως αρχιτεκτονική αποθήκευσης φορτίου (load-store), καθώς έχει ξεχωριστές εντολές για ανάγνωση και εγγραφή στη μνήμη και εντολές για αριθμητικές ή λογικές διαδικασίες που χρησιμοποιούν μητρώα.

Οργάνωση Μνήμης

Για να επιτύχει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, η πλατφόρμα DA1458x περιέχει διαφορετικούς τύπους μνημών που ταιριάζουν καλύτερα σε ορισμένες λειτουργίες. Τα διάφορα αυτά μπλοκ μνήμης είναι τα εξής:

- 84 kB ROM: Περιέχει την ακολουθία κωδικών εκκίνησης (protocol stack και kernel) και κώδικα που σχετίζεται με το πρωτόκολλο BluetoothSmart.
- 32 kB One-Time-Programmable (OTP): Χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του κώδικα εφαρμογής καθώς και των προφίλ Bluetooth Smart. Περιέχει επίσης τα δεδομένα διαμόρφωσης και βαθμονόμησης του συστήματος. Κατά την ενεργοποίηση ή την επαναφορά του DA1458x, ο πρωτεύων κώδικας εκκίνησης (κώδικας ROM) ελέγχει αν έχει προγραμματιστεί η μνήμη OTP και αν αυτό ισχύει, προχωρά στην αντιγραφή (mirroring) του περιεχομένου της OTP στη System RAM και στην εκτέλεση των προγραμμάτων.
- 128 kB Flash: Κατά την ενεργοποίηση ή επαναφορά του DA14583, ο πρωτεύων κώδικας εκκίνησης (ROM code) φορτώνει τον δευτερεύοντα Bootloader (από τη μνήμη OTP ή τη FLASH) και ο δευτερεύων Bootloader προχωράει στην αντιγραφή της FLASH image στη System RAM και εκκινεί την εκτέλεση προγραμμάτων. Η προσθήκη flash καθιστά τη συσκευή DA14583 την πιο ευέλικτη και χαμηλότερης ισχύος συσκευή Bluetooth Smart, καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της χαμηλότερης ισχύος, του μικρότερου μεγέθους και του χαμηλότερου κόστους του συστήματος Bluetooth Smart-on-Chip με ενσωματωμένη flash. Αυτό προσφέρει στον προγραμματιστή μεγάλη ευελιξία για αναβαθμίσεις του λογισμικού over the air (OTA).

- 42 kB System SRAM (Sys-RAM): Χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιγραφή του κώδικα του προγράμματος από την OTP όταν το σύστημα ξυπνά / ενεργοποιείται. Χρησιμεύει επίσης ως Data RAM για ενδιάμεσες μεταβλητές και διάφορα δεδομένα που απαιτεί το πρωτόκολλο. Προαιρετικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πρόσθετος χώρος μνήμης για τις δομές δεδομένων BLE TX και RX.
- 8 kB Retention SRAM: Πρόκειται για 4 ειδικές κυψέλες χαμηλής διαρροής (low leakage) SRAM (2 kB + 2 kB + 3 kB + 1 kB) που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση διαφόρων δεδομένων του πρωτοκόλλου Bluetooth Smart καθώς και των συνολικών μεταβλητών του συστήματος και του stack του επεξεργαστή, όταν το σύστημα μεταβαίνει σε λειτουργία Deep Sleep. Η αποθήκευση αυτών των δεδομένων διασφαλίζει την ασφαλή και γρήγορη διαμόρφωση του πυρήνα BLE μετά την ενεργοποίηση του συστήματος. Κάθε κυψέλη μπορεί να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί ανάλογα με τις ανάγκες όταν η συσκευή βρίσκεται σε λειτουργία Deep Sleep [61].

BLE Core & Radio Transceiver

Ο πομποδέκτης ραδιοεπικοινωνίας (Radio Transceiver) υλοποιεί το τμήμα RF του πρωτοκόλλου Bluetooth Smart. Μαζί με το επίπεδο Bluetooth 4.1 PHY, παρέχει συνδεσιμότητα 93 dB RF για αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία.

Όλα τα μπλοκ RF παρέχονται από on-chip low-drop out-regulators (LDOs). Το σφάλμα είναι προγραμματιζόμενο ανά μπλοκ και βελτιστοποιείται για ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η ραδιοεπικοινωνία Bluetooth LE αποτελείται από το δέκτη (Receiver), τον πομπό (Transmitter), το συνθέτη (Synthesizer), το μπλοκ συνδυασμού Rx / Tx (combiner block) και τους Biasing LDOs.

Περιφερειακές διεπαφές (Peripheral Interfaces)

Η πλατφόρμα υποστηρίζει έναν αριθμό περιφερειακών διεπαφών, συγκεκριμένα UARTs, SPI +, I2C, ADC, αποκωδικοποιητή Quadrature και πληκτρολόγιο μέσω multiplexed GPIOs.

Για κάθε διεπαφή παρέχονται προγράμματα οδήγησης (drivers) για πιο εύκολο προγραμματισμό των μπλοκ του hardware, καθώς ο προγραμματιστής δεν χρειάζεται να αλληλεπιδρά άμεσα με τον προγραμματισμό της register.

Quadrature decoder (Τετραγωνικός αποκωδικοποιητής)

Αυτό το μπλοκ αποκωδικοποιεί τις παλμοσειρές από έναν περιστροφικό κωδικοποιητή ώστε να παρέχει το βήμα και την κατεύθυνση της κίνησης μιας εξωτερικής συσκευής. Υποστηρίζονται τρεις άξονες (X, Y, Z). Ο ενσωματωμένος αποκωδικοποιητής μπορεί να αποκωδικοποιήσει αυτόματα τα σήματα για τους άξονες X, Y και Z μιας συσκευής εισόδου HID, καταγράφοντας το βήμα και την κατεύθυνση αναφοράς: τα κανάλια αναμένεται να παρέχουν μια παλμοσειρά με διαφορά φάσης 90 μοιρών. Ανάλογα με το αν το κανάλι αναφοράς προηγείται ή υστερεί, προσδιορίζεται η κατεύθυνση. Αυτό το μπλοκ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να «ξυπνήσει» το τσιπ μόλις υπάρξει οποιαδήποτε κίνηση από την εξωτερική συσκευή που είναι συνδεδεμένη με αυτό.

4.3.3 Λογισμικό Bluetooth Low Energy

Το λογισμικό BLE υλοποιεί το πρωτόκολλο Bluetooth Smart όπως καθορίζεται στην έκδοση 4.1 του προτύπου Bluetooth και είναι πλήρως συμβατό με αυτό το πρότυπο. Πρόκειται για μια εφαρμογή BLE ενιαίας λειτουργίας (single-mode), επομένως δεν υπάρχει υποστήριξη για το πρωτόκολλο Basic Rate / Enhanced Data Rate (BR / EDR). Τα βασικά μέρη του λογισμικού BLE αποτελούνται από το λογισμικό που σχετίζεται με τον Host και τον Controller [61].

4.3.4 Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου (calibration)

Σε ορισμένες συσκευές έχει διαπιστωθεί ότι το επιταχυνσιόμετρο δεν είναι βαθμονομημένο και υπάρχει σημαντική μετατόπιση ακόμη και όταν η συσκευή τοποθετείται σε οριζόντια επιφάνεια. Στη συγκεκριμένη συσκευή, η βαθμονόμηση του επιταχυνσιόμετρου δεν είναι απαραίτητη εκτός εάν παρατηρηθεί μετατόπιση του επιταχυνσιόμετρου.

4.3.5 Μειονεκτήματα

Ίσως το σημαντικότερο μειονέκτημα της συσκευής Dialog IoT είναι το προβληματικό timestamp των μετρήσεων, επειδή αυτή οργανώνει τα δεδομένα και τα αποστέλλει σε «πακέτα», πολλές μετρήσεις έχουν το ίδιο timestamp αν και έχουν τη σωστή χρονική σειρά, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα στη βάση δεδομένων. Αυτά μπορούν να ξεπεραστούν μόνο με διαχωρισμό των timestamps από την εφαρμογή του κινητού πριν αποσταλούν στη βάση δεδομένων.

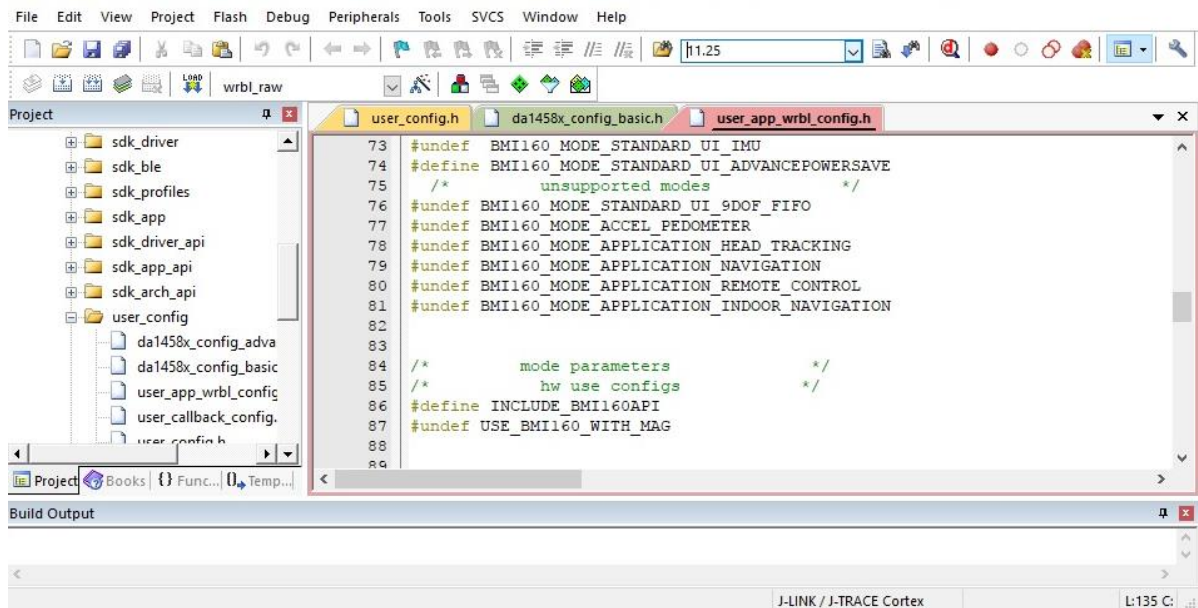
Επίσης, οι συσκευές αυτές δεν είναι σχεδιασμένες ώστε παραπάνω από μια να μπορούν να στέλνουν μεγάλο όγκο δεδομένων ταυτόχρονα, γεγονός το οποίο επίσης ξεπεράστηκε από τον κώδικα της εφαρμογής του κινητού.

4.4 Περιβάλλον Ανάπτυξης SmartBond DA14583 IoT

Η πλατφόρμα λογισμικού της σειράς 5.x επιτρέπει την ανάπτυξη μέσω ενός Software Development Kit (SDK) το οποίο υποστηρίζεται από διάφορα άλλα εργαλεία που στοχεύουν στην παροχή βοήθειας στους σχεδιαστές και τους προγραμματιστές για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών για την οικογένεια συσκευών DA1458x. Τα projects βασίζονται και υποστηρίζονται από το ARM Keil μVision IDE / Debugger, το ARM C / C ++ Compiler και τα απαραίτητα middleware μέρη, τα εργαλεία Keil IDE και Keil build. Το DA1458x μπορεί να συνδεθεί με τα καλώδια ART Segger JTAG, κάτι που υποστηρίζεται πλήρως από το περιβάλλον Keil. Τέλος, για την άμεση αξιολόγηση και προγραμματισμό του τσιπ, η Dialog παρέχει ένα πλήρες γραφικό εργαλείο με την ονομασία SmartSnippets Toolbox.

4.4.1 Προγραμματισμός Αισθητήρων (Keil5 μVision)

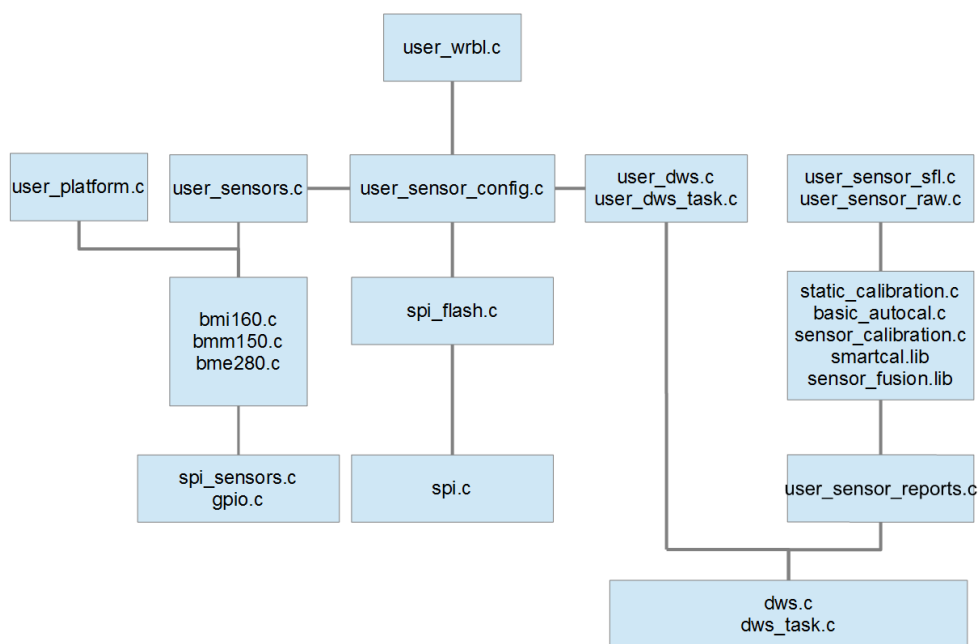
Ο προγραμματισμός των αισθητήρων γίνεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον Keil5 μVision (Σχήμα 4-6). Το βασικό πρόγραμμα είναι διαθέσιμο από την Dialog Semiconductors και μέσω του Keil5 δίνεται η δυνατότητα μετατροπής του προγράμματος των αισθητήρων.



Σχήμα 4-6. Το προγραμματιστικό περιβάλλον Keil 5 της μVision.

Αρχιτεκτονική Προγράμματος

Η αρχιτεκτονική του προγράμματος του αισθητήρα, ακολουθεί το δομικό διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7. Αρχιτεκτονική προγράμματος αισθητήρων [58].

Υπάρχουν δύο βασικά προγράμματα IoT που μοιράζονται μια κοινή βάση δεδομένων:

Πρόγραμμα Keil βιβλιοθήκης συγχρονισμού αισθητήρων (SFL).

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί τον πλήρως λειτουργικό μηχανισμό interrupt / FIFO του BMI160 προκειμένου να αποκτήσει δείγματα με τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό ροής δεδομένων. Τα δείγματα υποβάλλονται σε επεξεργασία από τη βιβλιοθήκη ενοποίησης αισθητήρων (Sensor Fusion Library)

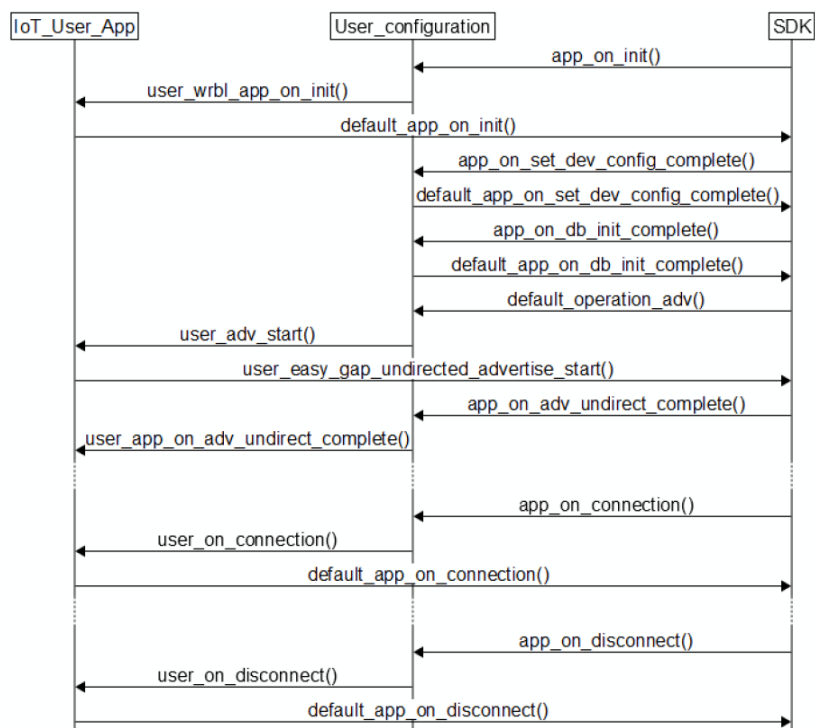
για την παραγωγή ενός τρισδιάστατου διανύσματος του πίνακα προσανατολισμού. Κατόπιν αιτήματος, μόνο ένα μέρος των ανεπεξέργαστων δεδομένων μπορεί να αποστέλλεται στην κεντρική συσκευή με τον ίδιο ρυθμό συγχρονισμού αισθητήρων.

Πρόγραμμα Keil ανεπεξέργαστων δεδομένων (RAW).

Αυτό το πρόγραμμα δεν χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη ενοποίησης αισθητήρων, αλλά όλα τα ανεπεξέργαστα δεδομένα που συγκεντρώνονται από τους αισθητήρες μπορούν να μεταφερθούν στην κεντρική συσκευή μέσω του BLE. Ο μηχανισμός FIFO δεν χρησιμοποιείται και το μέγεθος του κώδικα είναι σημαντικά μικρότερο από το πρόγραμμα SFL.

Επισκόπηση κώδικα

Το DA14568x SDK5 παρέχει ένα σύνολο λειτουργιών στο αρχείο user_config.h για τον έλεγχο βασικών λειτουργιών του συστήματος (Σχήμα 4-8), όπως είσοδος εφαρμογών, έναρξη και ολοκλήρωση της διαφήμισης, σύνδεση και αποσύνδεση.



Σχήμα 4-8. Ροή της εφαρμογής αισθητήρα IoT [62].

Διαφήμιση (Advertise): λειτουργία Sleep & LED

- Η συσκευή διαθέτει λειτουργία αφύπνισης κίνησης. Η αφύπνιση ενεργοποιείται από interrupt του επιταχυνσιόμετρου.
- Μετά την αφύπνιση η συσκευή αρχίζει να διαφημίζεται και η LED αναβοσβήνει. Η συσκευή διαφημίζεται για 60 s και ύστερα μεταβαίνει ξανά σε κατάσταση Sleep.
- Κατά τη σύνδεση της συσκευής, η λυχνία LED αναβοσβήνει για 10 φορές με μικρότερη διάρκεια [58].

Όταν η συσκευή συνδεθεί σε μια κεντρική συσκευή, η λειτουργία `user_on_connection ()` εκτελεί όλες τις απαραίτητες αρχικοποιήσεις:

- Φόρτωση της διαμόρφωσης του αισθητήρα από τη μνήμη Flash.
- Αρχικοποίηση των αισθητήρων.
- Αρχικοποίηση του ελέγχου λειτουργίας αισθητήρων και τις δομών δεδομένων.
- Έναρξη ενημέρωσης παραμέτρων BLE [62].

Παράμετροι σύνδεσης

Κατά τη σύνδεση, η συσκευή εκδίδει μια αίτηση ενημέρωσης παραμέτρων στην κεντρική συσκευή με τις ακόλουθες παραμέτρους (`user_connection_param_conf`, `user_config.h`):

- Διάστημα σύνδεσης min / max: 20 ms / 40 ms
- Latency σύνδεσης: 4 (γεγονότα που χάθηκαν)
- Χρόνος επιτήρησης: 2 s.

Συγχρονισμός αισθητήρων

Και τα δύο προγράμματα (`sfl` & `raw`) λειτουργούν μέσω `interrupts` και ο συγχρονισμός πραγματοποιείται μέσω του `wkup_intr_1_cb`. Αυτό το `interrupt` ενεργοποιείται από τον ακροδέκτη BMI160 INT1 (P0_6). Στο πρόγραμμα RAW δημιουργείται ένα `interrupt` σε κάθε δείγμα BMI160 [58].

Τύπος μεταφοράς δεδομένων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι μεταφοράς δεδομένων μέσω του BLE, καθένας από τους οποίους είναι πιο κατάλληλος για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης. Ορισμένες μεταφορές δεδομένων απαιτούν ένα αίτημα από την κεντρική συσκευή για να ξεκινήσει, ενώ άλλες περιμένουν επιβεβαίωση από την κεντρική συσκευή για τερματισμό.

Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόδοσης, επιλέχθηκαν οι απλούστεροι τύποι μεταφοράς δεδομένων που δεν απαιτούν μηνύματα χειραψίας (`handshaking`):

- Ειδοποίηση επικοινωνίας περιφερειακής προς κεντρική συσκευή.
- Εγγραφή χωρίς απάντηση για την επικοινωνία κεντρικής προς περιφερειακή συσκευή.

Το μέγιστο μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου δεδομένων και στις δύο περιπτώσεις είναι 20 byte (`ATT_MTU-3`) ανά μεταφορά.

Υπάρχει ένα ανώτατο όριο αριθμού πακέτων BLE που μπορούν να ανταλλάσσονται εντός ενός διαστήματος σύνδεσης. Ο Πίνακας 4-1 συνοψίζει τον μέγιστο αριθμό εκπομπών (μονής κατεύθυνσης) ανά διάστημα σύνδεσης για το DA14580-01.

Επίσης, υπάρχει ένα απόλυτο μέγιστο 18 πακέτων για το DA14580, που καθορίζεται από τον αριθμό των `buffers` στον πίνακα ανταλλαγής [59].

Η Dialog Semiconductors έχει αναπτύξει έναν απλό αλγόριθμο που επιτρέπει τη χρήση του DA14580 σε ταχύτητες συνεχούς ροής μέχρι 150 kbit / s:

1. Πλήρωση των `buffer` μέχρι το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό πακέτων για το επιθυμητό διάστημα σύνδεσης.

2. Χρήση του χρόνου κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των δεδομένων για την πλήρωση όλων των υπόλοιπων buffer μέχρι και τον αριθμό 17. Όταν παρουσιαστεί σφάλμα, διακόπτεται η αποστολή δεδομένων και συνεχίζεται η αποστολή στο επόμενο συμβάν σύνδεσης.

3. Μετά το συμβάν λήξης σύνδεσης, προστίθενται μόνο όσα πακέτα απαιτούνται για να φτάσει στον επιθυμητό αριθμό πακέτων.

4. Επιστροφή στο βήμα 2.

Ο επιθυμητός αριθμός των buffer που μπορούν να αποσταλούν ανά συμβάν σύνδεσης είναι κωδικοποιημένος σε έναν πίνακα και ρυθμίζεται κάθε φορά που εμφανίζεται μια νέα σύνδεση ή όταν αλλάζουν οι παράμετροι σύνδεσης. Αυτός ο αριθμός δεν είναι πάντα ίσος με τον μέγιστο αριθμό που αναφέρεται στις προδιαγραφές (Πίνακας 4-1).

Πίνακας 4-1. Μέγιστος αριθμός πακέτων αποστολής / λήψης ανά χρονικό διάστημα (interval) σύνδεσης [59].

Connection interval duration (ms)	Maximum number of packets transmitted/received
7.5	7
8.75	9
10	11
11.25	13
12.5	15
15	17 (peripheral device) or 18 (central device)

Όταν επιχειρείται να σταλούν περισσότερα δεδομένα μέσα σε ένα διάστημα σύνδεσης, το τέλος του συμβάντος σύνδεσης και η αρχή της επόμενης μετάδοσης γίνονται πιο κοντά χρονικά. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται περισσότερα buffers για την αποστολή δεδομένων, λιγότερα buffers είναι διαθέσιμα για την προετοιμασία του επόμενου διαστήματος σύνδεσης. Έτσι, θα πρέπει να προετοιμαστούν και να υποστούν επεξεργασία περισσότερα πακέτα στο συμβάν τέλους σύνδεσης, πριν από την έναρξη της επόμενης περιόδου.

Τα buffer που δεν χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος σύνδεσης θα πρέπει να πληρωθούν ενώ μεταδίδει το BLE. Η CPU είναι συνήθως αδρανής σε αυτό το σημείο.

Ο Πίνακας 4-2 περιέχει τα αποτελέσματα του διατηρούμενου ρυθμού που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον προαναφερθέντα αλγόριθμο, για επικοινωνία μονής κατεύθυνσης (simplex communication). Το μέγιστο των 17 buffer επιτυγχάνεται για ένα διάστημα σύνδεσης 21.25 ms. Για άλλες διάρκειες διαστήματος σύνδεσης (> 21.25 ms), μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η αναμενόμενη τιμή χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Ταχύτητα (kbit / s)} = \frac{17(\text{πακέτα}) \times 20(\text{bytes/ πακέτο}) \times 8(\text{bits/ byte})}{\text{Διάστημα Σύνδεσης (ms)}} \quad (4-1)$$

Πίνακας 4-2. Διατηρούμενος ρυθμός αποστολής / λήψης δεδομένων ανα χρονικό διάστημα (interval) σύνδεσης [59].

Connection interval duration (ms)	Simplex sustained rate (kbit/s)
7.5	149.3
8.75	146.29
10	144
11.25	142.2
12.5	128
13.75	139.6
15	138.6
16.25	128
17.5	137.14
18.75	128
20	128
21.25	128

Ρυθμός δεδομένων σε bit (bit rate) προγράμματος RAW

Σε ένα τυπικό πρόγραμμα RAW με τρεις αισθητήρες ενεργοποιημένους:

Acc / Gyro / Mag rate: 25 Hz / 50 Hz / 25 Hz.

Ο ρυθμός δυαδικών ψηφίων (bit rate) είναι: $25 * 9 + 50 * 9 + 25 * 9 = 900 \text{ B/s} = 7.2 \text{ kbit/s}$, όπου 9 B είναι το μέγεθος της αναφοράς του κάθε αισθητήρα (Πίνακας 4-3).

Στο πρόγραμμα SFL ο ρυθμός μαγνητομέτρου είναι ίδιος με το ρυθμό fusion των αισθητήρων, ενώ στο RAW ο ρυθμός του μαγνητομέτρου είναι ο ίδιος με τον ρυθμό επιταχυνσιομέτρου.

Καθυστέρηση (latency)

Η καθυστέρηση (latency) των ανεπεξέργαστων δεδομένων εξαρτάται από παράγοντες όπως το interrupt latency, το διάστημα σύνδεσης (connection interval) και την επεξεργασία του stack της εφαρμογής του κέντρου. Με ένα τυπικό διάστημα σύνδεσης 30 ms και χρησιμοποιώντας εφαρμογή για Android ή iOS που παρέχεται από την Dialog, το latency των ανεπεξέργαστων δεδομένων μετρήθηκε σε ~ 130 ms.

Μονάδα αισθητήρα BMI160

Ο βασικός αισθητήρας που αφορά την παρούσα εργασία είναι ο αισθητήρας IMU, που είναι ο BMI160. Οι γενικές οδηγίες για τη χρήση του προγράμματος οδήγησης του BMI160 έχουν ως εξής:

- Αρχικοποίηση της μονάδας με τη χρήση του `bmi160_initialize_sensor ()`.
- Ρύθμιση της κατάστασης ισχύος της μονάδας με υπο-ρύθμιση της κατάστασης ισχύος κάθε ενσωματωμένου αισθητήρα (επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο) με τη χρήση του `bmi160_set_sensor_state ()`.
- Ρύθμιση της λειτουργίας της μονάδας σε προκαθορισμένη λειτουργία με τη χρήση του `bmi160_config_running_mode ()`.

- Ανάγνωση δεδομένων του IMU (επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο) με τη χρήση του συνόλου λειτουργιών bmi160_read_[sensor]_[x|y|z]().
- Ανάγνωση δεδομένων του μετρητή βημάτων με τη χρήση του bmi160_read_step_counter ().
- Λήψη κατάλληλων αποφάσεων βάσει της κατάστασης του αισθητήρα (state_feature = accel_state, gyro_state, drdy_accel_stat, drdy_gyro_stat, κλπ.) με τη χρήση του συνόλου λειτουργιών bmi160_get_[state_feature] ().
- Διαφορετική διαμόρφωση ή επέκταση του προκαθορισμένου τρόπου λειτουργίας του αισθητήρα με όρους ρύθμισης συγκεκριμένων λειτουργιών (setting_feature = accel_out_data_rate, accel_bandwidth, accel_range, κλπ.) χρησιμοποιώντας το σύνολο λειτουργιών bmi160_set_[setting_feature] ().
- Λήψη της τρέχουσας διαμόρφωσης του αισθητήρα για ρύθμιση συγκεκριμένης λειτουργίας χρησιμοποιώντας το σύνολο λειτουργιών bmi160_get_[set_feature] ().
- Πρόσβαση στους καταχωρητές της μονάδας αισθητήρα (reg), όταν απαιτείται έλεγχος χαμηλού επιπέδου και χειρισμός δεδομένων, χρησιμοποιώντας το σύνολο λειτουργιών bmi160_[set / get]_reg_[reg] ().

Μετρήσεις αισθητήρων

Στο πρόγραμμα RAW, η ρουτίνα υπηρεσιών των interrupts λαμβάνει ένα interrupt BMI160 DATA READY, το οποίο σηματοδοτεί ότι ένα σύνολο δεδομένων είναι έτοιμο. Στη συνέχεια, η CPU διαβάζει τα δεδομένα από τους αισθητήρες και τα στέλνει στο χρήστη χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα DWS_SENSOR_DATA_RDY_IND.

Επίσης, τα ανεπεξέργαστα δεδομένα των αισθητήρων, που περιλαμβάνουν δεδομένα επιταχυνσιομέτρου, γυροσκοπίου και μαγνητομέτρου, υποβάλλονται προς επεξεργασία από το user_process_raw_samples() μετά τη λήψη ενός μηνύματος WS_SENSOR_DATA_RDY_IND. Αυτή η λειτουργία στέλνει όλα τα ληφθέντα δεδομένα αισθητήρων μέσω BLE στην κεντρική συσκευή χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση user_add_sensor_report_acc_gyro_mag ().

Ο πίνακας Πίνακας 4-3 συνοψίζει τις αναφορές που είναι χρήσιμες για την εφαρμογή της κεντρικής συσκευής (κινητό τηλέφωνο).

Πίνακας 4-3. Δομή και μέγεθος αναφορών για το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο και το μαγνητόμετρο [62].

Report field	Field size (B)	Description
ucReportId	1	1, 2 or 3 (see Table 9)
ucSensorState	1	Always 2 (Sensor Ready)
ucSensorEvent	1	Always 3 (Update Value)
val_x	2	X axis value for the selected sensor
val_y	2	Y axis value for the selected sensor
val_z	2	Z axis value for the selected sensor

Διαμόρφωση προγράμματος αισθητήρα

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ροή δεδομένων για τις μετρήσεις επιταχυνσιομέτρου και γυροσκοπίου στα 100 Hz η κάθε μία, θα πρέπει να βρεθεί ένα χρονικό διάστημα σύνδεσης (interval) που να ικανοποιεί το συνδυασμό του μέγιστου αριθμού πακέτων και του διατηρούμενου ρυθμού αποστολής / λήψης δεδομένων (Πίνακας 4-1 και Πίνακας 4-2).

- Το Bitrate είναι: $100 * 9 + 100 * 9 = 1800 \text{ B/s} = 14.4 \text{ kbit/s}$.

Επίσης, βάσει του μεγέθους των χαρακτηριστικών του Dialog Service (Πίνακας 4-4), προκύπτει ότι απαιτείται η μεταφορά ακόμη 124 kbit/s. Αυτό προκύπτει από την πρόσθεση του μεγέθους των χαρακτηριστικών που πρέπει να αποσταλούν σε συνδυασμό με τα 100Hz δειγματοληψίας. Δηλαδή:

- (Service Attribute) + (Accelerometer Report) + (Gyroscope Report) + (Device Features) + (Control Point) + (Command Reply) = 155 Bytes
- Για 100Hz σε bits: $155 * 100 * 8 = 124 \text{ kbit/s}$

Οπότε συνολικά: $124 + 14.4 = 138.4 \text{ kbit/s}$ (Sustained Simplex Rate).

Λαμβάνοντας υπ'όψιν και το latency που συμβάλει σε πιθανή απώλεια δεδομένων, τελικά το interval που ικανοποιεί αυτό το ρυθμό μετάδοσης / λήψης είναι τα 11.25ms . Οι μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές που δοκιμάστηκαν παρουσίασαν αποτελέσματα χαμηλότερης δειγματοληψίας, οπότε αυτή είναι και η τιμή ρυθμού μετάδοσης που τελικά επιλέχθηκε.

Οι συσκευές της Dialog, είναι εκ των προτέρων ρυθμισμένες στο να λειτουργούν με interval 7.5 ms, παράμετρος που θα πρέπει να μεταβληθεί μέσα στο πρόγραμμα του αισθητήρα.

Πίνακας 4-4. Χαρακτηριστικά Dialog Service [58].

Service/ Characteristic	UUID	Properties	Size (B)	Description
wrbl_dws_svc	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2400	RD	16	Service attribute
wrbl_dws_accel_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2401	NTF	25	Accelerometer Report
wrbl_dws_gyro_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2402	NTF	25	Gyroscope Report
wrbl_dws_mag_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2403	NTF	25	Magnetometer Report
wrbl_dws_baro_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2404	NTF	25	Barometer Report
wrbl_dws_hum_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2405	NTF	25	Humidity Report
wrbl_dws_temp_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2406	NTF	25	Temperature Report
wrbl_dws_sensf_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2407	NTF	25	Sensor Fusion Report
wrbl_dws_feat_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2408	RD	25	Device Features
wrbl_dws_control_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-2618-3F40-2409	WR	32	Control Point
wrbl_dws_control_reply_char	2EA7-8970-7D44-44BB-B097-26183F40-240A	NTF	32	Command Reply

Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει εισαγωγή αυτής της τιμής στο πρόγραμμα του αισθητήρα (Keil5), στο αρχείο `user_config.h`:

```
static const struct connection_param_configuration
user_connection_param_conf = {
    // Connection interval minimum measured in ble double slots (1.25ms)
    // use the macro MS_TO_DOUBLESLOTS to convert from milliseconds (ms)
    //to double slots
    .intv_min = MS_TO_DOUBLESLOTS(11.25),
    // Connection interval minimum measured in ble double slots (1.25ms)
    // use the macro MS_TO_DOUBLESLOTS to convert from milliseconds (ms)
    //to double slots
    .intv_max = MS_TO_DOUBLESLOTS(11.25),
```

Επίσης, στο `user_app_wrbl_config.h`, προαιρετικά γίνεται η μετατροπή των default τιμών για τα εύρη των αισθητήρων:

```
#define DEFAULT_BMI160_ACCEL_RANGE BMI160_ACCEL_RANGE_4G
#define DEFAULT_BMI160_GYRO_RANGE BMI160_GYRO_RANGE_2000_DEG_SEC
```

Τέλος, στο *bmi160.c*, είναι εφικτό να απενεργοποιηθεί το sleep του γυροσκοπίου, το οποίο ενεργοποιείται αν το σήμα είναι κάτω από κάποιο όριο (threshold).

Βασικές παράμετροι διαμόρφωσης αισθητήρα

Ο Πίνακας 4-5 συνοψίζει τις παραμέτρους του αισθητήρα που είναι χρήσιμες για τη διαμόρφωσή του όσον αφορά στα διάφορα μεγέθη των μετρήσεων. Η εφαρμογή του κινητού μπορεί να επέμβει στο πρόγραμμα του αισθητήρα και να επιλέξει τις επιθυμητές παραμέτρους μέσω του *app.js* και της βιβλιοθήκης *iotsensor-ble.js*, όπως εξηγείται στην Ενότητα 4.6.3.

Πίνακας 4-5. Βασικές παράμετροι διαμόρφωσης αισθητήρα [62].

Offset (B)	Description	Value
0	Command ID	10
1	Sensor Combination	2: Gyro 3: Accel + Gyro 5: Accel + Mag 7: Accel + Gyro + Mag
2	Accelerometer Range	0x03: 2G 0x05: 4G 0x08: 8G 0x0C: 16G
3	Accelerometer Rate	0x01: 0.78 Hz 0x02: 1.56 Hz 0x03: 3.12 Hz 0x04: 6.25 Hz 0x05: 12.5 Hz 0x06: 25 Hz 0x07: 50 Hz 0x08: 100 Hz
4	Gyroscope Range	0x00: 2000 deg/s 0x01: 1000 deg/s 0x02: 500 deg/s 0x03: 250 deg/s
5	Gyroscope Rate	0x01: 0.78 Hz (Note 1) 0x02: 1.56 Hz (Note 1) 0x03: 3.12 Hz (Note 1) 0x04: 6.25 Hz (Note 1) 0x05: 12.5 Hz (Note 1) 0x06: 25 Hz 0x07: 50 Hz 0x08: 100 Hz
6	Magnetometer Rate	Reserved for future use
7	Environmental Sensors Rate	1: 0.5 Hz 2: 1 Hz 4: 2 Hz
8	Sensor Fusion Rate	10: 10 Hz 15: 15 Hz 20: 20 Hz 25: 25 Hz
9	Sensor Fusion Raw Data Enable	0: Disabled 1: Enabled
10	Calibration Mode	0: None 1: Static 2: Continuous 3: One Shot
11	Auto Calibration Mode	0: Basic 1: SmartFusion

Δημιουργία .hex αρχείου

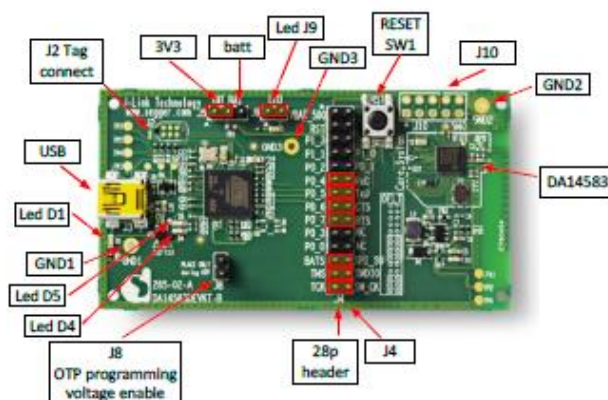
Όταν το πρόγραμμα του αισθητήρα είναι έτοιμο για έλεγχο, θα πρέπει να γίνει *Build* από τη γραμμή εργαλείων του Keil5 (Σχήμα 4-9). Ως αποτέλεσμα, σαρώνεται όλος ο κώδικας, γίνεται έλεγχος για τυχόν λάθη και αναγνωρίζεται η δομή όλου του προγράμματος. Τελικά, όλο το πρόγραμμα κωδικοποιείται σε δεκαεξαδικό σύστημα σε ένα τελικό .hex αρχείο, έτοιμο για εγγραφή στη μνήμη του τσιπ του αισθητήρα.



Σχήμα 4-9. Γραμμή εντολών Keil5 – *Build* [60].

4.4.2 Εγγραφή του προγράμματος στον αισθητήρα

Για το κατέβασμα του τελικού .hex αρχείου, που έγινε build από το περιβάλλον προγραμματισμού Keil5, στον αισθητήρα, θα πρέπει να επιτευχθεί η σύνδεση του αισθητήρα με τον Η/Υ. Αυτό γίνεται μέσω της πλατφόρμας DA1458x (Σχήμα 4-10) και στη συνέχεια με τη χρήση του λογισμικού SmartSnippets Toolbox. Το SmartSnippets Toolbox επιτρέπει τη σύνδεση με τις συσκευές DA1458x μέσω UART ή JTAG για τον προγραμματισμό της on-chip μνήμης OTP ή ακόμα και της εξωτερικής flash και των eeproms.

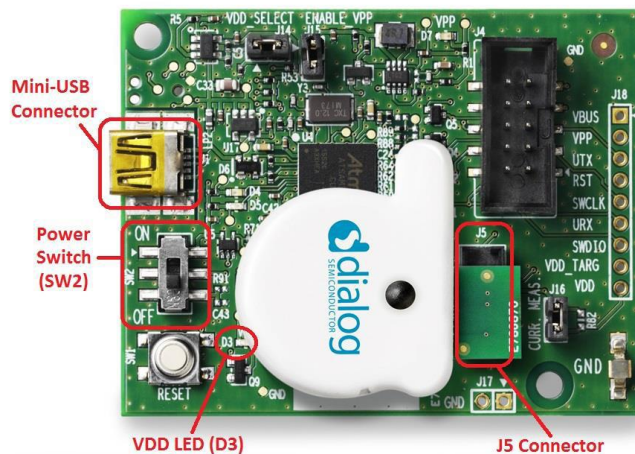


Σχήμα 4-10. Εξαρτήματα και λειτουργίες της πλακέτας DA14583 [60].

Σύνδεση της συσκευής αισθητήρων IoT στην πλακέτα διασύνδεσης επικοινωνίας (Communication Interface Board – CIB)

Για τη σύνδεση της συσκευής στην πλακέτα θα πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

1. Σύνδεση της CIB στον Η/Υ με καλώδιο mini-USB.
2. Απενεργοποίηση του διακόπτη τροφοδοσίας του CIB (SW2, Σχήμα 4-11).
3. Απενεργοποίηση του διακόπτη ON / OFF της συσκευής IoT και αφαίρεση της μπαταρίας.
4. Σύνδεση της πλακέτας του αισθητήρα IoT στο CIB στην υποδοχή J5.
5. Ενεργοποίηση του διακόπτη τροφοδοσίας (SW2). Το LED VDD (D3) πρέπει να ανάβει.



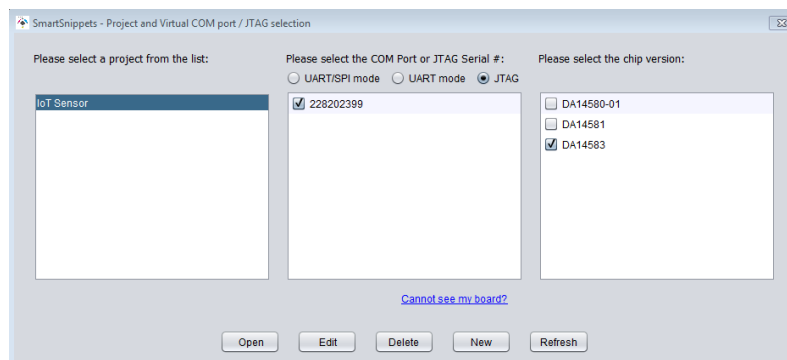
Σχήμα 4-11. Σύνδεση για Download προγράμματος στον αισθητήρα [62].

Προγραμματισμός αισθητήρα με SmartSnippets Toolbox

Για την τελική σύνδεση της πλακέτας DA14583 με τον Η/Υ, θα πρέπει πρώτα να γίνει η εγκατάσταση του SEGGER J-Link software, που εγκαθιστά τους οδηγούς (drivers) J-LINK και USB. Επίσης, θα πρέπει να εγκατασταθούν και οι οδηγοί FTDI.

Το κατέβασμα του προγράμματος σε .hex αρχείο στον αισθητήρα, γίνεται μέσω του SmartSnippets Toolbox ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

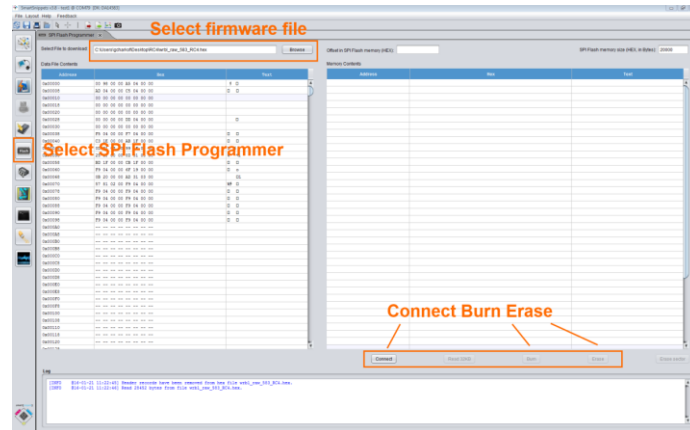
- Εκκίνηση του SmartSnippets Toolbox και εκτέλεση των ακόλουθων βημάτων:
 - Από την οθόνη του project, επιλογή UART mode / UART COM θύρα με DA14583.
 - Σε περίπτωση χρήσης του JTAG, επιλογή JTAG / JTAG ID με DA14583 (Σχήμα 4-12).
 - Επιλογή του τύπου project προς κατέβασμα στον αισθητήρα, από την αριστερή στήλη.
 - Επιλογή τον προγραμματιστή SPI Flash (Σχήμα 4-13).



Σχήμα 4-12. Επιλογή προγράμματος στο SmartSnippets Toolbox [62].

- Στο SPI Flash Programmer ακολουθούνται τα εξής βήματα:
 - Επιλογή νέου αρχείου hex-firmware από το επάνω αριστερό παράθυρο (Σχήμα 4-13).
 - Πάτημα του διακόπτη επαναφοράς (SW1) στην πλακέτα διασύνδεσης.
 - Πάτημα του κομβίου *Connect* (Σύνδεση) (Σχήμα 4-13). Στην οθόνη θα εμφανιστεί ένα μήνυμα επιβεβαίωσης και ίσως ζητηθεί από το χρήστη να πατήσει το κουμπί *Reset* (Επαναφορά) στην πλακέτα διεπαφής.
 - Πάτημα του κομβίου *Erase* (Διαγραφή) για την πλήρη διαγραφή της μνήμης Flash.

- Πάτημα του κομβίου *Burn* (Εγγραφή) για την εγγραφή του νέου firmware στη μνήμη Flash του αισθητήρα.
- Μετά τον επιτυχή προγραμματισμό, επαναφορά της πλακέτας διασύνδεσης χρησιμοποιώντας το SW1 ή μέσω του κυκλώματος ισχύος.
- Εάν για οποιονδήποτε λόγο αποτύχει ο προγραμματισμός, θα πρέπει να γίνει επανάληψη της ακολουθίας προγραμματισμού από την αρχή [62].



Σχήμα 4-13. Εντολές για το SPI στο SmartSnippets Toolbox [62].

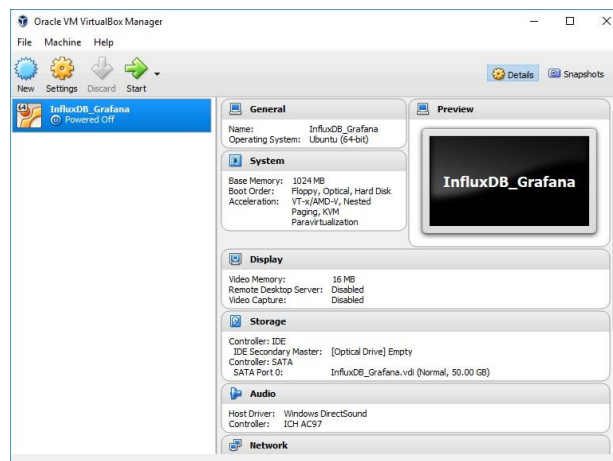
4.5 Δημιουργία και Διαχείριση Βάσης Δεδομένων

Για την παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν δυο διαφορετικές βάσεις δεδομένων για πειραματισμό και συγκριτική αξιολόγηση.

4.5.1 Influx DB

Γενικά

Η InfluxDB είναι μια σχεσιακή βάση δεδομένων χρονοσειρών ανοιχτού κώδικα (open-source) χωρίς εξωτερικές εξαρτήσεις. Είναι χρήσιμη για την καταγραφή μετρήσεων, συμβάντων και εκτέλεση αναλύσεων [44]. Για τη βέλτιστη απόδοσή της, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VM Virtual BOX της Oracle (Σχήμα 4-14), ώστε η InfluxDB να τρέχει μέσα από περιβάλλον Linux.

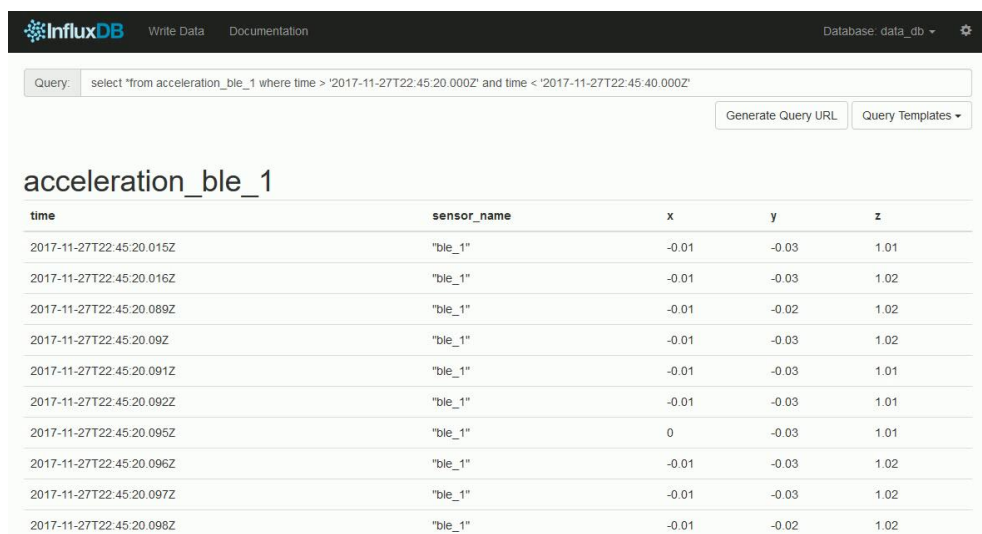


Σχήμα 4-14. Το Virtual Machine της Oracle.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι τα εξής:

- Ενσωματωμένο HTTP API, ώστε να μην απαιτείται η γραφή οποιουδήποτε επιπλέον κώδικα για πρόσβαση και δυνατότητα εύκολης πρόσβασης από περιηγητή διαδικτύου (Σχήμα 4-15).
- Τα δεδομένα μπορούν να ετικετοποιούνται, επιτρέποντας πολύ ευέλικτες αναζητήσεις.
- Γλώσσα αναζητήσεων (query) τύπου SQL.
- Ευκολία εγκατάστασης και διαχείρισης και γρήγορη εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων.
- Στοχεύει στο να απαντάει σε αναζητήσεις πραγματικού χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι κάθε στοιχείο δεδομένων ευρετηριάζεται τη στιγμή της εισόδου του στη βάση δεδομένων και είναι άμεσα διαθέσιμο σε αναζητήσεις με χρόνο αποτελεσμάτων <100ms.

Η μεθοδολογία εγκατάστασής της είναι εξαιρετικά απλή και μπορεί να βρεθεί στο [44].



time	sensor_name	x	y	z
2017-11-27T22:45:20.015Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.01
2017-11-27T22:45:20.016Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.02
2017-11-27T22:45:20.089Z	"ble_1"	-0.01	-0.02	1.02
2017-11-27T22:45:20.09Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.02
2017-11-27T22:45:20.091Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.01
2017-11-27T22:45:20.092Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.01
2017-11-27T22:45:20.095Z	"ble_1"	0	-0.03	1.01
2017-11-27T22:45:20.096Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.02
2017-11-27T22:45:20.097Z	"ble_1"	-0.01	-0.03	1.02
2017-11-27T22:45:20.098Z	"ble_1"	-0.01	-0.02	1.02

Σχήμα 4-15. Βάση δεδομένων InfluxDB.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η InfluxDB παρουσιάζει δύο σημαντικά μειονεκτήματα.

- Εγκατάσταση σε συγκεκριμένο Η/Υ: Αυτό την καθιστά όχι ιδιαίτερα ευέλικτη για αναζητήσεις από απομακρυσμένο χρήστη. Για την πρόσβαση των δεδομένων της, ο Η/Υ πρέπει να είναι μόνιμα ανοιχτός και σε σύνδεση με το διαδίκτυο. Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα εγκατάστασής της σε cloud servers, όπως αυτόν της Amazon Web Services, χωρίς όμως τα πλεονεκτήματα και τις διευκολύνσεις μιας Μη-σχεσιακής βάσης δεδομένων.
- Διαγραφή νεότερων δεδομένων με ίδιο timestamp: Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.3, πολλές από τις μετρήσεις που αποστέλλει η συσκευή Dialog IoT έχουν το ίδιο timestamp. Επίσης, από τη στιγμή που συνδέονται παραπάνω από μια συσκευές στην εφαρμογή του κινητού, είναι πιθανό πολλές από τις μετρήσεις διαφορετικών συσκευών να λαμβάνονται στον ίδιο χρόνο. Αυτό το πρόβλημα, ξεπεράστηκε με μια έξυπνη υπο-ρουτίνα (Ενότητα 4.6.3) και με περαιτέρω διαχωρισμό των κατηγοριών των δεδομένων.

Ρυθμίσεις της βάσης δεδομένων

Αρχικά θα πρέπει να οριστεί σε ποια διεύθυνση θα καταγράφονται τα δεδομένα. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία:

- Εύρεση της IP του Η/Υ με άνοιγμα του cmd και πληκτρολόγηση της εντολής ipconfig.

- Εύρεση της διεύθυνσης IPv4: Η διεύθυνση αυτή καθορίζει τη διεύθυνση του Virtual Machine. Για παράδειγμα, αν η IPv4 είναι 192.168.1.941, τότε το subnet είναι 192.168.1.0 και το τελευταίο ψηφίο μπορεί να λάβει την τιμή από 2-254 κατά επιλογή του χρήστη, αρκεί να μη χρησιμοποιείται από άλλη συσκευή. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο αριθμός 99.
- Ορισμός διεύθυνσης της βάσης δεδομένων, βάσει της επιλεγμένης διεύθυνσης του προηγούμενου βήματος: Στη γραμμή εντολών του Virtual Machine ορίζεται η διεύθυνση αυτή με την εντολή:

```
Sudo ifconfig eth0 192.168.1.99/24 up
```

- Τέλος, γίνεται έλεγχος της επικοινωνίας μεταξύ Virtual Machine και router με την εντολή:

```
ping 192.168.1.1
```

Βασικές Διευθύνσεις

Οι βασικές διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται στη γραμμή διευθύνσεων του internet browser για την αλληλεπίδραση του χρήστη με τη βάση δεδομένων έχουν ως βάση την επιλεγμένη IP όπου αποστέλλονται. Για παράδειγμα, 192.168.1.99:****, όπου τα τελευταία 4 ψηφία μπορεί να είναι:

- 8081 (python server): η διεύθυνση όπου η εφαρμογή του κινητού στέλνει τα δεδομένα που συλλέγει.
- 8086 (database query): η διεύθυνση που εξυπηρετεί τις αναζητήσεις της βάσης δεδομένων.
- 8083 (database API): η διεύθυνση του γραφικού περιβάλλοντος της βάσης δεδομένων. Πρόκειται για τη βασική διεύθυνση διεπαφής του χρήστη με τη βάση.
- 3000 (database plots): διεύθυνση γραφικών απεικονίσεων των δεδομένων της βάσης σε γραφήματα.

Κατηγοριοποίηση δεδομένων

Τα δεδομένα έχουν κατηγοριοποιηθεί με διάφορους τρόπους, έτσι ώστε η αναζήτηση να είναι εύκολη, γρήγορη και ορθολογική.

- **Αισθητήρας-Συσκευή:** Ενώ αρχικά η κατηγοριοποίηση ήταν διακριτοποιημένη βάσει είδους αισθητήρα (επιταχυνσιόμετρου ή γυροσκοπίου) και ονόματος συσκευής (πχ ble_1) ξεχωριστά, λόγω του ότι πολλές μετρήσεις για τον κάθε αισθητήρα είχαν ίδιο timestamp και διαγράφονταν από τη βάση δεδομένων, αποφασίστηκε η σύμπτυξη του αισθητήρα και του ονόματος της συσκευής, με αποτέλεσμα τις παρακάτω 6 βασικές κατηγορίες:
 - Επιταχυνσιόμετρα: acceleration_ble_1, acceleration_ble_2, acceleration_ble_3.
 - Γυροσκόπια: gyroscope_ble_1, gyroscope_ble_2, gyroscope_ble_3.
- **Όνομα συσκευής (“sensor_name”):** Υπάρχει η δυνατότητα αναζήτησης δεδομένων με το όνομα της κάθε συσκευής από τις αντίστοιχες 3 συσκευές: ble_1, ble_2, ble_3.
- **Μετρήσεις (“measurement”):** Η τελευταία υπο-κατηγοριοποίηση βάσει της οποίας μπορεί να γίνει αναζήτηση δεδομένων, είναι η μετρήσεις. Οι μετρήσεις είναι χωρισμένες σε “time”(ns), x, y και z.

Οι αναζητήσεις μπορεί να γίνονται με αναζήτηση δεδομένων από μια συγκεκριμένη κατηγορία ή με συναδιασμό κατηγοριών.

Βασικές εντολές αναζητήσεων (queries)

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων αναζήτησης δεδομένων από την InfluxDB. Παρατίθεται οι σημαντικότερες:

- Μετρήσεις επιταχύνσεων:

```
select *from acceleration_ble_1
```

- Μετρήσεις επιταχύνσεων συγκεκριμένης συσκευής (έχει νόημα αν δεν γίνει σύπτυξη αισθητήρα και ονόματος συσκευής κατά την κατηγοριοποίηση):

```
select *from acceleration where sensor_name = "ble_1"
```

- Μετρήσεις γυροσκοπίων:

```
select *from gyroscope_ble_1
```

- Μετρήσεις μεταξύ χρονικών ορίων (σε ns):

```
select *from acceleration_ble_1 where time > '2018-01-21T16:44:52.999Z' and time<'2018-01-21T16:50:37.3Z'
```

- Διαγραφή μετρήσεων:

```
drop measurement acceleration_ble_1
```

και

```
DELETE *from acceleration_ble_1 where x > 1
```

Τέλος, έχει αναπτυχθεί ένα γραφικό περιβάλλον της βάσης δεδομένων, προσβάσιμο μέσω διαδικτύου, όπου δεδομένα κι αποτελέσματα απεικονίζονται σε γραφήματα (Σχήμα 4-16).



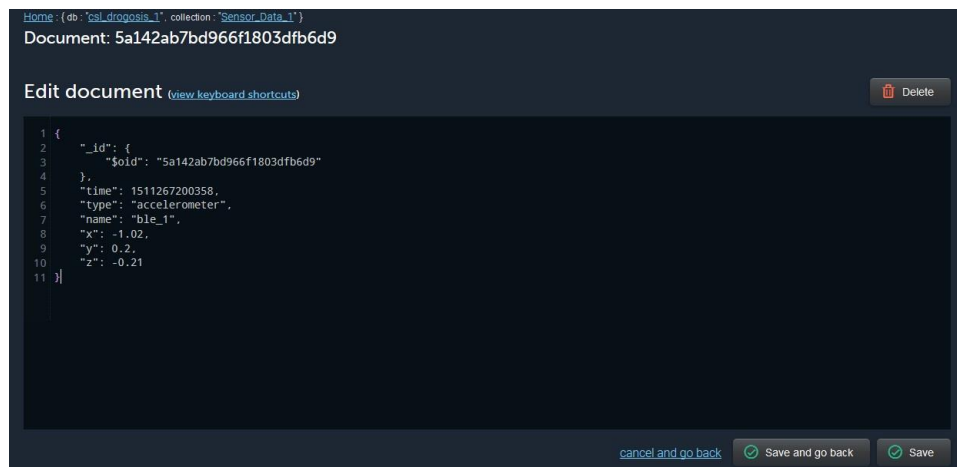
Σχήμα 4-16. Γραφική απεικόνιση δεδομένων σε γραφήματα InfluxDB - Grafana

4.5.2 Mongo DB (Amazon Web Services - AWS)

Από τις πολλές επιλογές Μη-σχεσιακών βάσεων δεδομένων που υπάρχουν, η MongoDB βρίσκεται στην κορυφή με πάνω από 10 εκατομμύρια λήψεις και εκατοντάδες χιλιάδες αναπτύξεις. Η Gartner πρόσφατα ονόμασε τη MongoDB ως ηγέτη στην έκθεση Magic Quadrant για συστήματα διαχείρισης λειτουργικών βάσεων δεδομένων, τα οποία καλύπτουν συστήματα Σχεσιακής και Μη-σχεσιακής. Σύμφωνα με τις τελευταίες βαθμολογίες των DB-Engines, η MongoDB προηγείται σε όλα τα προϊόντα βάσης δεδομένων NoSQL.

Τα δεδομένα οργανώνονται σε *Collections*, στις οποίες φορτώνονται διάφορα *Documents*. Κάθε Document, είναι στην ουσία ένα αρχείο τύπου JSON, οποίο περιλαμβάνει μετρήσεις για ένα συγκεκριμένο timestamp. Οι μετρήσεις δεν διακριτοποιούνται βάσει χρόνου, αλλά κάθε μέτρηση διακριτοποιείται με συγκεκριμένο κωδικό (ID). Έτσι, μπορεί να λαμβάνει και να αποθηκεύει πολλές μετρήσεις ταυτόχρονα ακόμη και με το ίδιο timestamp. Ένα ενδεικτικό document της παρούσης εργασίας, είναι το παρακάτω (Σχήμα 4-17):

```
{  "_id": {
    "$oid": "5a142ab7bd966f1803dfb6d9"
  },
  "time": 1511267200358,
  "type": "accelerometer",
  "name": "ble_1",
  "x": -1.02,
  "y": 0.2,
  "z": -0.21}
```

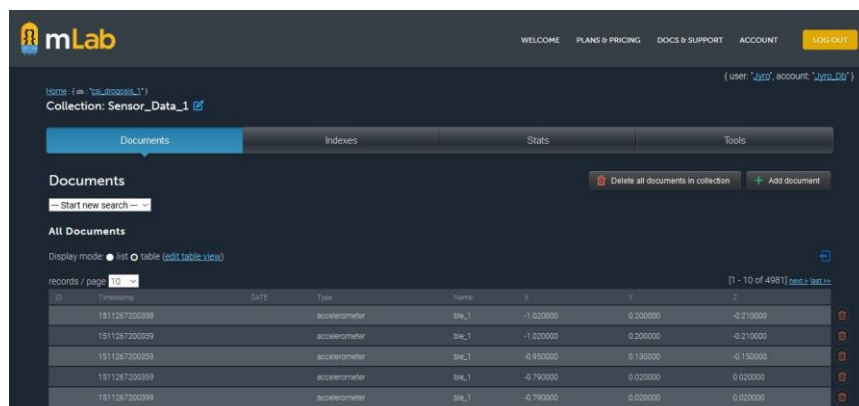


Σχήμα 4-17. Παράδειγμα ενός «document» της MongoDB.

Επίσης, δίνεται η δυνατότητα εμφάνισης των δεδομένων διαδικτυακά υπο τη μορφή ενός πλήρως παραμετροποιήσιμου πίνακα:

```
{  "ID": "id",
  "Timestamp": "time",
  "DATE": "date",
  "Type": "type",
  "Name": "name",
  "X": "x",
  "Y": "y",
  "Z": "z"}
```

Το αποτέλεσμα του παραπάνω κώδικα, είναι η εμφάνιση του Collection σε έναν πίνακα που περιλαμβάνει όλα τα Documents (Σχήμα 4-18). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο πολύ βασικοί κώδικες, στην εφαρμογή του κινητού τηλεφώνου και στο Matlab, που αφορούν κυρίως στη λήψη και αποστολή δεδομένων (Ενότητα 4.6.3 και Ενότητα 5.3).



_id	Timestamp	Type	Name	X	Y	Z
1511267200398		accelerometer	IMU_1	-1.020000	0.200000	-0.210000
1511267200399		accelerometer	IMU_1	-1.020000	0.200000	-0.210000
1511267200399		accelerometer	IMU_1	-0.950000	0.150000	-0.150000
1511267200399		accelerometer	IMU_1	-0.790000	0.020000	0.020000
1511267200399		accelerometer	IMU_1	-0.790000	0.020000	0.020000

Σχήμα 4-18. Το διαδικτυακό περιβάλλον χρήσης της MongoDB – επισκόπηση «Collection».

4.6 Εφαρμογή Κινητού Τηλεφώνου

4.6.1 Χαρακτηριστικά κινητού τηλεφώνου

Η «καρδιά» της όλης πειραματικής διάταξης είναι μια κινητή τηλεφωνική συσκευή. Το κινητό θα πρέπει να είναι ικανό να «τρέχει» την εφαρμογή κινητού τηλεφώνου που αναπτύχθηκε, να παρέχει δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης μέσω Wi-Fi και 4G, αλλά επίσης να διαθέτει πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth Low Energy τελευταίας γενιάς (Version 4.0+). Το κινητό δεν καλείται απλώς να «τρέξει» μια έτοιμη εφαρμογή APK, αλλά μια προσαρμοσμένη εφαρμογή που λειτουργεί μέσω της πλατφόρμας EnoThings, να είναι συνδεδεμένο ταυτόχρονα με 3 συσκευές Dialog IoT και να είναι ικανό να λαμβάνει και να αποστέλλει μέσω Bluetooth 600 μετρήσεις το δευτερόλεπτο.

Το κινητό που τελικά επιλέχθηκε είναι το μοντέλο *Motorola Moto G5 Plus*, του 2017 (Σχήμα 4-19). Τα βασικά στοιχεία βάσει των οποίων έγινε η επιλογή αυτή, είναι η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας του (CPU) και το πρωτόκολλο Bluetooth επικοινωνίας.



Σχήμα 4-19. Το κινητό τηλέφωνο Motorola Moto G5 Plus [45].

Η CPU του συγκεκριμένου κινητού είναι Octa-core 2.0 GHz Cortex-A53, που υπερκαλύπτει τις ανάγκες της εφαρμογής κινητού τηλεφώνου που αναπτύχθηκε, με αποτέλεσμα την απρόσκοπτη λειτουργία και σύνδεση με τις περιφερειακές συσκευές και τον Η/Υ.

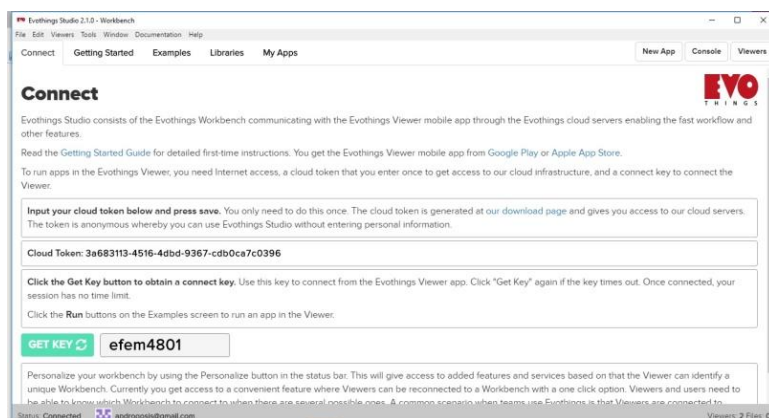
Η τεχνολογία WLAN (Wireless Local Area Network) για την αποστολή των δεδομένων στον Η/Υ είναι Wi-Fi 802.11 a/b/g/n, dual-band, Wi-Fi Direct, που υπερκαλύπτει τις ανάγκες ροής των δεδομένων της εφαρμογής.

Τέλος, και σημαντικότερο, η τεχνολογία Bluetooth που διαθέτει είναι LE (Low Energy), όπως και των συσκευών Dialog IoT, Version 4.2 (τελευταίας γενιάς), EDR (Enhanced Data Rate). Αυτό συμβάλλει γενικά στην ακόμα ταχύτερη ροή δεδομένων, κάτι που όμως δεν αφορά τους αισθητήρες της παρούσης εργασίας Διαθέτει επίσης A2DP (Advanced Audio Distribution Profile) και aptX, που έχουν να κάνουν με την ποιότητα μετάδοσης ήχου και δεν αφορούν τη συγκεκριμένη εφαρμογή [45].

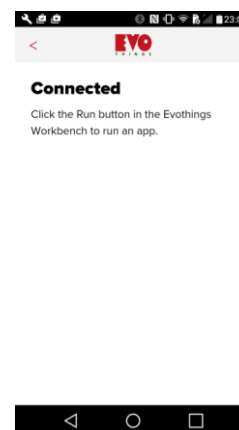
4.6.2 Η πλατφόρμα EvoThings

Για τη σύνδεση των αισθητήρων αναπτύχθηκε μια εφαρμογή κινητού τηλεφώνου, κάνοντας χρήση των γλωσσών javascript και html με τη βοήθεια της πλατφόρμας EvoThings. Η EvoThings επιλέχθηκε λόγω της μεγάλης ποικιλίας σε βιβλιοθήκες για Bluetooth εφαρμογές, αλλά και της ευκολίας που προσφέρει για την επικοινωνία μεταξύ Η/Υ και κινητού τηλεφώνου.

Η πλατφόρμα EvoThings αποτελείται από 2 μέρη, το ένα είναι ένα Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης (IDE) στον Η/Υ και το δεύτερο ένα «Viewer» που «τρέχει» την εφαρμογή στο κινητό τηλέφωνο. Αυτό επιτυγχάνεται όταν στο IDE του Η/Υ πατηθεί το κουμπί «Get Key» (Σχήμα 4-20α) και στη συνέχεια εισαχθεί αυτό το «κλειδί» στο Viewer του κινητού τηλεφώνου στο αντίστοιχο πεδίο. Ο Viewer που τρέχει στο κινητό επιβεβαιώνει ότι οι 2 συσκευές είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους (Σχήμα 4-20β). Το επόμενο βήμα, είναι να γίνει η φόρτωση όλου του φακέλου της εφαρμογής (Σχήμα 4-22) στο IDE κάνοντας απλά Drag & Drop και τέλος να πατηθεί το πλήκτρο 'RUN', ώστε να τρέξει η εφαρμογή στο κινητό τηλέφωνο (Σχήμα 4-21).

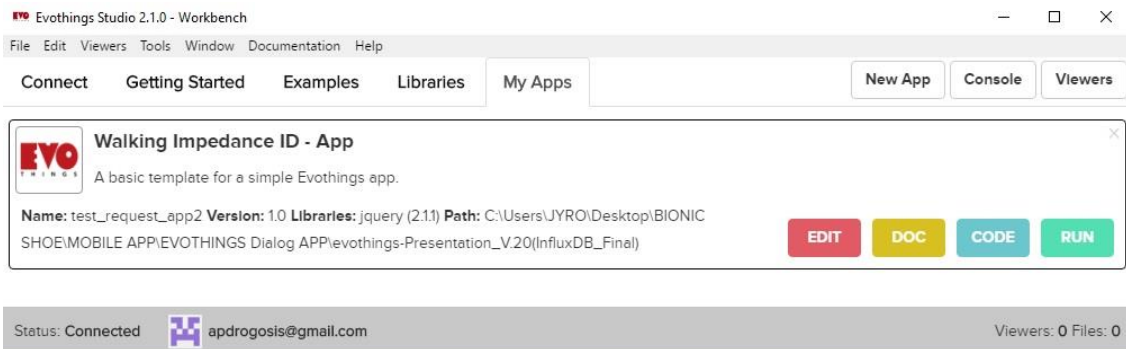


α



β

Σχήμα 4-20. (α) Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Evothings στον Η/Υ, (β) Ο Viewer του Evothings στο κινητό τηλέφωνο.



Σχήμα 4-21. Φόρτωση της εφαρμογής στο κινητό τηλέφωνο.

Από τη στιγμή που οι 2 συσκευές είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και η εφαρμογή είναι σε λειτουργία, αν αλλάξει κάτι στον κώδικα και σωθεί, τότε αυτομάτως ενημερώνεται και η εφαρμογή που ήδη τρέχει στο κινητό τηλέφωνο.

4.6.3 Κώδικας εφαρμογής κινητού τηλεφώνου

Η πλατφόρμα Evothings διαθέτει μια αρχική εφαρμογή για σύνδεση του κινητού τηλεφώνου με μια συσκευή Dialog IoT, η οποία αποτελεί μια ικανοποιητική βάση πειραματισμού. Η όλη εφαρμογή είναι οργανωμένη σε φακέλους (Σχήμα 4-22), οι οποίοι εκτός από τους βασικούς κώδικες λειτουργίας και γραφικών περιλαμβάνουν και βιβλιοθήκες για τη σύνδεση με το BLE, τη σύνδεση με την πλατφόρμα EvoThings και την ενσωμάτωση επιπλέον λειτουργιών στην εφαρμογή. Οι βασικοί κώδικες της εφαρμογής είναι ο *app.js* για το λειτουργικό κομμάτι της εφαρμογής, που υλοποιήθηκε κάνοντας χρήση της γλώσσας javascript, και ο *index.html* για το γραφικό περιβάλλον, γραμμένος σε γλώσσα html. Για να συνδεθεί όμως η συσκευή του κινητού με 3 συσκευές Dialog IoT, να επιτευχθεί η ζητούμενη συχνότητα δειγματοληψίας, αλλά και το εύρος μετρήσεων επιταχύνσεων και γωνιακών ταχυτήτων, πρέπει να γίνουν αρκετές τροποποιήσεις στους κώδικες.

Name	Date modified	Type	Size
.idea	19/9/2016 5:16 μμ	File folder	
libs	19/9/2016 5:16 μμ	File folder	
ui	19/9/2016 5:16 μμ	File folder	
ajax-requests	8/9/2016 4:25 μμ	JavaScript File	1 KB
app	19/9/2016 7:37 μμ	JavaScript File	22 KB
app-icon	1/7/2016 4:01 πμ	PNG File	25 KB
evthings.json	30/8/2016 8:54 μμ	JSON File	1 KB
fake-app	31/8/2016 1:06 πμ	JavaScript File	2 KB
index	8/9/2016 11:13 μμ	Firefox HTML Doc...	7 KB
index2	1/9/2016 5:11 μμ	Firefox HTML Doc...	4 KB
package.json	24/7/2016 4:41 πμ	JSON File	3 KB

Σχήμα 4-22. Δομή εφαρμογής κινητού τηλεφώνου.

Όλες οι συναρτήσεις και οι κλάσεις τις οποίες χρησιμοποιεί και καταλαβαίνει ο κώδικας, βρίσκονται μέσα στις βιβλιοθήκες που παρέχει η Dialog και συγκεκριμένα στο φάκελο *libs/ dialog-iotsensor*. Από εκεί αντλούνται όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για τη διαμόρφωση των βασικών κωδίκων της εφαρμογής. Επίσης, έγινε ευρεία χρήση της συνάρτησης *console.log()*, για απεικόνιση διαφόρων παραμέτρων στην οθόνη του υπολογιστή μέσω του EvoThings κατά τη λειτουργία της

εφαρμογής, για εύρεση κι επίλυση διαφόρων προβλημάτων κατά τη γραφή του κάθε κώδικα (troubleshooting). Ακολουθούν κομβικά τα σημαντικά σημεία του κώδικα της εφαρμογής.

Κώδικας app.js.

Παρακάτω παρατίθενται βασικά τμήματα του κώδικα javascript για τη *Συσκευή 1* (όπως ορίζεται στην Ενότητα **Error! Reference source not found.**), ενώ μέσα στον κώδικα επαναλαμβάνονται τα ίδια βήματα αντίστοιχα για τις υπόλοιπες 2 συσκευές.

- Η εφαρμογή ξεκινάει με την ενημέρωση του EnoThings ότι η εφαρμογή έχει ανέβει στο κινητό και αρχίζει να λειτουργεί:

```
document.addEventListener('deviceready', function ()
{ evotings.scriptsLoaded(initialize) }, false
);
```

- **Πίνακες - Μεταβλητές:** Στη συνέχεια, ορίζονται οι βασικές μεταβλητές και πίνακες του προγράμματος, πολλές από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και εύρεση προβλημάτων και δεν θα αναφερθούν. Κομβικά:
 - Οι πρώτες μεταβλητές αφορούν στο διαχωρισμό των πινάκων που αποθηκεύουν προσωρινά τις μετρήσεις που λαμβάνει η εφαρμογή από τις Dialog IoT συσκευές. Αυτό κρίθηκε αναγκαίο επειδή, όπως εξηγείται παρακάτω, παρατηρήθηκε απώλεια μετρήσεων κατά το πέρασμα των μετρήσεων αυτών στο τελικό string που αποστέλλεται στη βάση δεδομένων. Η αρχικοποίηση της μεταβλητής για το επιταχυνσιόμετρο της *Συσκευής 1*:

```
var Switch_1 = 0;
```

- Οι πίνακες A και B (διαχωρισμένοι με αυτόν τον τρόπο για να μη χάνονται μετρήσεις) για κάθε συσκευή Dialog IoT και για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, είναι οι πίνακες προσωρινής αποθήκευσης των ανεπεξέργαστων μετρήσεων, όπως ακριβώς αυτές φτάνουν στην εφαρμογή του κινητού μέσω της Bluetooth επικοινωνίας. Για παράδειγμα, ο πίνακας A του επιταχυνσιόμετρου της *Συσκευής 1*:

```
var accel_1_A = [];
```

- Δημιουργία objects γραφικών διαγραμμάτων μετρήσεων στην οθόνη του κινητού. Στην πρώτη γραμμή ορίζεται το διάγραμμα του επιταχυνσιόμετρου της συσκευής 1, κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης 'Smoothie' και ορίζεται το εύρος των απεικονιζόμενων τιμών. Στη δεύτερη γραμμή του κώδικα, ορίζεται η κυματομορφή της επιτάχυνσης στον άξονα x, που είναι στην ουσία μια χρονοσειρά. Ομοίως και για τους υπόλοιπους άξονες και αισθητήρες.

```
var chartACC1 = new SmoothieChart({minValue: -8, maxValue: 8});
var line_ACCx1 = new TimeSeries();
```

- Μια από τις πιο σημαντικές μεταβλητές είναι η χρονική σταθερά που ορίζει κάθε πότε η εφαρμογή του κινητού αποστέλλει τα προσωρινά αποθηκευμένα δεδομένα προς τη βάση δεδομένων, έχει την τιμή του 1s:

```
var interval = 1000;
```

- Τέλος, ίσως οι πιο σημαντικές μεταβλητές του προγράμματος, είναι αυτές που ορίζουν την κάθε συσκευή Dialog IoT. Για τη Συσκευή 1:

```
var iotsensor1;
```

Άλλες τοπικές μεταβλητές και πίνακες που υπάρχουν στο πρόγραμμα δηλώνονται μέσα στις αντίστοιχες υπορουτίνες.

- **function displayConnectStatus():** Συναρτήσεις όπως αυτή σχετίζονται με την εμφάνιση μηνυμάτων στη οθόνη του κινητού. Εδώ προσδίδεται η λειτουργικότητα διαφόρων γραφικών πεδίων μηνυμάτων όπως έχουν οριστεί στο index.html και συσχετίζεται το μήνυμα προς εμφάνιση με το αντίστοιχο *id* του μηνύματος από το index.html. Τα υπόλοιπα μηνύματα ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία.

```
function displayConnectStatus(message)
{
  document.getElementById('scan-status').innerHTML = message;
};
```

- **function initializeChart():** Με την έναρξη λειτουργίας γραφικών διαγραμμάτων, συνδέεται το object κάθε διαγράμματος με το αντίστοιχο γραφικό του, όπως δημιουργήθηκε στο index.html, και ορίζονται διάφορες παράμετροι εμφάνισης:

```
function initializeChartACC1 ()
{
  chartACC1.streamTo(document.getElementById("chartACC1_canvas"));
  chartACC1.addTimeSeries(line_ACCx1, {lineWidth:3, strokeStyle:
"rgb(255, 0, 0)", fillStyle: 'rgba(255, 0, 0, 0.4)'});
  ...
}
```

- **function appendDataToArray():** Μια πολύ βασική συνάρτηση, για τη μέθοδο αποθήκευσης των μετρήσεων πραγματικού χρόνου από τους αισθητήρες στους αντίστοιχους πίνακες:

```
function appendDataToArray(array_to_fill, x, y, z, time) {
  var accel_meas = {};
  accel_meas.x = x;
  accel_meas.y = y;
  accel_meas.z = z;
  accel_meas.time = time;
  array_to_fill.push(accel_meas);
}
```

- **function initialize():** Η συνάρτηση αρχικοποίησης των βασικών παραμέτρων και λειτουργιών της εφαρμογής. Αρχικά, πρέπει να δημιουργηθούν 3 διαφορετικά αντικείμενα *iotsensor*, ένα για κάθε συσκευή που χρησιμοποιείται στη διάταξη, τα οποία ονομάζονται *instances*. Αυτά δημιουργούνται στη συνάρτηση `function initialize()` και αποτελούν τα βασικά στοιχεία της εφαρμογής.

```
function initialize() {
}
```

- ο Αρχικά, δημιουργείται η *instance* `iotsensor1`, η οποία είναι ένα αντικείμενο *EvoThings* (*object*) με *property* `iotsensor` και ακολουθεί τις μεθόδους (*methods*) `RAW`, που χρησιμοποιούνται για τα ανεπεξέργαστα δεδομένα που λαβάνονται από τους αισθητήρες.

```
iotsensor1 = evothings.iotsensor.createInstance(evothings.iotsensor.RAW);
```

- ο Η δεύτερη και τρίτη γραμμή, ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα ληφθούν τα δεδομένα του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου αντίστοιχα. Για το επιταχυνσιόμετρο, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος `accelerometerCallback` κάνοντας χρήση της συνάρτησης `handleAccelerometerData1`, που θα παρουσιαστεί με τη σειρά της παρακάτω.

```
iotsensor1.accelerometerCallback(handleAccelerometerData1);
iotsensor1.gyroscopeCallback(handleGyroscopeData1);
```

- ο Οι δύο τελευταίες γραμμές της υπορουτίνας, τρέχουν τις συναρτήσεις που εκκινούν τα γραφικά διαγράμματα των επιταχύνσεων (`ACC1`) και γωνιακών ταχυτήτων (`GYR1`).

```
initializeChartACC1();
initializeChartGYR1();
```

- **function connect():** Κατά τη συνάρτηση αυτή, η συσκευή του τηλεφώνου αρχίζει να ψάχνει τις συσκευές BLE της *Dialog* που βρίσκονται κοντά της σε κατάσταση «*advertising*» και συνδέεται με τη συγκεκριμένη *MAC address*, που έχει προκαθοριστεί στον κώδικα, έτσι ώστε κάθε *iotsensor instance* να συνδέεται με μια συγκεκριμένη πάντα συσκευή. Επίσης, σε αυτή τη συνάρτηση ορίζονται και οι παράμετροι των αισθητήρων, όπως το εύρος και η συχνότητα δειγματοληψίας. Για τη συσκευή 1 καλείται η *function* `connect1()`, και επιγραμματικά τα βασικά στοιχεία της συνάρτησης είναι τα παρακάτω:
 - ο Αναζήτηση συσκευών BLE:

```
iotsensor1.startScanningForDevices
```

- ο Υποσυνάρτηση για σύνδεση με συσκευή BLE συγκεκριμένης διεύθυνσης: Εάν η *instance* `iotsensor1` έχει τα χαρακτηριστικά της κλάσης *device*, όπως αυτά ορίζονται από τις βιβλιοθήκες της εφαρμογής, και η αντίστοιχη συσκευή BLE έχει τη συγκεκριμένη

προκαθορισμένη *MAC address*, τότε η συγκεκριμένη συσκευή BLE θα συνδεθεί με τη συσκευή του τηλεφώνου μέσω της εφαρμογής:

```
function(device)
{
  if(iotsensor1.isIoTSensor(device) && device.address ==
'80:EA:CA:00:D2:73')
  {
    iotsensor1.connectToDevice(...
```

- ο Διαμόρφωση παραμέτρων αισθητήρων: Με τη σύνδεση της BLE συσκευής με την εφαρμογή του κινητού τηλεφώνου, καθορίζονται οι συχνότητες δειγματοληψίας του επιταχυνσιομέτρου και του γυροσκοπίου, στα 100Hz, και τα εύρη των μετρήσεών τους, σε 4g και 2000 deg/s αντίστοιχα. Επίσης, ορίζεται ο συνδυασμός αισθητήρων των οποίων οι μετρήσεις θα ληφθούν. Οι παράμετροι αυτές βρίσκονται αποθηκευμένες στο πρόγραμμα του αισθητήρα (Πίνακας 4-5) και η διασύνδεσή τους με την εφαρμογή του κινητού επιτυγχάνεται μέσω της βιβλιοθήκης *iotsensor-ble.js*. Στη συνέχεια, οι παράμετροι αυτές αποθηκεύονται στη flash μνήμη της συσκευής και παρακάμπτουν τις αποθηκευμένες default τιμές της βιβλιοθήκης *iotsensor-settings.js*:

```
iotsensor1.configuration.BASIC.ACCELEROMETER_RANGE =
iotsensor1.enums.ACCELEROMETER_RANGE._4; //2,4,8,16 G

iotsensor1.configuration.BASIC.ACCELEROMETER_RATE =
iotsensor1.enums.ACCELEROMETER_RATE._100; //50,100Hz

iotsensor1.configuration.BASIC.GYROSCOPE_RANGE =
iotsensor1.enums.GYROSCOPE_RANGE._2000; //500,1000,2000 deg/sec

iotsensor1.configuration.BASIC.GYROSCOPE_RATE =
iotsensor1.enums.GYROSCOPE_RATE._100; //50,100Hz

iotsensor1.configuration.BASIC.SENSOR_COMBINATION =
iotsensor1.enums.SENSOR_COMBINATION._accel_gyro;

iotsensor1.setBasicConfiguration();
iotsensor1.storeBasicConfigurationInFlash();
```

- ο Τέλος, όλα τα ανωτέρω περικλείονται σε μια συνάρτηση, η οποία ορίζει τη διάρκεια αναζήτησης περιφερειακών συσκευών BLE (εδώ η διάρκεια αυτή έχει οριστεί στα 3s):

```
setTimeout(function() {...
..}, 3000); }
```

- **function accelerometerOn():** Σε αυτό το σημείο, εκκινεί ο αισθητήρας επιταχυνσιομέτρου και ξεκινά η λήψη μετρήσεων από την εφαρμογή. Για τη Συσκευή 1:

```
function accelerometerOn1() {
iotsensor1.accelerometerOn();
}
```

- **function gyroscopeOn():** Παρομοίως με την προηγούμενη συνάρτηση, καλείται η εκκίνηση του γυροσκοπίου. Για τη Συσκευή 1:

```
function gyroscopeOn1() {
  iotsensor1.gyroscopeOn();
}
```

- **function handleAccelerometerData(data):** Με τη συνάρτηση αυτή, ξεκινά η λήψη μετρήσεων του επιταχυνσιόμετρου και η προσωρινή τους αποθήκευσή τους σε πίνακες. Λαμβάνει ως παράμετρο εισόδου την *data*, που είναι η κλάση των δεδομένων που εισέρχονται από τη συσκευή BLE. Για τη Συσκευή 1:

```
function handleAccelerometerData1(data)
{..
}
```

- Ορισμός μεταβλητής για καταχώρηση του *timestamp* με τη συνάρτηση *Date.now()*:

```
var now1 = Date.now();
```

- Ορισμός δεδομένων για εμφάνιση στο γραφικό διάγραμμα της εφαρμογής στην οθόνη του κινητού:

```
line_ACCx1.append(now1, data.x);
line_ACCy1.append(now1, data.y);
line_ACCz1.append(now1, data.z);
```

- Καταχώρηση μεταβλητών στον προσωρινό πίνακα *accel_1* με τη συνάρτηση *appendDataToArray*. Οι μεταβλητές είναι οι μετρήσεις κατά τον x, y και z άξονα καθώς επίσης και το *timestamp*. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι ο πίνακας αυτός έχει χωριστεί σε δυο μέρη, *accel_1_A* και *accel_1_B*, διότι παρατηρήθηκε ότι κατά τη μετέπειτα αποστολή των δεδομένων στη βάση δεδομένων υπήρχε απώλεια κάποιων μετρήσεων. Η τιμή της μεταβλητής *Switch_1* (0 ή 1) καθορίζει την επιλογή του υποπίνακα στον οποίο θα αποθηκευτούν οι μετρήσεις:

```
if (Switch_1==0)
{
  appendDataToArray(accel_1_A, data.x, data.y, data.z, now1);
}
else
{
  appendDataToArray(accel_1_B, data.x, data.y, data.z, now1);
}
```

- **function handleGyroscopeData(data):** Η συνάρτηση με την οποία ξεκινά η λήψη μετρήσεων του γυροσκοπίου και η προσωρινή τους αποθήκευσή τους σε πίνακες, ομοίως με τη συνάρτηση *function handleAccelerometerData(data)*.

- **function onDisconnectButton():** Η συνάρτηση αυτή έχει προστεθεί έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα με το πάτημα του κομβίου *DISCONNECT* από το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής, οι συσκευές Dialog IoT να αποσυνδέονται από την εφαρμογή, με τη συνάρτηση *disconnectDevice()*, και να ξεκινούν και πάλι το *advertising*. Η μέθοδος *setTimeout* δίνει χρόνο στην κάθε συσκευή για να αποσυνδεθεί. Τέλος, η συνάρτηση *displayConnectStatus* αναγράφει στην οθόνη του κινητού την επιτυχή αποσύνδεση των συσκευών:

```
function onDisconnectButton()
{
    setTimeout(iotsensor1.disconnectDevice(), 500);
    setTimeout(iotsensor2.disconnectDevice(), 500);
    setTimeout(iotsensor3.disconnectDevice(), 500);
    displayConnectStatus("Sensors - DISCONNECTED");
}
```

- **setInterval():** Ο κώδικας ολοκληρώνεται με αυτή τη συνάρτηση, η οποία περιλαμβάνει και την καταχώρηση όλων των πινάκων συλλογής προσωρινών δεδομένων σε ένα *string* και την αποστολή τους μέσω Wi-Fi ή 4G στη βάση δεδομένων. Η συνάρτηση αυτή καλείται κάθε τόσο βάσει της χρονικής μεταβλητής *interval*, η οποία κατά τον ορισμό των μεταβλητών έχει οριστεί στο 1s:

```
setInterval(function(){..
}, interval);
```

- Η συνάρτηση ξεκινάει με τον ορισμό και κάθε φορά άδειασμα του *string* που θα γεμίσει με δεδομένα και θα σταλεί στη βάση δεδομένων, με την ονομασία *dataString*:

```
var dataString = "";
```

- Το κύριο μέρος της συνάρτησης αρχίζει με την παρακάτω συνθήκη, που ορίζει από ποιόν προσωρινό υποπίνακα αποθήκευσης μετρήσεων θα πάρει δεδομένα το *dataString*:

```
if (Switch_1==0)
{..
}
else
{..
}
```

- Στη συνέχεια, αλλάζει η τιμή του *Switch_1*, ώστε εντωμεταξύ οι νέες μετρήσεις που έρχονται στο κινητό από τις συσκευές Dialog IoT να αποθηκεύονται προσωρινά στον άλλο υποπίνακα *accel_1* (A ή B), έτσι ώστε να αποφευχθεί η απώλεια νέων δεδομένων για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η καταχώρηση των δεδομένων στο *dataString* και η αποστολή στη βάση δεδομένων :

```
Switch_1=1;
```

- Στο σημείο αυτό, καταχωρούνται όλες οι τιμές του υποπίνακα αποθηκευμένων μετρήσεων `accel_1_A` στο `dataString` με τη χρήση μιας `for loop`:

```
for (var i = 0; i < accel_1_A.length; i++) {
dataString += "acceleration_ble_1_sensor_name = \"ble_1\" ,x=" +
accel_1_A[i].x + ",y=" + accel_1_A[i].y + ",z=" + accel_1_A[i].z + " " +
accel_1_A[i].time + "000000\n" ;
}
```

- Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι για να υπερκεραστεί το πρόβλημα διαγραφής δεδομένων με ίδιο `timestamp` στη βάση δεδομένων InfluxDB, πριν τη δημιουργία του `dataString`, μέσα στη `for loop`, προστέθηκε μια συνθήκη όπου εάν το `timestamp` της κάθε μέτρησης είναι ίδιο με της προηγούμενης, τότε προστίθεται ένα nanosecond. Το ίδιο συμβαίνει και εάν λόγω αυτής της πρόσθεσης το επόμενο `timestamp` είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο:

```
if (i>0 && accel_1_A[i].time <= accel_1_A[i-1].time)
{
    accel_1_A[i].time=(accel_1_A[i-1].time+1);
}
```

- Στη συνέχεια, η συνάρτηση `displayHz_accel_1` εμφανίζει τη συχνότητα δειγματοληψίας των συγκεκριμένων μετρήσεων στην οθόνη του κινητού στο αντίστοιχο πεδίο της εφαρμογής:

```
displayHz_accel_1( accel_1_A.length + " Hz");
```

- Στο τέλος της υπορουτίνας, μηδενίζεται και ο πίνακας `accel_1_A` (ή B):

```
accel_1_A = [];
```

- Αφού συγκεντρωθούν όλα δεδομένα των επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων στο `dataString`, ακολουθεί η αποστολή τους στη βάση δεδομένων, μέσω Wi-Fi ή 3G στη συγκεκριμένη IP του Η/Υ όπου βρίσκεται εγκατεστημένη η InfluxDB:

```
cordovaHTTP.post("http://192.168.1.99:8081/sendToDB", {"data":dataString},
{}), function(response) {
});
```

- Η συνάρτηση ολοκληρώνεται με την απεικόνιση του συνολικού αριθμού των δεδομένων στο αντίστοιχο πεδίο της εφαρμογής στην οθόνη του κινητού, για αξιολόγηση από το χρήστη:

```
displayHz_TOTAL(dataString.split(/\r\n|\r|\n/).length + "Measurements");
```


Παραμετροποίηση app.js για MongoDB

Ο κώδικας της εφαρμογής του κινητού διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να οργανώνει τις μετρήσεις και τη να τις αποστέλλει με κατάλληλη μορφή, αναγνώσιμη από τη MongoDB. Ενδεικτικά, ένα τέτοιο string δημιουργείται κατά τη λήψη μετρήσεων από την εφαρμογή κινητού στη μορφή:

```
accel_1_A = " {" + "\"x\""+":\" +data.x+\", "+ "\"y\""+":\"+data.y+\"}";
```

Έπειτα, για να αποσταλλεί στη βάση δεδομένων θα οργανωθεί σε ένα string της μορφής:

```
datastring_accel_1=( "[" +data_accel_1_A+"]");
```

Τελικά, το τελικό string θα αποσταλεί στη βάση δεδομένων, σε συγκεκριμένο Collection και με συγκεκριμένο ApiKey, το οποίο περιλαμβάνει κρυπτογραφημένα τα στοιχεία εισόδου (όνομα χρήστη και κωδικό) στη βάση δεδομένων.

```
$.ajax({
  url:
  "https://api.mongolab.com/api/1/databases/csl_drogosis_1/collections/Sensor
_Data_1?apiKey=OJ2M0hvHZ7VgxAy*****",
  type: "POST",
  data: datastring_accel_1,
  contentType: "application/json"
})
```

Κώδικας index.html.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια βασικά τμήματα του κώδικα html, που σχετίζονται με τον τρόπο εμφάνισης διαφόρων οντοτήτων στην οθόνη του κινητού.

- **Πεδίο εμφάνισης μηνυμάτων:** Εδώ ορίζονται διάφορες παράμετροι εμφάνισης των μηνυμάτων. Το σημαντικότερο στοιχείο είναι η ταυτότητα *id*, η οποία συσχετιζόμενη με το αντίστοιχο λειτουργικό πεδίο στο app.js, απεικονίζει το αντίστοιχο μήνυμα:

```
<p style="border:3px; border-style:solid; border-color:#33adff; padding:
0em;text-align: center;" id="scan-status">.. Please Connect to Sensors
..</p>
```

- **Δημιουργία κομβίων:** Εδώ δημιουργούνται τα γραφικά διάφορων κομβίων της εφαρμογής. Για παράδειγμα, ο παρακάτω κώδικας δημιουργεί τη γραφική οντότητα ενός κουμπιού με το πάτημα του οποίου ενεργοποιείται η συνάρτηση *connect1()* του app.js.

```
<button class ="blue narrow" onclick ="connect1 ()">IoT.1</button>
```

- **Δημιουργία γραφικών διαγραμμάτων:** Εδώ δημιουργούνται τα γραφικά διαγράμματα για την απεικόνιση των μετρήσεων στην οθόνη του κινητού, ορίζονται οι διαστάσεις τους και συνδέονται λειτουργικά με τα αντίστοιχα *objects* του app.js:

```
<canvas width="85" height="100" id ="chartACC1_canvas"></canvas>
```

- **Σύνδεση με βιβλιοθήκες:** Στο τέλος του κώδικα, γίνεται η σύνδεση με τις διάφορες βιβλιοθήκες κι υποπρογράμματα που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση της εφαρμογής. Για παράδειγμα, για τη χρήση των Smoothie Charts:

```
<script src="libs/smoothie/smoothie.js"></script>
```

Για την υλοποίηση του προγράμματος της εφαρμογής του κινητού, έγινε χρήση του προγράμματος «Sublime», ενός σύγχρονου επεξεργαστή κειμένου (Σχήμα 4-23).

```

422
423
424
425 function handleAccelerometerData1(data)
426 {
427     var now = Date.now();
428     console.log('ACC1:' + now + '_' + 'ACCx1: ' + data.x + ' ACCy1: ' + data.y + ' ACCz1: ' + data.z);
429     dataNUM++;
430     console.log(dataNUM);
431
432     // Data to post
433
434     line_ACCx1.append(now, data.x);
435     line_ACCy1.append(now, data.y);
436     line_ACCz1.append(now, data.z);
437
438
439     //window.accel_xyz = data; //For INSTRUMENTATION
440
441     appendDataToArray(accel_1, data.x, data.y, data.z, now);
442 }
443
444 function handleAccelerometerData2(data)
445 {
446     var now = Date.now();
447
448     console.log('ACC2:' + now + '_' + 'ACCx2: ' + data.x + ' ACCy2: ' + data.y + ' ACCz2: ' + data.z);
449
450     line_ACCx2.append(now, data.x);
451     line_ACCy2.append(now, data.y);
452     line_ACCz2.append(now, data.z);
453
454     //window.accel_xyz = data;

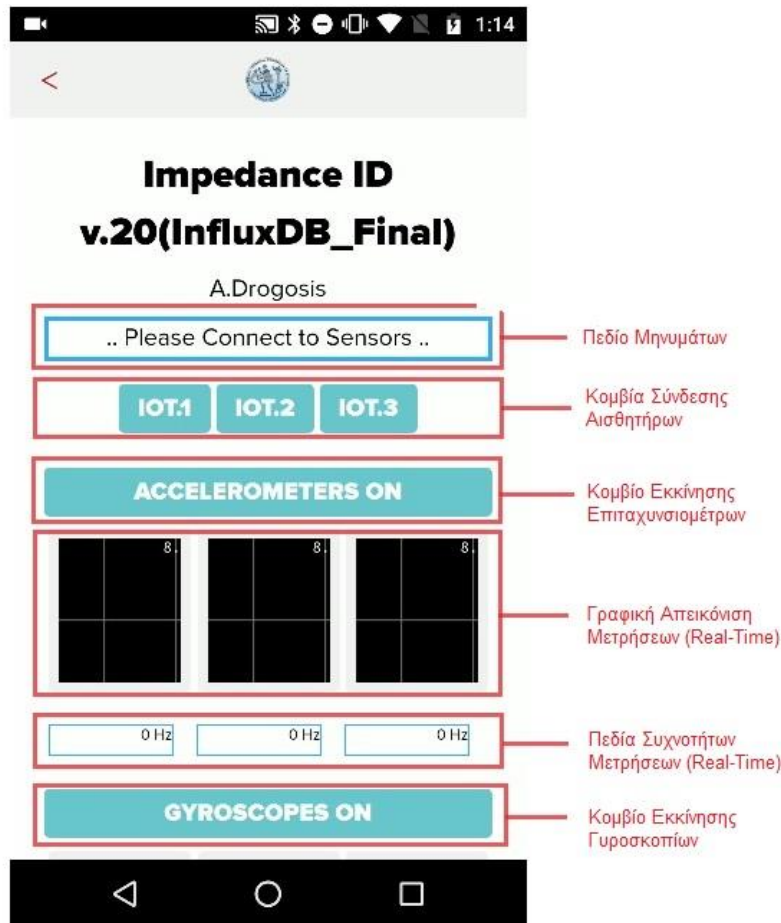
```

Σχήμα 4-23. Κομμάτι του Κώδικα – Περιβάλλον προγραμματισμού «Sublime».

4.6.4 Τρόπος Λειτουργίας - Γραφικό Περιβάλλον Εφαρμογής

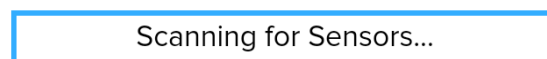
Όταν ανέβει ο κώδικας της εφαρμογής στον Viewer του κινητού, υλοποιείται όλο το πρόγραμμα στο κινητό. Στην οθόνη του κινητού εμφανίζονται τα αντικείμενα του αρχείου index.html, όπως διάφορα κομβία και οθόνες γραφικών απεικονήσεων, ενώ με το πάτημα ενός κομβίου, ενεργοποιείται μια λειτουργία του app.js.

Ο σχεδιασμός του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής, έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η λειτουργία της να είναι απλή και κατανοητή απο κάθε χρήστη, καθώς επίσης να παρέχει κάποιες βασικές πληροφορίες. Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής απεικονίζεται και επεξηγείται στο Σχήμα 4-24 που ακολουθεί.



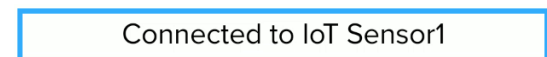
Σχήμα 4-24. Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής κινητού τηλεφώνου.

Πατώντας το κουμπί «*IOT.i*» (όπου $i=1,2,3$), η εφαρμογή αναζητά ενεργές Bluetooth συσκευές στο χώρο, και συγκεκριμένα για Dialog Iot Sensors. Η λειτουργία αυτή αναγράφεται στο *Πεδίο Μηνυμάτων* (Σχήμα 4-25).



Σχήμα 4-25. Πεδίο Μηνυμάτων - Ψάχνοντας για Bluetooth αισθητήρες.

Η εφαρμογή θα συνδεθεί αυτόματα με τον αισθητήρα που ζητήθηκε, με βάση τη συγκεκριμένη *address* που έχει οριστεί από τον κώδικα της εφαρμογής, τον οποίο και θα ονομάσει 'Ble_i' στη βάση δεδομένων. Η σύνδεση με τον αισθητήρα επικυρώνεται με την αναγραφή της στο *Πεδίο Μηνυμάτων* (Σχήμα 4-26). Ακολουθείται η ίδια μέθοδος αντίστοιχα και για τους άλλους 2 αισθητήρες.



Σχήμα 4-26. Μήνυμα σύνδεσης εφαρμογής με αισθητήρα IOT.1.

Αφού η εφαρμογή συνδεθεί με τους επιθυμητούς αισθητήρες, μπορεί να ξεκινήσει η λήψη των μετρήσεων. Για την ενεργοποίηση των επιταχυνσιόμετρων, πατάμε το *Κομβίο Εκκίνησης Επιταχυνσιόμετρων* και εν συνεχεία το αντίστοιχο για τα γυροσκόπια, δηλαδή το *Κομβίο Εκκίνησης Γυροσκοπίων* (Σχήμα 4-24).



Σχήμα 4-27. Εφαρμογή κινητού τηλεφώνου σε πλήρη λειτουργία.

Η εφαρμογή, απεικονίζει τα δεδομένα που λαμβάνει από τους αισθητήρες στην οθόνη του κινητού σε γραφήματα πραγματικού χρόνου (Σχήμα 4-27) και στέλνει τα δεδομένα (επιταχύνσεων και γωνιακών ταχυτήτων) στον Η/Υ μέσω Wi-Fi ή 4G , για να αποθηκευτούν στη συνέχεια σε μια βάση δεδομένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15.

Τέλος, για τη λήξη της διαδικασίας, θα πρέπει να αποσυνδεθούν οι αισθητήρες (περιφερειακές συσκευές) από το κινητό τηλέφωνο (κεντρική συσκευή). Αυτό γίνεται με το πάτημα του κομβίου Disconnect (Αποσύνδεση), που βρίσκεται στο κάτω μέρος της εφαρμογής (Σχήμα 4-28). Οι αισθητήρες αποσυνδέονται από την κεντρική συσκευή, σταματούν να παίρνουν μετρήσεις και μεταβαίνουν σε κατάσταση *Advertising* των παραμέτρων τους.



Σχήμα 4-28. Κομβίο και μήνυμα αποσύνδεσης αισθητήρων.

4.7 Διατάξεις Πρόσδεσης Αισθητήρων

Για τη φορητότητα των συσκευών Dialog IoT, υλοποιήθηκαν προσαρμοσμένες «wearable» διατάξεις. Η τοποθέτηση των συσκευών πάνω στον άνθρωπο φαίνεται στο Σχήμα 4-29. Τοποθετούνται στο πίσω μέρος του χρήστη με το λογότυπο της κάθε συσκευής να «κοιτάζει» προς τα πίσω και το συνδέτη της πλακέτας διασύνδεσης προς τα πάνω.



Σχήμα 4-29. Τοποθέτηση αισθητήρων - οπίσθια όψη χρήστη [47].

4.7.1 Διάταξη πρόσδεσης του αισθητήρα στο παπούτσι

Η διάταξη πρόσδεσης των αισθητήρων για τη μέτρηση δεδομένων του κάθε πέλματος εφαρμόζεται πάνω στο αντίστοιχο παπούτσι (Σχήμα 4-30). Το παπούτσι επιλέχθηκε έτσι ώστε να μην έχει μαλακή σόλα, για την ελαχιστοποίηση της απορρόφησης χρήσιμων για την ανάλυση κραδασμών. Η διάταξη πρόσδεσης απεικονίζεται λεπτομερώς στο Σχήμα 4-31.



Σχήμα 4-30. Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στο παπούτσι (πλάγια όψη).



Σχήμα 4-31. Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στο παπούτσι (επιμέρους στοιχεία).

Η διάταξη πρόσδεσης στο παπούτσι αποτελείται από δύο βασικά μέρη: έναν ελαστικό κι έναν μη ελαστικό ιμάντα. Ο μη ελαστικός ιμάντας τοποθετείται γύρω από το παπούτσι, περίπου στο ύψος της καμάρας του πέλματος, και τα δύο του άκρα ασφαλίζουν με δύο «D-Rings». Στη συνέχεια, ο ελαστικός ιμάντας εφαρμόζει μεταξύ του σώματος του παπουτσιού και του πρώτου ιμάντα. Πάνω στα δύο άκρα του ελαστικού ιμάντα, βρίσκονται κολλημένα δύο κουμπώματα «Velcro» («σκρισ-σκρατς»), τα οποία χρησιμεύουν στο να ασφαλίσει ο ελαστικός ιμάντας πάνω στον πρώτο ιμάντα και το παπούτσι, αφού πρώτα τεντωθεί αρκετά. Ο αισθητήρας τοποθετείται στο πίσω μέρος της όλης διάταξης και στερεώνεται σφιχτά μεταξύ του πίσω μέρους του παπουτσιού και του ελαστικού ιμάντα (Σχήμα 4-32).



Σχήμα 4-32. Τοποθέτηση αισθητήρα στο παπούτσι (λεπτομέρεια - άξονες).

4.7.2 Διάταξη πρόσδεσης του αισθητήρα στη μέση

Η διάταξη πρόσδεσης του αισθητήρα για τη μέτρηση δεδομένων της μέσης αποτελείται ουσιαστικά από μια ζώνη (μη ελαστικός ιμάντας) στη μέση της οποίας είναι κολλημένος ένας ελαστικός ιμάντας (Σχήμα 4-33α). Στο σταθερό μέρος του ελαστικού ιμάντα (το σημείο ένωσης με τη ζώνη) βρίσκεται κολλημένο το ένα μέρος του κουμπώματος «Velcro», ενώ στο άκρο του το δεύτερο μέρος του «Velcro» (Σχήμα 4-33β). Ο ελαστικός ιμάντας περικλείει τον αισθητήρα, ο οποίος σφίγγει με το τέντωμα του ιμάντα και ασφαλίζει με το κούμπωμα «Velcro» (Σχήμα 4-34). Τέλος, ο χρήστης σφίγγει τη ζώνη στο ύψος της μέσης του με το αισθητήρα να εφαρμόζει πάνω του μεταξύ της μέσης του και της ζώνης (Σχήμα 4-35).



α



β

Σχήμα 4-33. Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στη μέση. (α) Γενική εικόνα, (β) Λεπτομέρεια «Velcro».



Σχήμα 4-34. Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στη μέση (επιμέρους στοιχεία).



Σχήμα 4-35. Διάταξη πρόσδεσης αισθητήρα στη μέση (τοποθέτηση - άξονες).

4.8 Ηλεκτρικός διάδρομος

Για την επίτευξη βαδίσματος με σταθερή ταχύτητα, χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρικός διάδρομος (Treadmill) γυμναστικής της εταιρίας York Fitness (Σχήμα 4-36). Το εύρος ταχυτήτων του διαδρόμου είναι 0.8-18 Km/h και μπορεί να πάρει κλίσεις εύρους 0-12%. Σε όλα τα σετ μετρήσεων επιλέχθηκε κλίση 0% ενώ η ταχύτητα παρέμεινε σταθερή στα 2.8 km/h ή 0.78 m/s.



α



β

Σχήμα 4-36. Ο ηλεκτρικός διάδρομος γυμναστικής της εταιρίας York Fitness [39].

5 Ανάλυση Δεδομένων Μετρήσεων και Αναγνώριση Φάσεων Κύκλου Βάδισης

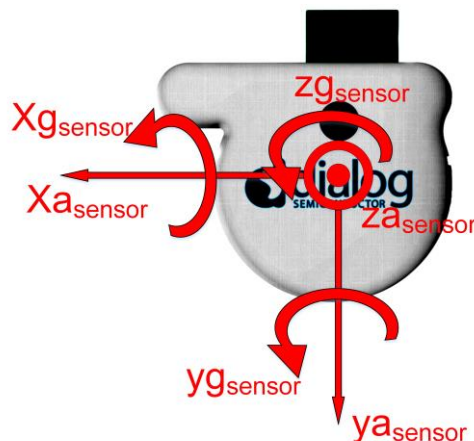
5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία ανάκτησης των μετρήσεων από τις βάσεις δεδομένων, και η περαιτέρω ανάλυσή τους με σκοπό την αναγνώριση των φάσεων του κύκλου βάδισης.

Το Κεφάλαιο αρχίζει με την Ενότητα 5.2, όπου περιγράφονται τα συστήματα συντεταγμένων βάσει των οποίων γίνεται η ανάλυση των μετρήσεων. Στην Ενότητα 5.3 αναλύεται η μεθοδολογία ανάκτησης των μετρήσεων από τις βάσεις δεδομένων για ανάλυση στο Matlab. Στη συνέχεια, οι Ενότητες 5.4 και 5.5 αφορούν στην πιο λεπτομερή επιλογή των κατάλληλων μετρήσεων για ανάλυση και στην εξομάλυνσή τους. Τέλος, στην Ενότητα 5.6 υλοποιείται η αναγνώριση των φάσεων του κύκλου βάδισης, με τη διακριτοποίησή του σε τέσσερις φάσεις.

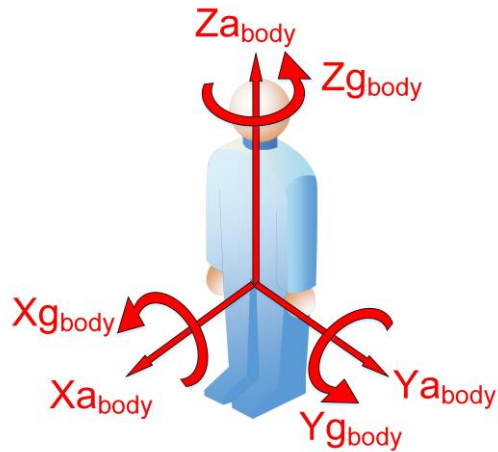
5.2 Σύστημα Συντεταγμένων

Ο αισθητήρας, έχει προκαθορισμένο τοπικό σύστημα συντεταγμένων (ή σύστημα αξόνων) του οποίου οι άξονες θα φέρουν το δείκτη «sensor». Για τον προσδιορισμό των θετικών τιμών των αξόνων του αισθητήρα, αφήνουμε τον αισθητήρα σε ηρεμία, κάθε φορά σε μια διαφορετική πλευρά. Για την κάθε πλευρά που η μέτρηση σε ηρεμία είναι $-1g$, θεωρούμε ότι αυτή είναι η θετική φορά του αντίστοιχου άξονα, σύμφωνα με το Σχήμα 3-1. Έτσι, προκύπτουν οι παρακάτω άξονες αναφοράς του αισθητήρα (Σχήμα 5-1 και Σχήμα 5-2).



Σχήμα 5-1. Τοπικό Σύστημα Συντεταγμένων Αισθητήρα (Sensor). Με «a» συμβολίζεται η επιτάχυνση, ενώ με «g» η γωνιακή ταχύτητα.

Για καλύτερη αντίληψη στις αναλύσεις, λόγω του τρόπου τοποθέτησης των αισθητήρων πάνω στον χρήστη, το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα θα μετατραπεί στο σωματόδετο (body-fixed) σύστημα συντεταγμένων με δείκτη «body» με βάση τις επιθυμητές κατευθύνσεις των αξόνων, πάντα με βάση τον «Κανόνα του Δεξιού Χεριού» (Σχήμα 5-2).



Σχήμα 5-2. Σωματόδετο Σύστημα Συντεταγμένων (Body). Με «a» συμβολίζεται η επιτάχυνση, ενώ με «g» η γωνιακή ταχύτητα.

Με τα μικρά γράμματα x,y,z συμβολίζονται οι αντίστοιχοι άξονες του αισθητήρα, ενώ με τα κεφαλαία X,Y,Z οι άξονες αναφοράς του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων. Η αντιστοιχία του Συστήματος Συντεταγμένων του Αισθητήρα με αυτό του Σώματος του χρήστη, γίνεται βάσει των παρακάτω απλών εξισώσεων:

$$\begin{aligned}
 X_{a_body} &= -z_{a_sensor} & Y_{a_body} &= x_{a_sensor} & Z_{a_body} &= -y_{a_sensor} \\
 & & \text{και} & & & \\
 X_{g_body} &= -z_{g_sensor} & Y_{g_body} &= x_{g_sensor} & Z_{g_body} &= -y_{g_sensor}
 \end{aligned}
 \tag{5-1}$$

5.3 Ανάκτηση δεδομένων από τις Βάσεις Δεδομένων στο Matlab

Ανάκτηση δεδομένων από την Influx DB

Αρχικά, εισάγονται οι χρονικές στιγμές έναρξης και λήξης του σετ μετρήσεων που πρόκειται να αναλυθεί:

```
Start_Time_NS = '2017-12-02T18:12:00.000Z';
End_Time_NS = '2017-12-02T18:25:00.000Z';
```

Έπειτα, κωδικοποιείται το αίτημα ανάκτησης των δεδομένων προς τη βάση με χρήση γλώσσας SQL και τα δεδομένα αποθηκεύονται σε έναν πίνακα. Για παράδειγμα, για τις επιταχύνσεις του πρώτου αισθητήρα:

```
sensor_name = 'ble_1';

url_accel_NS_1 =
sprintf('http://192.168.1.99:8086/query?db=data_db&epoch=ns&q=select * from
acceleration_ble_1 where sensor_name='%s' and time>'%s' and time<'%s'
' , sensor_name, Start_Time_NS, End_Time_NS);

data_accel_NS_1 = webread(url_accel_NS_1);
matrix_accel_NS_1 = data_accel_NS_1.results.series.values;
```

Οι στήλες του τελευταίου πίνακα που δημιουργήθηκε ακολουθούν τις στήλες της βάσης δεδομένων, δηλαδή:

$$time = 1, \quad sensor_name = 2, \quad x = 3, \quad y = 4, \quad z = 5 \quad (5-2)$$

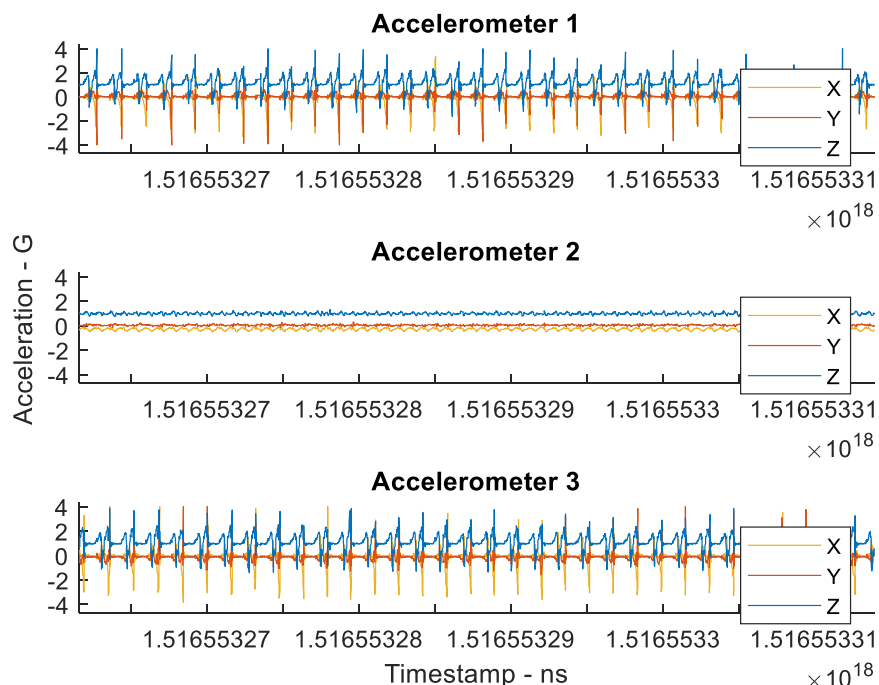
όπου κάθε αριθμός αντιπροσωπεύει αριθμό στήλης.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα οργανώνονται στους τελικούς πίνακες για το σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων. Για παράδειγμα, για τις επιταχύνσεις της Συσκευής 1 κατά τον άξονα x:

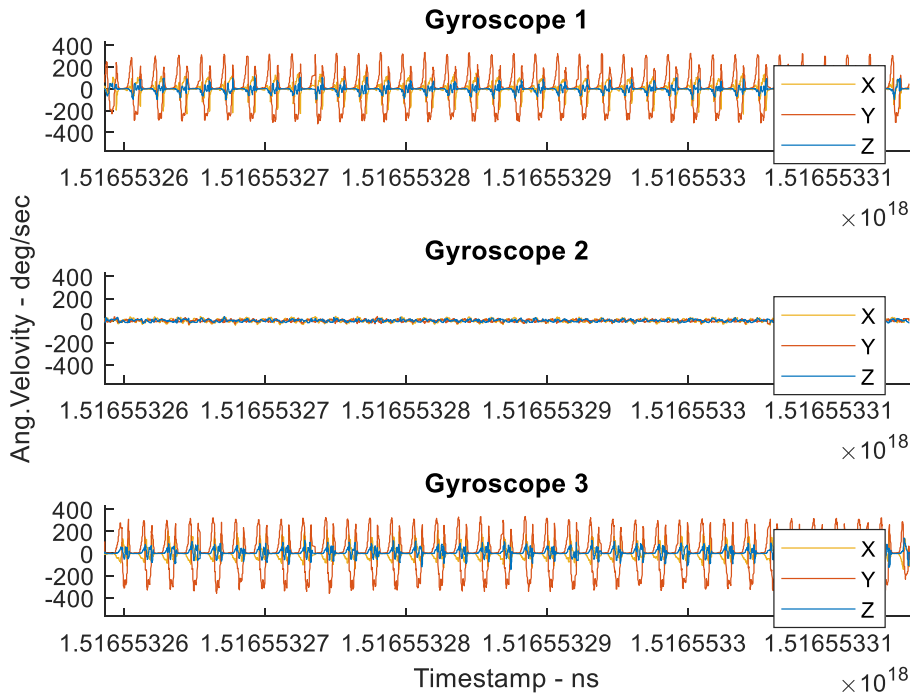
```
MaNS_1=length(matrix_accel_NS_1);  
  
format bank;  
  
for i=1:MaNS_1  
xaNS_1(i)=cell2mat(matrix_accel_NS_1{i,1}(3));  
end
```

Αφού δημιουργηθούν όλοι οι απαιτούμενοι πίνακες των μετρήσεων των αισθητήρων, το επόμενο βήμα είναι η μετατροπή τους στους τελικούς πίνακες που συμβαδίζουν με το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων, βάσει των Εξισώσεων (5-1). Τελικά, προκύπτουν τα διαγράμματα των ανεπεξέργαστων μετρήσεων ως προς το χρόνο (Σχήμα 5-3 και Σχήμα 5-4). Οι αριθμοί 1, 2 και 3 που εμφανίζονται στα παρακάτω διαγράμματα που ακολουθούν, επεξηγούνται στην Εξίσωση (5-3).

$$\text{Δεξί Πέλαμα} = 1, \quad \text{Μέση} = 2, \quad \text{Αριστερό Πέλαμα} = 3 \quad (5-3)$$



Σχήμα 5-3. Επιταχύνσεις ως προς το χρόνο (Raw Data).



Σχήμα 5-4. Γωνιακές Ταχύτητες ως προς το χρόνο (Raw Data).

Η InfluxDB και η παραπάνω μεθοδολογία ανάκτησης δεδομένων είναι αυτή που τελικά επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Παρακάτω, περιγράφεται και η μέθοδος ανάκτησης δεδομένων για τη MongoDB, τα δεδομένα της οποίας όμως δε χρησιμοποιήθηκαν για την τελική ανάλυση στο Matlab.

Ανάκτηση δεδομένων από τη MongoDB

Προκειμένου να ανακτηθούν τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί σε cloud server της MongoDB, γίνεται χρήση των συναρτήσεων του Database Toolbox του Matlab.

Το Database Toolbox δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με τη MongoDB με μια σειρά απλών εντολών. Απαιτείται η εισαγωγή διαφόρων στοιχείων για τη σύνδεση, όπως το όνομα της βάσης δεδομένων, και αφού επιτευχθεί η σύνδεση, επιλέγεται το Collection με τα δεδομένα προς ανάκτηση:

```
conn =
mongo ("ds149954.mlab.com", 49954, "csl_drogosis_1", 'UserName', "Jyro", 'Password', "Ab6936073671!")

isopen(conn)

collection = "Sensor_Data_1";
```

Έπειτα, ορίζονται οι χρονικές στιγμές αρχής και τέλους των ζητούμενων μετρήσεων, σε nanosecond (Unix Epoch Time):

```
START= 1511266130000;
END= 1511266136000;
```

Μια αναζήτηση (query) των επιταχύνσεων του Αισθητήρα 1 μεταξύ των δοσμένων χρονικών στιγμών, έχει την παρακάτω μορφή:

```
query_accel_1 = strcat('{"time":{"$gte: ', num2str(START), ', $lt: ',  
, num2str(END), ' }, "name": "ble_1", "type": "accelerometer"}');
```

Στη συνέχεια, έχοντας ανακτήσει τα ζητούμενα documents, ορίζονται τα συγκεκριμένα πεδία (fields) με οποία δακρυτοποιούνται οι μετρήσεις μέσα στα documents:

```
fields = ['{"time":1.0, "type":1.0, "name":1.0, "x":1.0, "y":1.0, "z":1.0}'];
```

Στη συνέχεια, έχοντας ανακτήσει τα ζητούμενα documents, ορίζονται τα συγκεκριμένα πεδία (fields) με οποία δακρυτοποιούνται οι μετρήσεις μέσα στα documents:

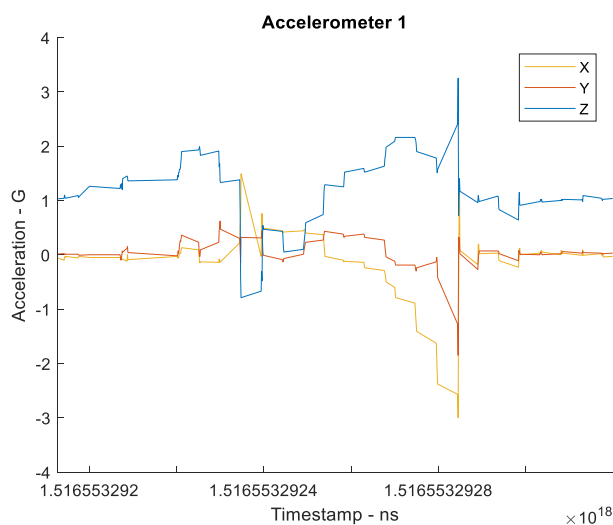
```
accel_1 = find(conn, collection, 'Query', query_accel_1, 'Projection', fields)
```

Τελικά, οι μετρήσεις βρίσκονται οργανωμένες σε structs, για παράδειγμα οι επιταχύνσεις στον άξονα Z του Αισθητήρα 1 είναι:

```
[accel_1.z]
```

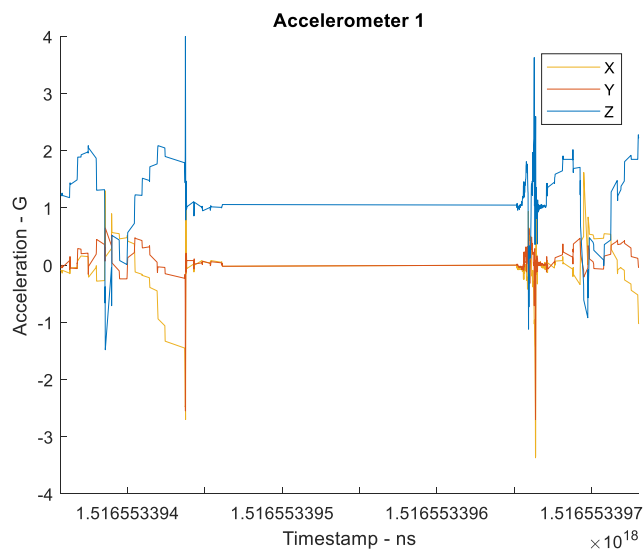
5.4 Αξιολόγηση δεδομένων – Επιλογή μετρήσεων

Στο Σχήμα 5-5 απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο των σημάτων των ανεπεξέργαστων επιταχύνσεων ως προς το χρόνο. Όπως είναι εμφανές, πολλές μετρήσεις είτε έχουν το ίδιο timestamp (συμπίπτουν χρονικά) είτε βρίσκονται χρονικά πολύ κοντά η μια στην άλλη, γεγονός που οφείλεται στον τρόπο που γίνεται η χρονική καταχώριση των μετρήσεων στις συσκευές των αισθητήρων αλλά και μετέπειτα στη βάση δεδομένων (Κεφ.4.3, Κεφ.4.6.3), με αποτέλεσμα το σήμα να είναι στην ουσία λάθος. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μια μέθοδος για τη διόρθωση των timestamps των μετρήσεων και το συγχρονισμό τους, η οποία αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα 5-5. Μετρήσεις όπου κάποιες έχουν το ίδιο timestamp.

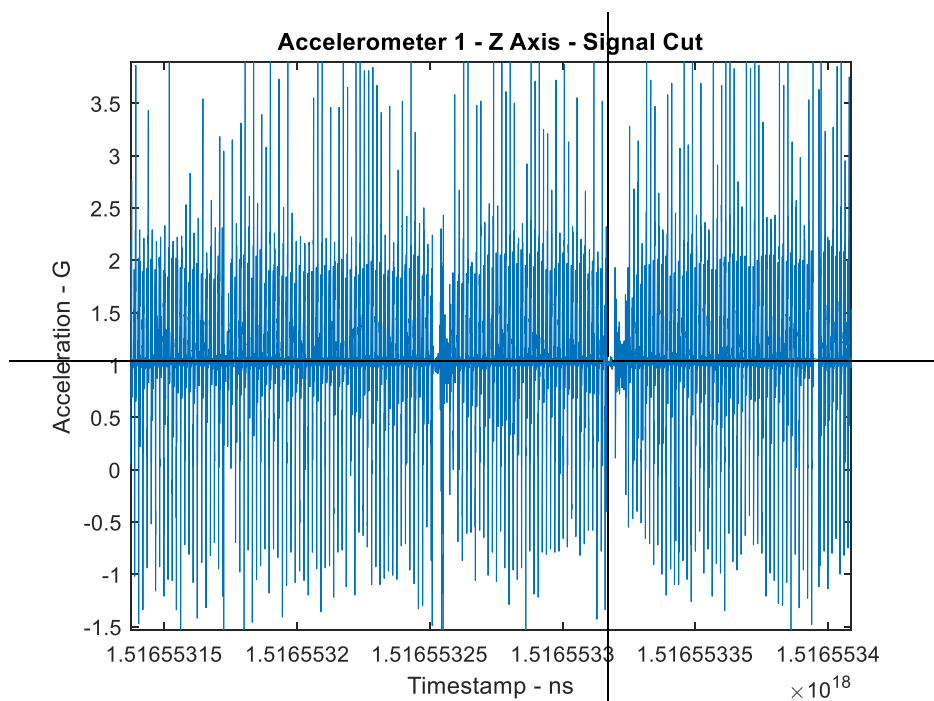
Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-6, σε ελάχιστες περιπτώσεις εμφανίζονται ασυνέχειες στις μετρήσεις, που είναι ίσως αποτέλεσμα κάποιας υπερχείλησης (overflow) της εφαρμογής. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να γίνει πιο λεπτομερής διαλογή των σημάτων.



Σχήμα 5-6. Ασυνέχειες στις μετρήσεις.

Για την επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων, έχει γραφεί κώδικας που επιτρέπει τη γραφική επιλογή της αρχής και του τέλους του επιθυμητού σήματος (Σχήμα 5-7). Εφαρμόζοντας οπτικό έλεγχο σε μια γραφική απεικόνιση της επιτάχυνσης στον άξονα z του *ble_1*, μπορεί να γίνει η επιλογή των μετρήσεων που φαίνονται ομαλές και δεν παρουσιάζουν ασυνέχειες.

Παρατηρήθηκε επίσης, ότι τα σήματα της κάθε συσκευής δεν έχουν ακριβώς την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας, αν και οι συχνότητες όλων είναι σχεδόν 100Hz.



Σχήμα 5-7. Χειροκίνητη τελική επιλογή εύρους σήματος.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο Matlab, είναι ικανός να κόψει αυτόματα τα σήματα όλων των αξόνων των επιταχύνσεων και των γωνιακών ταχυτήτων και των τριών συσκευών Dialog IoT, στα επιλεγμένα timestamps αρχής και τέλους.

Είναι σημαντικό όλα τα επιλεγμένα σήματα των επιταχύνσεων και των γωνιακών ταχυτήτων να ξεκινούν από ακριβώς τα ίδια timestamps και να τελειώνουν παρομοίως, έτσι ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα στη μετέπειτα ανάλυση. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος που τέμνει τα σήματα αυτόματα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ακριβώς εκεί που πρέπει, κοντά στα χρονικά σημεία που επιλέχθηκαν προηγουμένως.

Ο αλγόριθμος ξεκινάει να σαρώνει όλα τα σήματα, βάσει του ελάχιστου χρονικού διαστήματος μεταξύ δυο timestamps, που ορίζεται ως Δt , των ελαχίστων Δt όλων των σημάτων. Για κάθε σήμα:

$$\Delta t = \min_j (T_{j+1} - T_j) \quad j = 1, 2, \dots, \leq \text{length}(T) \quad (5-4)$$

όπου $\text{length}(T)$ = ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος T και T το διάνυσμα του χρόνου.

Ξεκινώντας από την αρχή του κάθε σήματος και αυξάνοντας το χρόνο ανά Δt , ο αλγόριθμος θα σταματήσει (με την εντολή *break*) και θα αποθηκεύσει τις χρονικές στιγμές $T_{a,i,d}(t)$ και $T_{g,i,d}(t)$ κατά τις οποίες ισχύει η συνθήκη:

$$T_{a,i,d}(t) = T_{g,i,d}(t) \quad (5-5)$$

Για παράδειγμα, για το επιταχυνσιόμετρο της κάθε συσκευής:

$$T_{a,i,d}(t) = \min(|t - T(\text{start} : \text{end})|) \quad (5-6)$$

Στις εξισώσεις (5-5) και (5-6) η μεταβλητή i είναι ο αριθμός της συσκευής IoT (1,2,3) και οι δείκτες a και g συμβολίζουν το επιταχυνσιόμετρο (accelerometer) και το γυροσκόπιο (gyroscope) αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης d συμβολίζει τη λέξη 'down', μιας και ο αλγόριθμος σαρώνει το σήμα από τα κάτω προς τα πάνω (αρχή προς τέλος). Το T είναι το διάνυσμα του χρόνου και τα *start* και *end* αποτελούν την αρχική και τελική θέση του πίνακα T των επιλεγμένων σημάτων κάθε αισθητήρα. Τέλος, το t είναι η χρονική μεταβλητή η οποία αυξάνεται σε κάθε επανάληψη (loop) του αλγορίθμου σάρωσης κατά Δt . Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόζεται ομοίως και για το σήμα του γυροσκοπίου.

Παρομοίως, για την εύρεση του ιδανικού τέλους του σήματος, ο αλγόριθμος ξεκινάει τη σάρωση του ανεπεξέργαστου σήματος από το τέλος του μειώνοντας το χρόνο ανά Δt , και θα αποθηκεύσει τις χρονικές στιγμές $T_{a,i,u}(t)$ και $T_{g,i,u}(t)$ κατά τις οποίες ισχύει η συνθήκη:

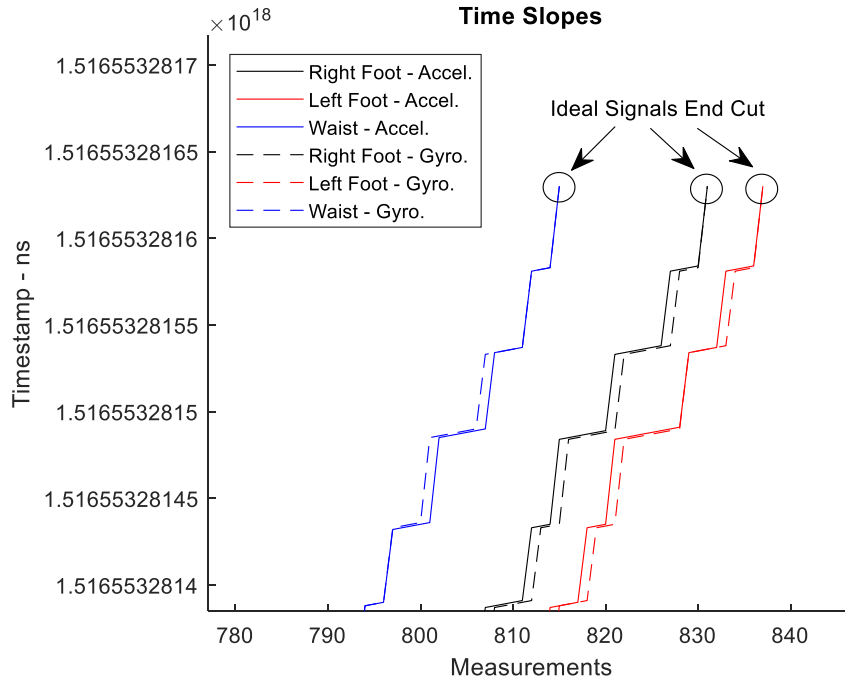
$$T_{a,i,u}(t) = T_{g,i,u}(t) \quad (5-7)$$

Για παράδειγμα, για το γυροσκόπιο της κάθε συσκευής:

$$T_{a,i,u}(t) = \min(|t - T(\text{start} : \text{end})|) \quad (5-8)$$

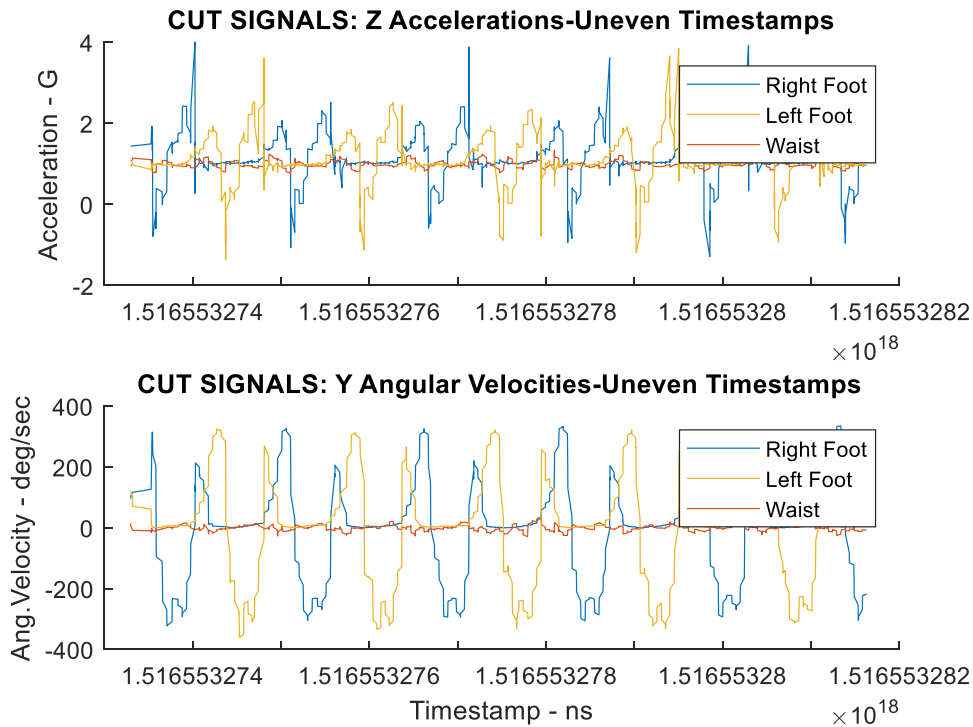
Στις εξισώσεις (5-7) και (5-8) οι μεταβλητές και οι δείκτες είναι ίδιες με πριν, με τη διαφορά ότι εδώ ο τελευταίος δείκτης d αντικαταστάθηκε από το δείκτη u , ο οποίος προκύπτει από τη λέξη 'upper', αφού ο αλγόριθμος σε αυτή τη φάση σαρώνει χρονικά το σήμα από το τέλος προς αρχή (από τα πάνω προς τα κάτω).

Στο Σχήμα 5-8, απεικονίζονται τα ιδανικά σημεία που επιλέγει ο αλγόριθμος για την τομή του τέλους των σημάτων.



Σχήμα 5-8. Κλίση χρόνου – Ιδανική τομή τέλους σημάτων.

Τέλος, από τον άξονα Z των επιταχύνσεων των επιλεγμένων σημάτων αφαιρείται 1 g, που είναι η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας, έτσι ώστε σε ηρεμία να έχουν μηδενική επιτάχυνση. Οι άξονες των σημάτων που θα ληφθούν υπ'όψιν στην ανάλυση που ακολουθεί, είναι ο άξονας Z για τις επιταχύνσεις και ο άξονας Y για τις γωνιακές ταχύτητες. Τα επιλεγμένα σήματα, πριν γίνει η χρονική τους εξομαλυνση, απεικονίζονται στο Σχήμα 5-9.

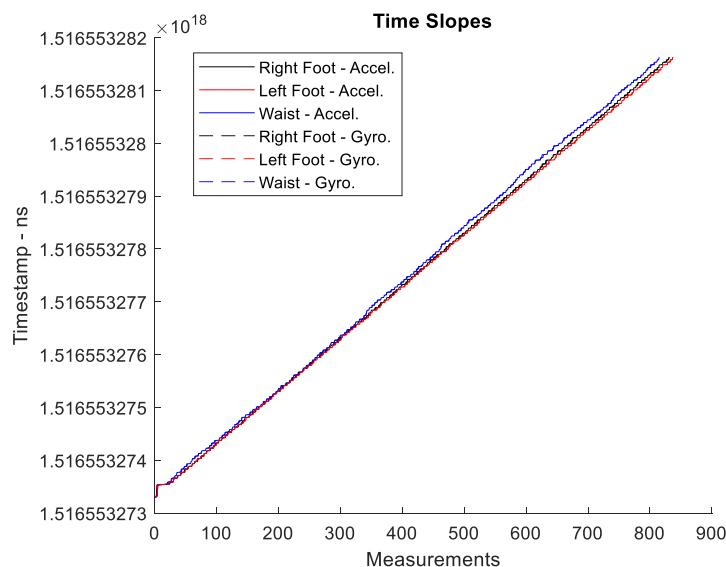


Σχήμα 5-9. Επιταχύνσεις – Γωνιακές Ταχύτητες (Επιλεγμένα Σήματα – Μη ομαλός χρόνος).

5.5 Εξομάλυνση χρονικών σημείων (timestamps)

Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες δεν έχουν ακριβώς την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας μεταξύ τους. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι κάποιες φορές μέσα στο ίδιο σήμα η συχνότητα δειγματοληψίας μεταβάλλεται. Επειδή η ανάλυση που ακολουθεί απαιτεί μεγάλη λεπτομέρεια και σωστό συγχρονισμό των σημάτων μεταξύ τους, είναι σημαντικό να γίνει πρώτα ένας ποιοτικός έλεγχος των σημάτων, ώστε να φανεί αν υπάρχουν τέτοιου είδους σφάλματα στα επιλεγμένα σήματα. Για το λόγο αυτό, στο Σχήμα 5-10, απεικονίζεται η κλίση του χρόνου, δηλαδή τα χρονικά σημεία (timestamps) ως προς τον αντίστοιχο αριθμό μετρήσεων.

Στο Σχήμα 5-10 είναι εμφανές ότι τα σήματα των 2 πελμάτων έχουν σχεδόν την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας, ενώ το σήμα της μέσης εμφανίζει μια μικρή απόκλιση, τόση ώστε να μην επηρεάζει την ποιότητα των δεδομένων, του συγχρονισμού τους και της περαιτέρω ανάλυσης. Επίσης, το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων αποτελεί το βέλτιστο σε σχέση με πολλές άλλες μετρήσεις που ελήφθησαν πειραματικά.



Σχήμα 5-10. Κλίση χρόνου επιλεγμένων σημάτων.

Τελικά, από την κλίση του διανύσματος του χρόνου του κάθε αισθητήρα, προκύπτουν οι συχνότητες δειγματοληψίας του κάθε σήματος, που συνοψίζονται στον Πίνακα 5-1:

Πίνακας 5-1. Συχνότητες δειγματοληψίας επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων.

Αισθητήρας 1 (δεξί πέλμα)		Αισθητήρας 2 (Μέση)		Αισθητήρας 3 (αριστερό πέλμα)	
fa1 (Hz)	fg1 (Hz)	fa2 (Hz)	fg2 (Hz)	fa3 (Hz)	fg3 (Hz)
99.77	99.77	97.83	97.85	100.49	100.48

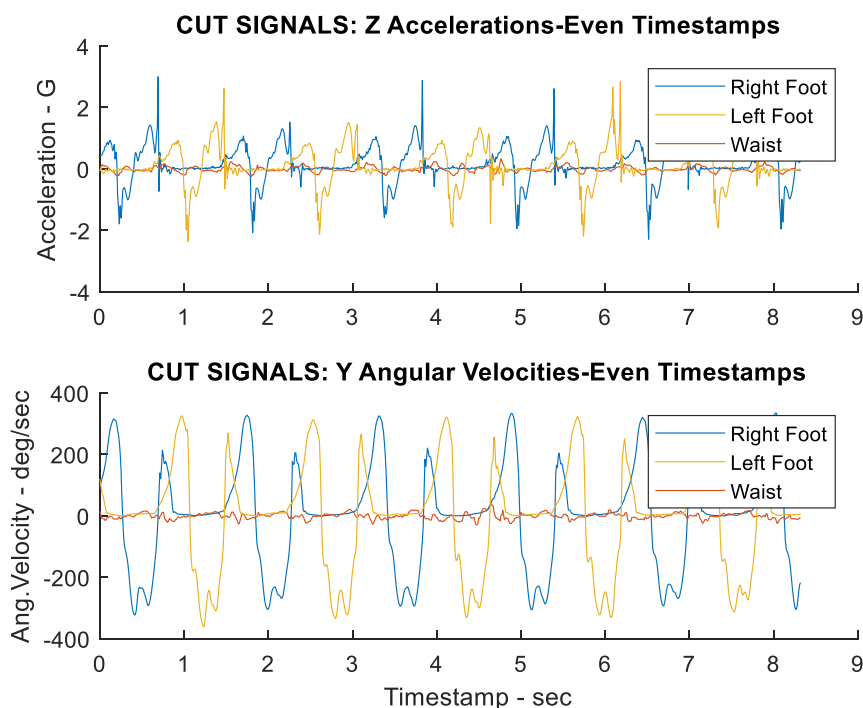
a = accelerometer (επιταχυνσιόμετρο) g = gyroscope (γυροσκόπιο)

Για να γίνει η ανάλυση των μετρήσεων ως προς το χρόνο, θα πρέπει να οριστούν νέα χρονικά σημεία (timestamps) με ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, χωρίς να αλλοιωθεί η ποιότητα του σήματος. Βάσει των συχνοτήτων δειγματοληψίας (Πίνακας 5-1) και της εξίσωσης (5-9), προκύπτουν τα διαγράμματα

επιταχύνσεων και γωνιακών ταχυτήτων ως προς τον ομαλό πλέον χρόνο (Σχήμα 5-11). Για παράδειγμα, για τις επιταχύνσεις, ακολουθείται η παρακάτω εξίσωση:

$$T_{a,i} = \left[0 : \frac{1}{f_{A,i}} : \left(\frac{\text{length}(T_{a,i,u} - T_{a,i,d}) - 1}{f_{A,i}} \right) \right] \quad (5-9)$$

όπου i ο αριθμός ο αριθμός της συσκευής IoT (1,2,3) και $T_{a,i}$ ο νέος πίνακας του χρόνου.



Σχήμα 5-11. Επιταχύνσεις – Γωνιακές Ταχύτητες (Επιλεγμένα Σήματα – Ομαλός χρόνος).

Συγκρίνοντας ποιοτικά το Σχήμα 5-11 με το Σχήμα 5-9, είναι εμφανές ότι τα νέα σήματα είναι πιο ομαλά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ανάλυση.

5.6 Αναγνώριση φάσεων βαδίσματος

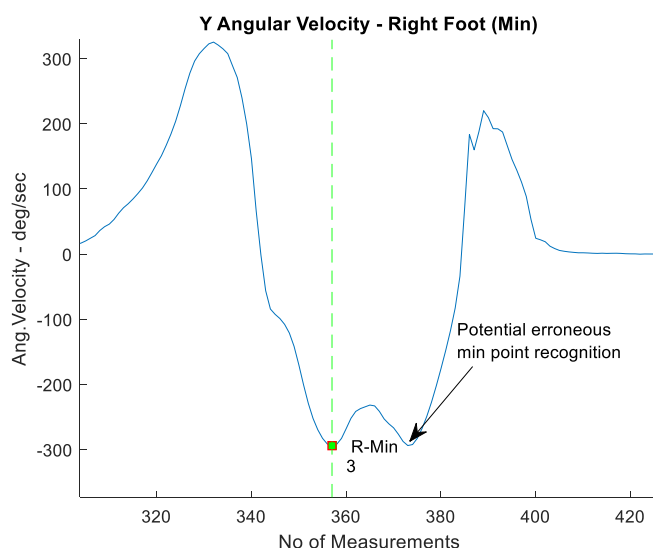
Στο Κεφ.2.3 περιγράφονται οι διάφορες φάσεις του βαδίσματος. Στην παρούσα εργασία, οι φάσεις του βαδίσματος για το κάθε πόδι διακριτοποιούνται βάσει των εξής γεγονότων: Πάτημα Πτέρνας (HS), Επίπεδο Πέλμα (FF), Απομάκρυνση Πτέρνας (HO) και Απομάκρυνση Δακτύλων (TO). Για την αναγνώριση των σημείων αυτών, υλοποιήθηκε ένας αυτοματοποιημένος ευριστικός αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιεί ως βάση γεγονότα της γωνιακής ταχύτητας γύρω από τον άξονα Y σε κάθε κύκλο βαδίσματος. Ένας κύκλος βαδίσματος αρχίζει με το HS και ολοκληρώνεται στο επόμενο HS του ίδιου ποδιού. Οι άξονες που αναφέρονται παρακάτω συμβαδίζουν με το Σωματόδετο Σύστημα Συντεταγμένων (Σχήμα 5-2).

Αναγνώριση του Heel Strike (HS)

Το HS συμβαίνει τη στιγμή η γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον άξονα Y μηδενίζεται, καθώς ανεβαίνει από το ελάχιστο σημείο της προς θετικές τιμές. Η επαλήθευση του γεγονότος αυτού, γίνεται από τον

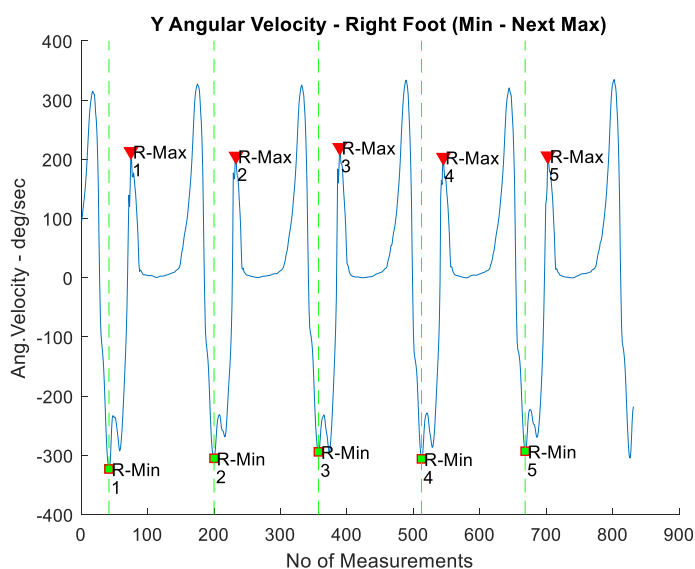
έλεγχου της σύμπτωσης της μηδενικής γωνιακής ταχύτητας με ένα τοπικό μέγιστο στην επιτάχυνση κατά τον άξονα Z. Για να βρεθεί αυτό το σημείο, θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα.

Αρχικά, αναγνωρίζονται οι ελάχιστες τιμές της γωνιακής ταχύτητας, οι οποίες δεν πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κάτω μια συγκεκριμένη απόσταση, για την αποφυγή αναγνώρισης ενδεχόμενων κοντινών τοπικών ελαχίστων, που απορρίπτονται από τον αλγόριθμο ως ψευδογεγονότα. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5-12 ο αλγόριθμος θα μπορούσε να αναγνωρίσει και το ακριβώς επόμενο σημείο ως ελάχιστο της καμπύλης, γεγονός που όμως απορρίφθηκε επιτυχώς.



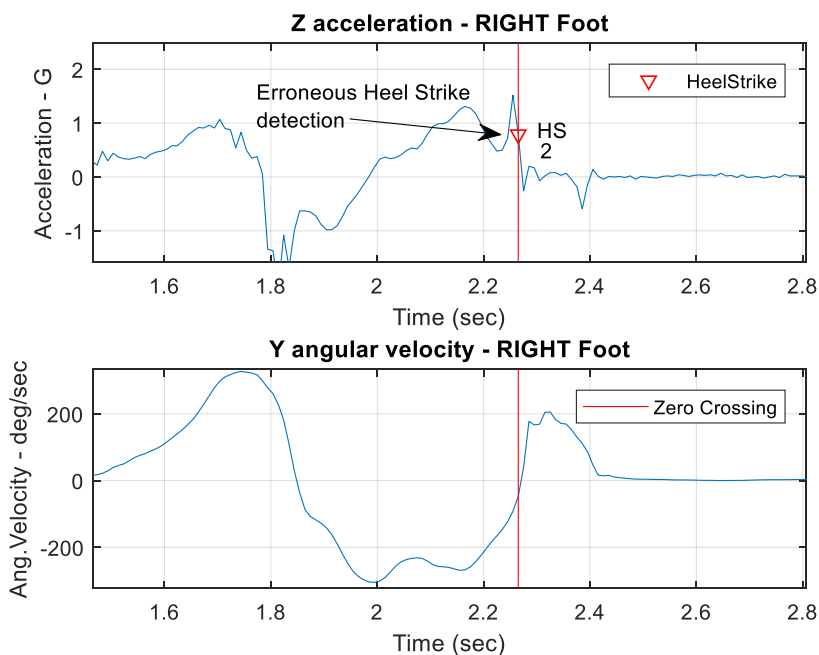
Σχήμα 5-12. Εύρεση ελαχίστων τιμών γωνιακής ταχύτητας – Αποφυγή ψευδογεγονότων.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εντοπίζει τα μέγιστα του σήματος, που ακολουθούν τα αντίστοιχα ελάχιστα που μόλις αναγνωρίστηκαν. Για την περιοχή σάρωσης χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των ελαχίστων και των μεγίστων, που είναι ίση με περίπου το 25% του κύκλου βάδισης.

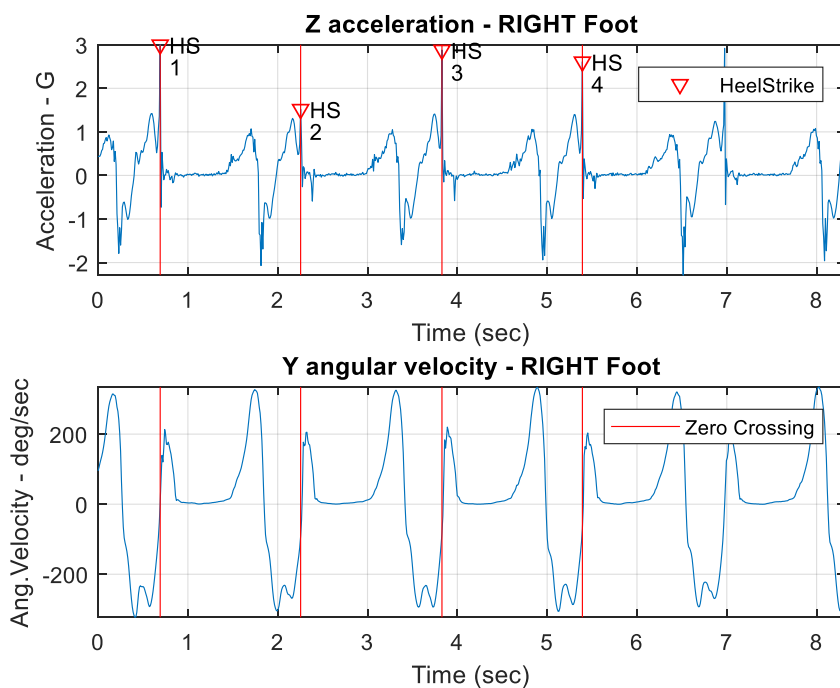


Σχήμα 5-13. Εύρεση ελαχίστων – μέγιστων τιμών γωνιακής ταχύτητας για αναγνώριση Heel Strike (Δεξί Πέλημα).

Έχοντας αναγνωρίσει αυτές τις δυο ομάδες σημείων, μπορεί να αναγνωρισθεί το Heel Strike στο σήμα των επιταχύνσεων. Κατόπιν παρατήρησης ότι κάποια σημεία του Heel Strike δεν ήταν απολύτως ακριβή (Σχήμα 5-14), ο ευριστικός αλγόριθμος σαρώνει μια περιοχή εύρους έως και δυο σημείων πριν και μετά το σημείο αυτό, για να ελέγξει αν τυχόν υπάρχουν μεγαλύτερες κοντινές τιμές της επιτάχυνσης του άξονα Z. Τελικά, αναγνωρίζονται όλα τα Heel Strikes, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 5-15.



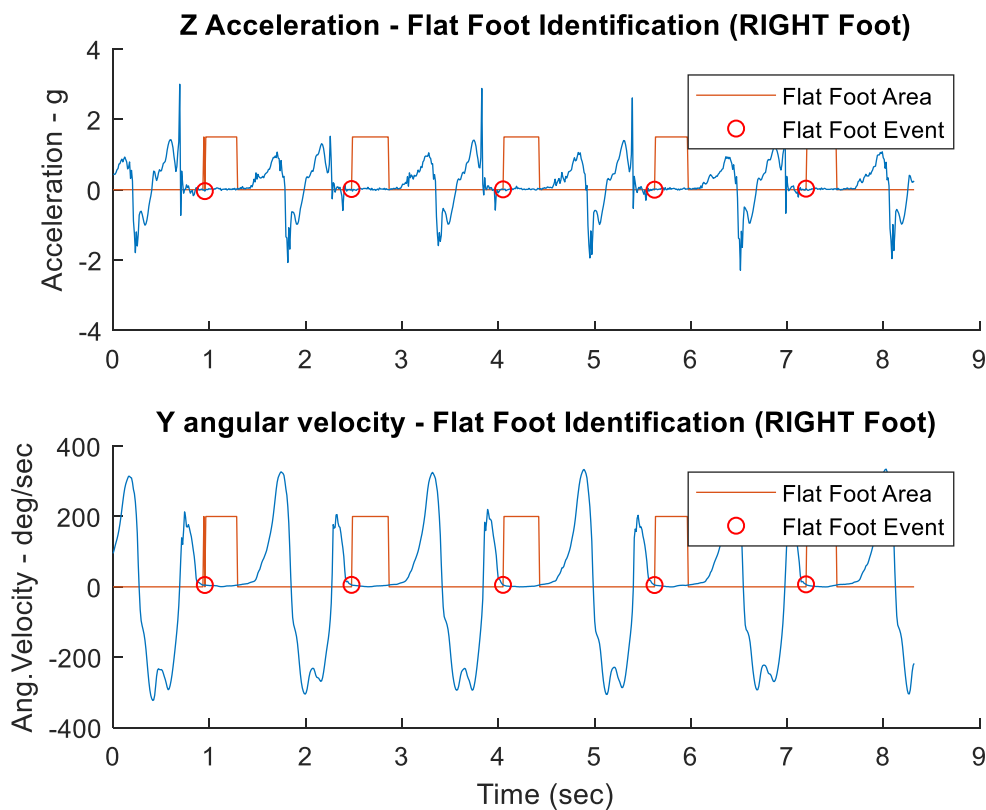
Σχήμα 5-14. Εσφαλμένη αναγνώριση Heel Strike (Δεξί Πέλημα).



Σχήμα 5-15. Αναγνώριση Heel Strike (Δεξί Πέλημα).

Αναγνώριση του Flat Foot (FF)

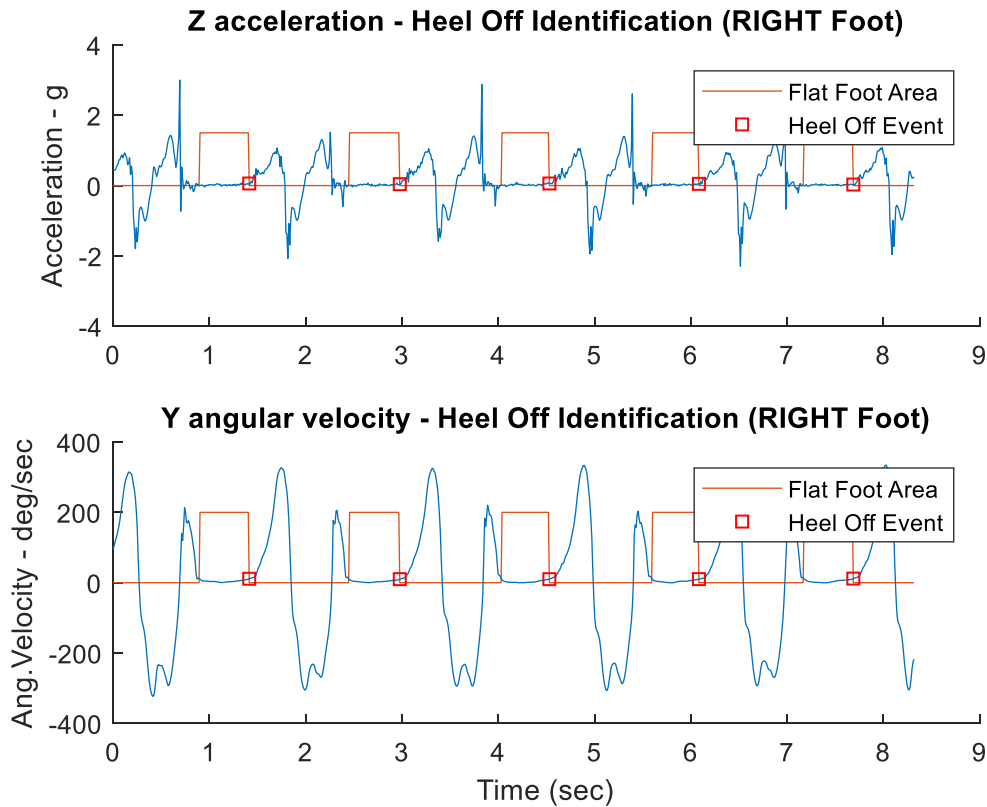
Η επόμενη φάση ξεκινάει όταν το πέλμα βρεθεί ολόκληρο σε πλήρη επαφή με το έδαφος. Τη στιγμή του Heel Strike, το πέλμα χτυπάει το έδαφος υπό γωνία και στη συνέχεια περιστρέφεται αρνητικά ως προς τον Y άξονα, μέχρι να ευθυγραμμιστεί με το έδαφος. Έτσι, το σημείο Flat Foot μπορεί εύκολα να αναγνωριστεί με τον ευριστικό αλγόριθμο να σαρώνει ολόκληρο το σήμα της γωνιακής ταχύτητας του Y, ώστε να βρεθούν τα σημεία, μεταξύ δυο διαδοχικών Heel Strikes του ίδιου ποδιού, όπου η γωνιακή ταχύτητα και η επιτάχυνση στον άξονα Z, είναι σχεδόν μηδέν. Δεν αρκεί απλώς ένα σημείο να είναι μηδέν και τα διπλανά του μη μηδενικά, για αυτό και έχει οριστεί ένας ελάχιστος αριθμός συνεχόμενων σημείων μηδενικής γωνιακής ταχύτητας. Το σύνολο των σημείων αυτών ορίζει μια περιοχή (περιοχή Flat Foot), στην αρχή της οποίας βρίσκεται το συμβάν του Flat Foot (Σχήμα 5-16).



Σχήμα 5-16. Αναγνώριση Flat Foot (Δεξί Πέλμα).

Αναγνώριση του Heel Off (HO)

Η φάση του βαδίσματος που ακολουθεί, σηματοδοτείται με το ανασήκωμα της πτέρνας (heel) από το έδαφος. Αυτό συμβαίνει όταν η γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον άξονα Y και η επιτάχυνση στον άξονα Z, από εκεί που ήταν συνεχόμενα μηδενικές, αρχίζουν και αποκτούν θετικές τιμές (Σχήμα 5-17). Στην ουσία, είναι το σημείο που έπεται του τελευταίου σημείου της περιοχής Flat Foot, που ορίστηκε προηγουμένως.

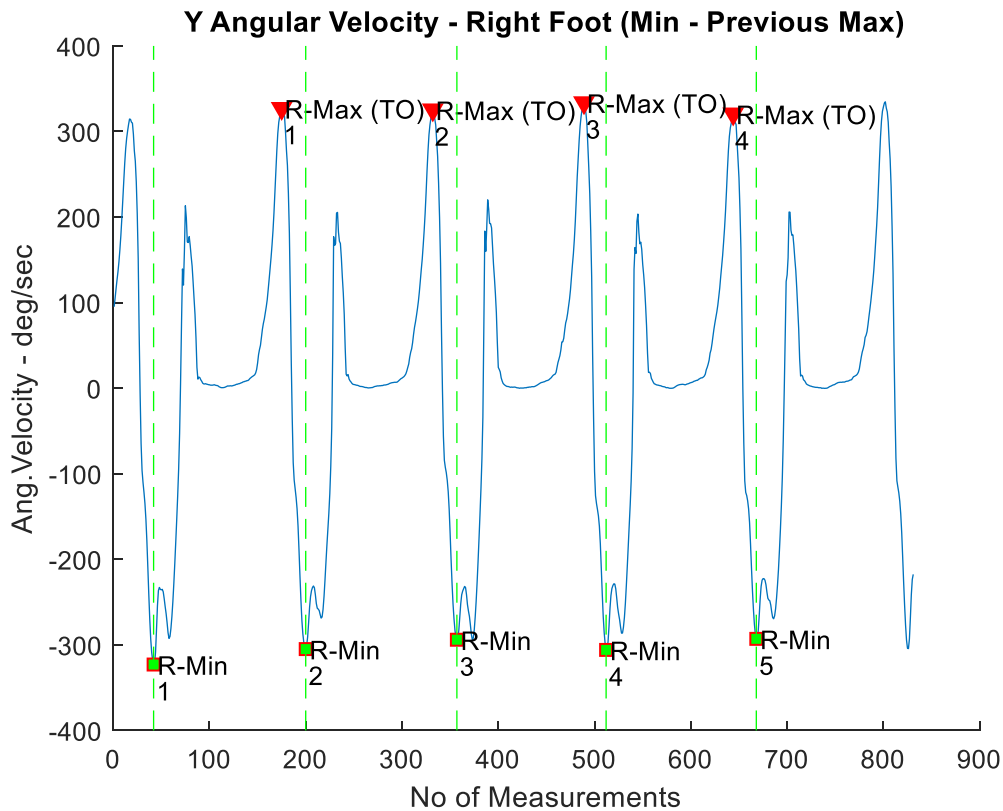


Σχήμα 5-17. Αναγνώριση Heel Off (Δεξί Πέλημα).

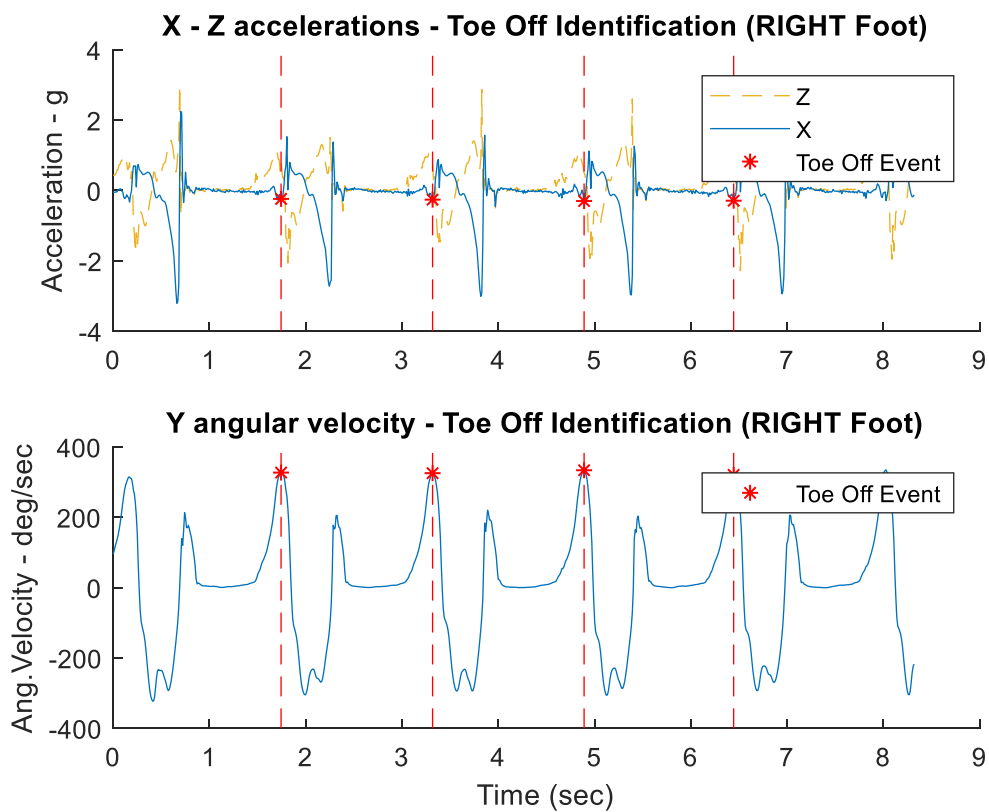
Αναγνώριση του Toe Off (TO)

Η τελική φάση του βαδίσματος, ξεκινά τη στιγμή που το πέλημα αποχωρίζεται ολοκληρωτικά πλέον το έδαφος και το πόδι εισέρχεται στη «φάση πτήσης» (Swing Phase). Αυτό συμβαίνει, όταν η γωνιακή ταχύτητα, μετά το συμβάν του Heel Off, αποκτά τη μέγιστη τιμή της. Το συμβάν αυτό επαληθεύεται με την επιτάχυνση του άξονα X εκείνη τη στιγμή, ενώ ήταν μηδέν, να αποκτά θετικές τιμές, που σημαίνει ότι το πόδι κινείται προς τα εμπρός αποχωρισμένο πλέον από το έδαφος.

Ο ευριστικός αλγόριθμος, κατά την αναγνώριση του Heel Strike, έχει ήδη βρεί και αποθηκεύσει τα τοπικά μέγιστα του σήματος της γωνιακής ταχύτητας που ακολουθούν τα αντίστοιχα ελάχιστα (Σχήμα 5-13). Σε αυτή τη φάση, ο αλγόριθμος θα πρέπει να βρεί τα τοπικά μέγιστα του σήματος που προηγούνται των ελαχίστων. Για επιτευχθεί αυτό, θα σαρώσει την περιοχή μεταξύ δυο τέτοιων σημείων (μεγίστων) ψάχνοντας για ένα ακόμη τοπικό μέγιστο που βρίσκεται ανάμεσά τους (Σχήμα 5-18). Αυτή είναι και η χρονική στιγμή του συμβάντος Toe Off, στα σήματα των επιταχύνσεων, Στο Σχήμα 5-19, απεικονίζεται με έντονο χρώμα ο άξονας των επιταχύνσεων X, ώστε να γίνει και η οπτική επαλήθευση της εύρεσης του σημείου Toe Off.



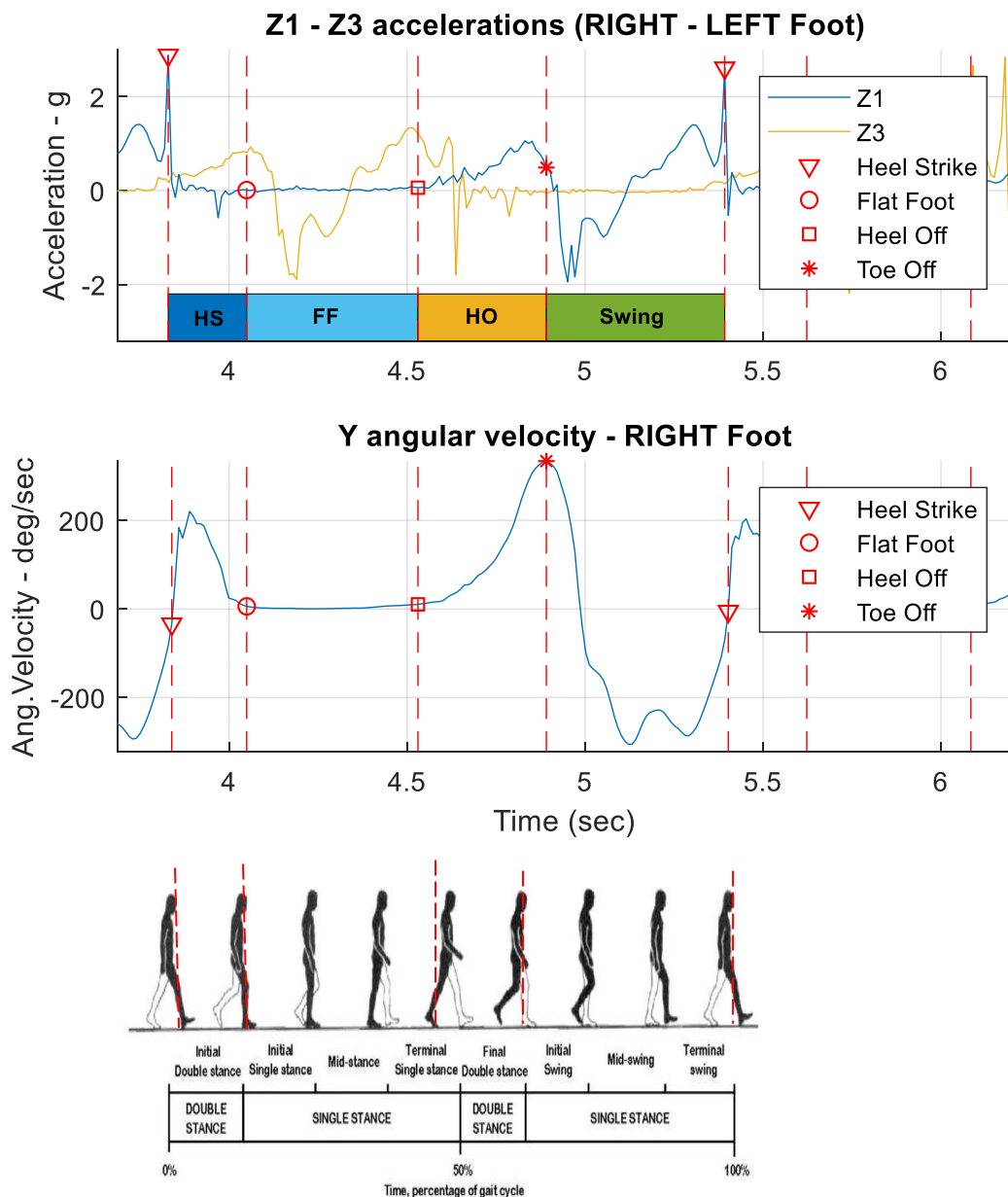
Σχήμα 5-18. Εύρεση ελαχίστων – μέγιστων τιμών γωνιακής ταχύτητας για αναγνώριση Toe Off (Δεξί Πέδμα).



Σχήμα 5-19. Αναγνώριση Toe Off (Δεξί Πέδμα).

Βασικές φάσεις βαδίσματος

Ολοκληρώνοντας το παρόν κεφάλαιο, στο Σχήμα 5-20 παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικές φάσεις του βαδίσματος, όπως διακριτοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, για το ένα πόδι. Επίσης, παρατίθεται και ένα σχήμα της βιβλιογραφίας με τα διάφορα στάδια του βαδίσματος, για την καλύτερη κατανόηση των διαγραμμάτων. Είναι εμφανής η ταύτιση της βιβλιογραφίας και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.



Σχήμα 5-20. Οι βασικές φάσεις του βαδίσματος (Δεξί Πέμα) – με παράθεση φάσεων βαδίσματος από βιβλιογραφία [20].

6 Αναγνώριση Συστήματος

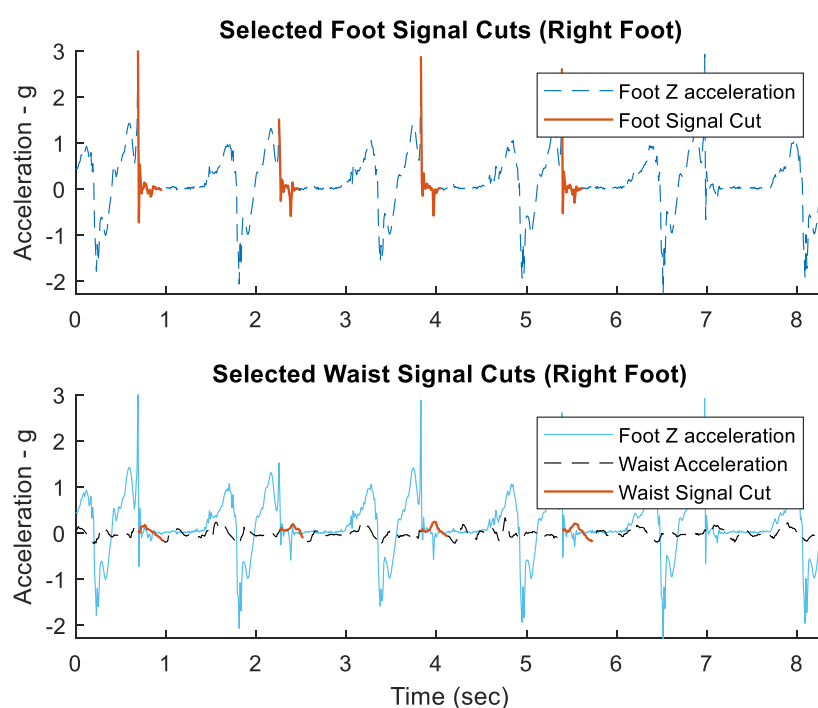
Στο κεφάλαιο αυτό, εφαρμόζονται δυο μέθοδοι αναγνώρισης συστημάτων (System Identification), κάνοντας χρήση των συναρτήσεων *arx* και *tfest* του υπολογιστικού περιβάλλοντος Matlab. Στόχος, είναι η εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς που χαρακτηρίζει το πόδι κατά την αρχική επαφή του με το έδαφος.

6.1 Λήψη Μέρους Σημάτων Επιτάχυνσης / Ζεύγη Εισόδων – Εξόδων

Για την αναγνώριση του συστήματος, απαιτείται να δημιουργηθούν τα ζεύγη εισόδων και εξόδων του συστήματος. Το σύστημα θεωρείται SISO, δηλαδή μονής εισόδου και μονής εξόδου. Ως είσοδος λαμβάνεται η επιτάχυνση του πέλματος κατά την κρούση με το έδαφος (*Heel Strike*) και μέχρι τη φάση όπου το πέλμα πατάει εξ'ολοκλήρου στο έδαφος (*Flat Foot*). Ως έξοδος θεωρείται η επιτάχυνση της μέσης για το ίδιο χρονικό διάστημα.

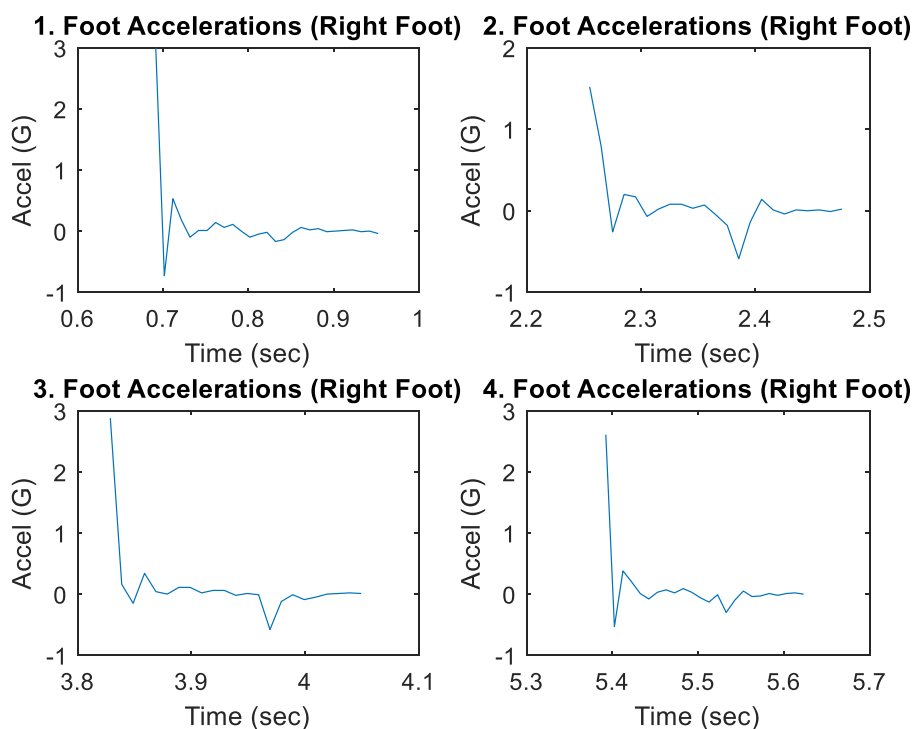
Το σήμα των επιταχύνσεων του πέλματος, λαμβάνεται μεταξύ των σημείων αρχής και τέλους του *Heel Strike*. Για να ληφθεί αυτό το σήμα μετρήσεων της μέσης στα αντίστοιχα σημεία, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος που βρίσκει τα αντίστοιχα σημεία στο σήμα της μέσης και δημιουργεί ένα νέο σήμα (Σχήμα 6-1). Τελικά θα επιλεγούν δυο διαφορετικά ζεύγη εισόδων εξόδων.

Το πρώτο ζεύγος σημάτων θα ονομαστεί *Working Data* (Δεδομένα Εργασίας), και θα είναι το βασικό σήμα όπου θα εφαρμοστούν οι μέθοδοι της αναγνώρισης συστήματος για την εύρεση της ζητούμενης συνάρτησης μεταφοράς. Το δεύτερο ζεύγος θα ληφθεί από ένα διαφορετικό βήμα και θα ονομαστεί *Validation Data* (Δεδομένα Επικύρωσης), το οποίο θα χρησιμεύσει στο να επικυρώσει αν η συνάρτηση μεταφοράς που εκτιμήθηκε ικανοποιεί και αυτά τα δεδομένα.

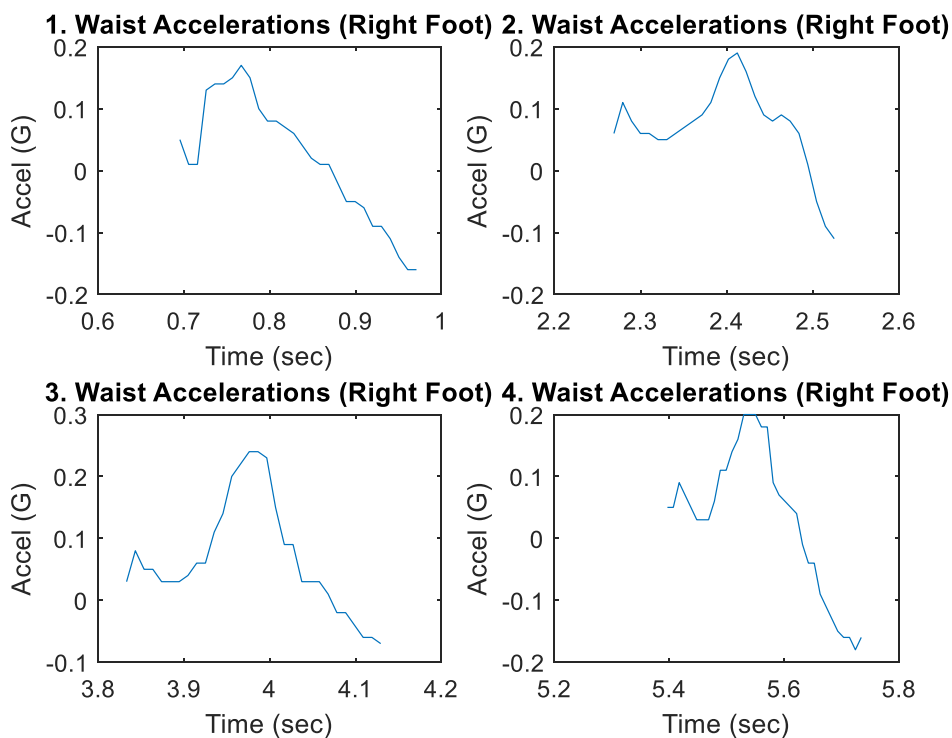


Σχήμα 6-1. Τομές σημάτων ποδιού και μέσης για Αναγνώριση Συστήματος (Δεξί Πέλμα).

Το σύνολο των ζευγών που προκύπτουν από τις λήψεις των σημάτων, παρατίθενται στη συνέχεια (Σχήμα 6-2 και Σχήμα 6-3).

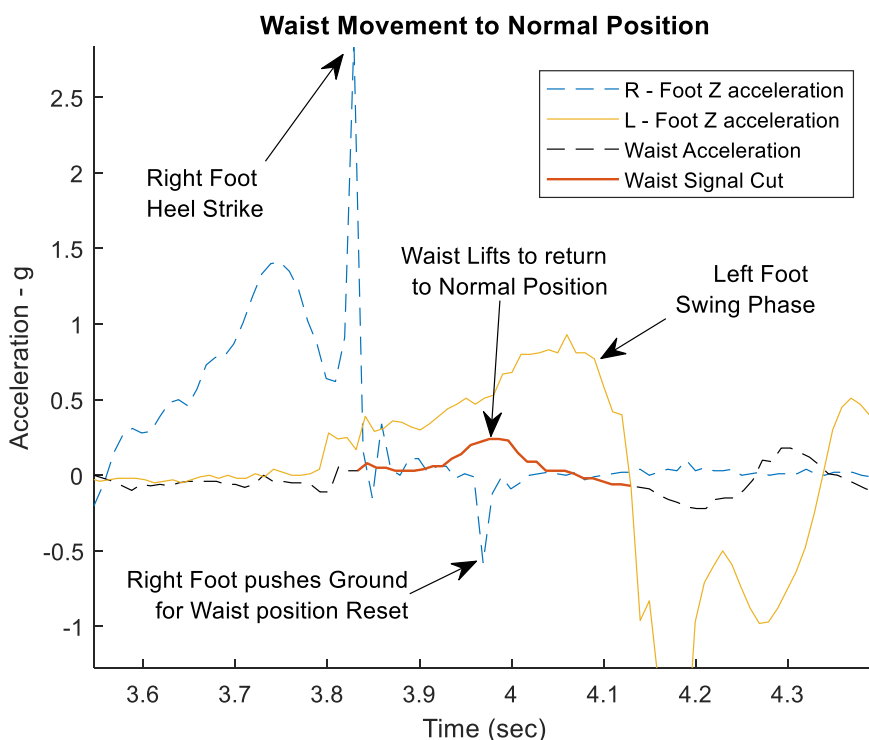


Σχήμα 6-2. Λήψη μέρους σήματος ποδιού για Αναγνώριση Συστήματος (Δεξί Πέλαμα).



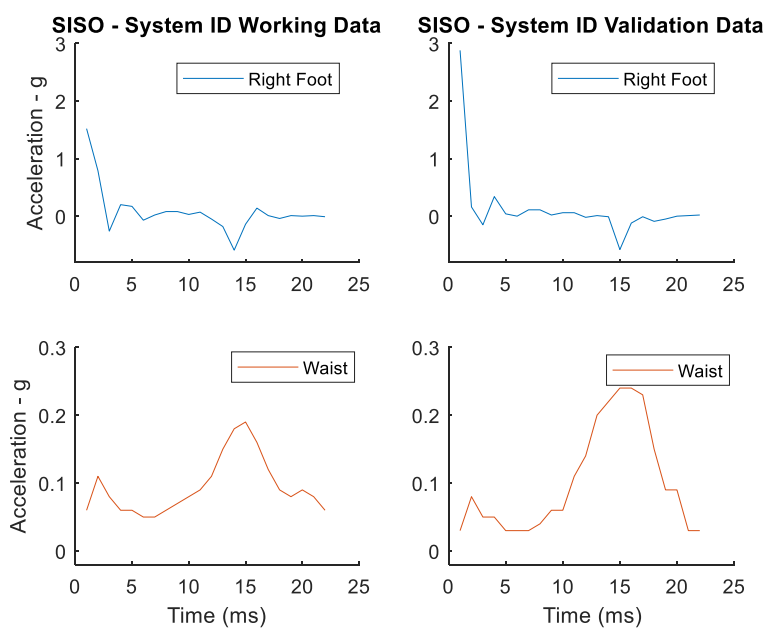
Σχήμα 6-3. Λήψη μέρους σήματος μέσης για Αναγνώριση Συστήματος (για το Δεξί Πέλαμα).

Από την παρατήρηση των σημάτων διακρίνεται και είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η φάση από το Heel Strike μέχρι τη Flat Foot δεν περιλαμβάνει μόνο την απορρόφηση της κρούσης από το πόδι, αλλά και την ανύψωση της μέσης στην αρχική της θέση (Σχήμα 6-4).



Σχήμα 6-4. Ανόρθωση μέσης για επαναφορά στην αρχική της θέση.

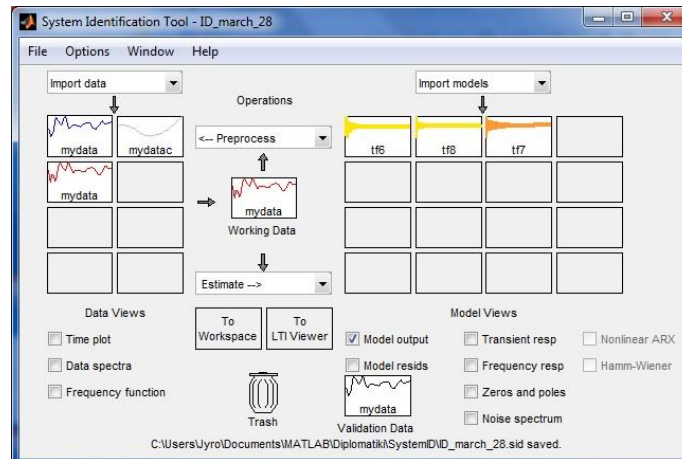
Τελικά, από τα ζεύγη σημάτων που προκύπτουν, κατόπιν οπτικής αξιολόγησης όσον αφορά στην ομαλότητα και το συγχρονισμό, επιλέγονται τα δυο ζεύγη που θα χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο του System Identification (Σχήμα 6-5). Κάθε σήμα έχει μήκος 22 μετρήσεων.



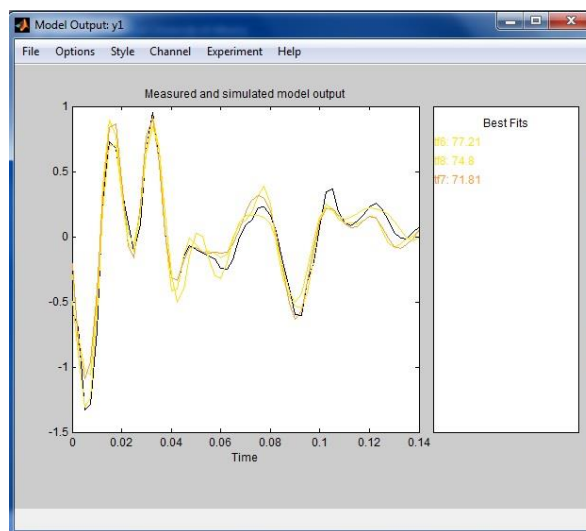
Σχήμα 6-5. Επιλεγμένα ζεύγη σημάτων δεξιού ποδιού και μέσης για System ID.

6.2 Εφαρμογή Μεθόδων Αναγνώρισης Συστήματος

Για την αναγνώριση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε αρχικά το System Identification Toolbox του Matlab (Σχήμα 6-6), ώστε να πραγματοποιηθεί γρήγορα μια πρώτη προσέγγιση στο αναγνωριζόμενο σύστημα. Τα αποτελέσματα αρχικά διερευνητικά μοντέλα είναι αρκετά ικανοποιητικά (Σχήμα 6-7), οπότε η ανάλυση μπορεί να προχωρήσει περαιτέρω.



Σχήμα 6-6. Περιβάλλον εργασίας του System Identification Toolbox του Matlab.

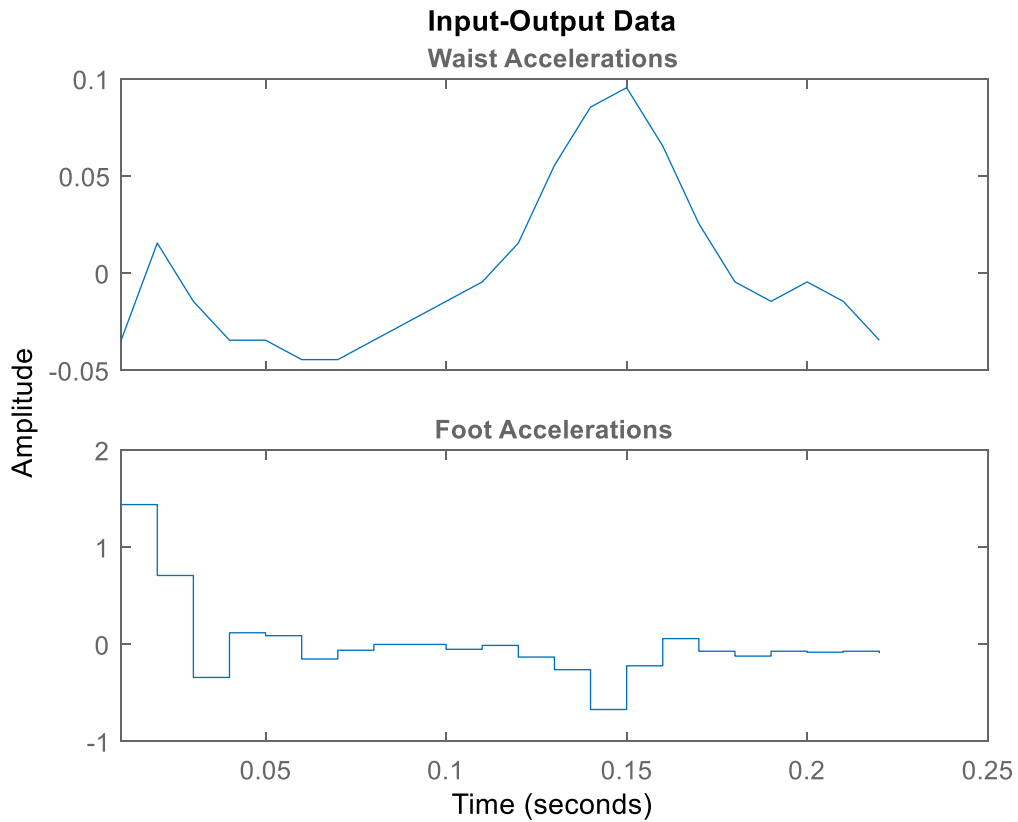


Σχήμα 6-7. Αποτελέσματα του System Identification Toolbox του Matlab.

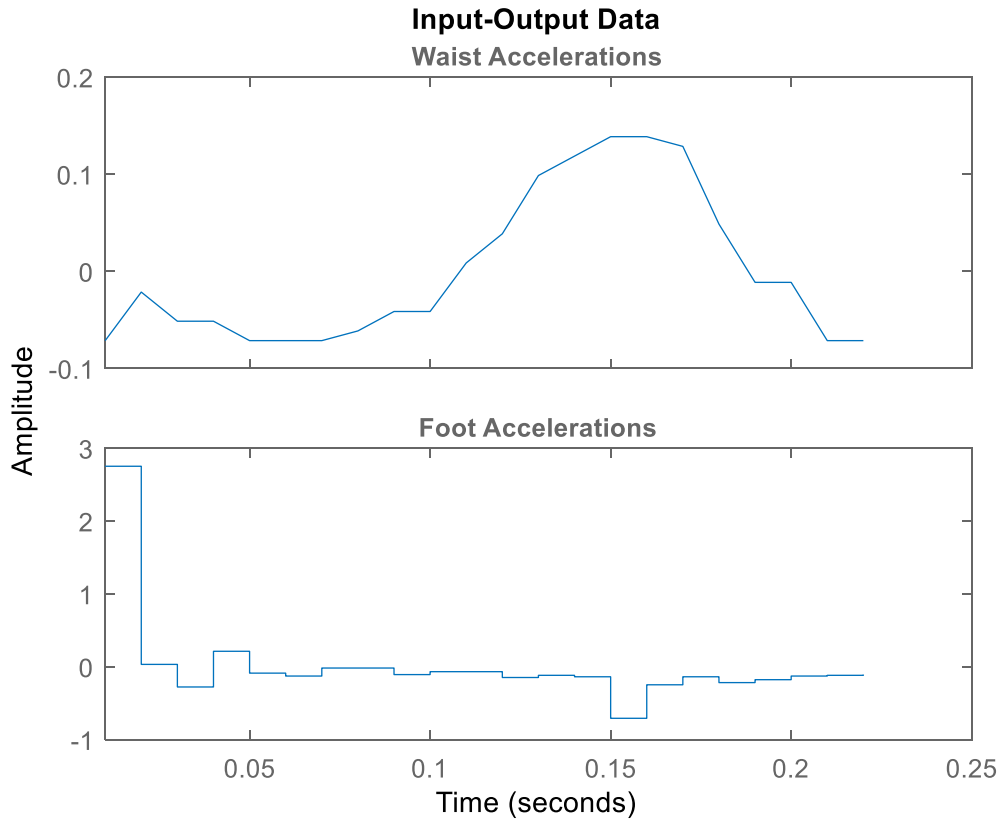
Στη συνέχεια, τα ζεύγη σημάτων οργανώνονται προγραμματιστικά σε οντότητες αναγνωρίσιμες από τις μεθόδους του System Identification, και εφαρμόζεται σε αυτά η τεχνική *detrend*, ώστε να εξομαλυνθεί η συμπεριφορά τους γύρω από τον άξονα x.

6.2.1 Εύρεση Συνάρτησης Μεταφοράς από Heel Strike μέχρι Flat Foot

Τα πρώτα ζεύγη σημάτων που επιλέγονται για ανάλυση περιλαμβάνουν επιταχύνσεις από το Heel Strike μέχρι το Flat Foot και παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 6-8 και Σχήμα 6-9).



Σχήμα 6-8. Working Data για εφαρμογή μεθόδων System ID (HS-FF, Δεξί Πέλμα).



Σχήμα 6-9. Validation Data για εφαρμογή μεθόδων System ID (HH-FF, Δεξί Πέλμα).

Για την αναγνώριση του συστήματος, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος εκτίμησης, ο οποίος κάνει χρήση των δυο βασικών συναρτήσεων αναγνώρισης συστημάτων του Matlab: την *tfest* (συνεχούς χρόνου) και την *arx* (διακριτού χρόνου). Η κάθε συνάρτηση εφαρμόζεται στην είσοδο του ζεύγους Working Data με σκοπό την εύρεση μιας συνάρτησης μεταφοράς που παράγει την ίδια έξοδο του ζεύγους δεδομένων. Με δυο διαδοχικά *for loops*, ο αλγόριθμος επιλέγει διαφορετικό αριθμό πόλων και μηδενιστών, και οργανώνει τα αποτελέσματα ποσοστών προσαρμογής *fit* των συναρτήσεων μεταφοράς που προκύπτουν σε δυο πίνακες, έναν για κάθε μέθοδο (Πίνακας 6-1 και Πίνακας 6-2). Με κόκκινο χρώμα τονίζονται τα ζεύγη πόλων και μηδενιστών των συναρτήσεων μεταφοράς 2^{ης} και 4^{ης} τάξης που επιλέγονται.

Πίνακας 6-1. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την ARX (HS-FF).

Πόλοι	Μηδενιστές							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	46,31	46,33	0	0	0	0	0	0
2	59,00	59,24	66,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	73,06	74,61	74,79	75,46	0,00	0,00	0,00	0,00
4	75,06	76,40	76,59	78,92	79,56	0,00	0,00	0,00
5	75,72	77,79	78,17	79,98	80,69	80,72	0,00	0,00
6	83,01	84,42	84,68	84,84	84,87	89,11	90,56	0,00
7	85,39	87,73	87,74	87,81	87,81	91,67	94,74	94,97

Πίνακας 6-2. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την TFest (HS-FF).

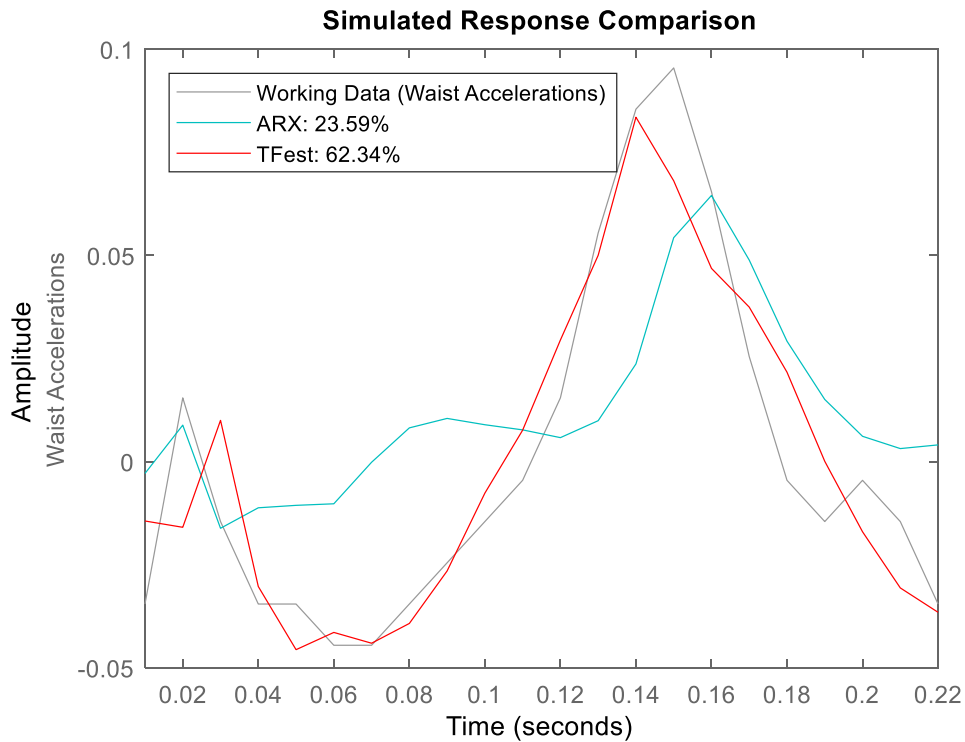
Πόλοι	Μηδενιστές							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	11,94	19,89	0	0	0	0	0	0
2	51,92	54,34	62,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	57,30	59,76	61,11	56,34	0,00	0,00	0,00	0,00
4	64,35	64,61	65,07	72,12	78,30	0,00	0,00	0,00
5	60,04	59,58	48,71	49,87	57,96	62,45	0,00	0,00
6	56,83	57,63	41,89	45,97	41,65	60,17	7,22	0,00
7	46,34	60,66	43,45	42,67	45,25	55,42	55,40	44,81

Μοντέλο 2^{ης} Τάξης

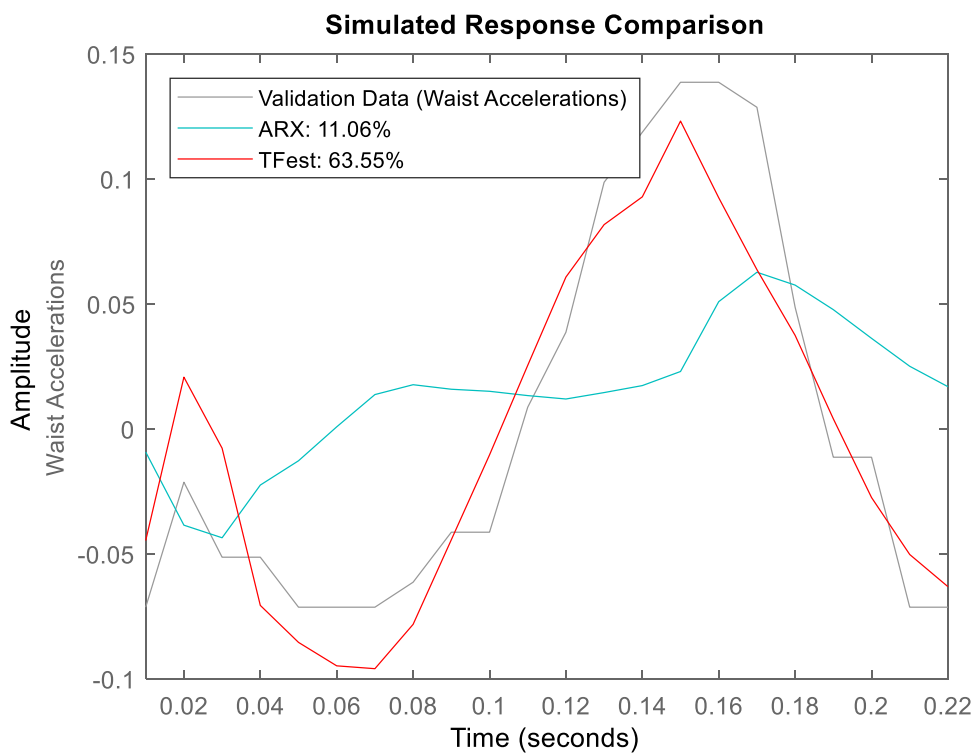
Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι το απλοποιημένο μοντέλο 2^{ης} τάξης που επιλέχθηκε για την μοντελοποίηση της κρούσης του ποδιού με το έδαφος, παρουσιάζει ένα ικανοποιητικό ποσοστό προσαρμογής και στις δυο συναρτήσεις αναγνώρισης, με την ύπαρξη δύο πόλων και δύο μηδενιστών στη συνάρτηση μεταφοράς. Παρακάτω εξετάζεται κι ένα μοντέλο 4^{ης} τάξης.

Στη συνέχεια, απεικονίζεται η γραφική σύγκριση μεταξύ της εξόδου του ζεύγους Working Data και των εξόδων που προκύπτουν από τις συναρτήσεις μεταφοράς που επιλέχθηκαν (Σχήμα 6-10).

Για την τελική επιλογή της συνάρτησης αναγνώρισης, και συνεπώς της συνάρτησης μεταφοράς, οι συναρτήσεις μεταφοράς που εκτιμήθηκαν εφαρμόζονται και στην είσοδο του ζεύγους Validation Data, ώστε να γίνει σύγκριση της εξόδου του με τις εξόδους που προκύπτουν (Σχήμα 6-11).



Σχήμα 6-10. Σύγκριση εξόδου ζεύγους Working Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (HS-FF).



Σχήμα 6-11. Σύγκριση εξόδου ζεύγους Validation Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (HS-FF).

Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα, είναι εμφανές ότι η συνάρτηση μεταφοράς που ικανοποιεί και τα δυο ζεύγη δεδομένων είναι αυτή που προκύπτει από την εφαρμογή της TFest και παρουσιάζεται στην εξίσωση (6-1):

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-0.05794s^2 - 2.175s - 114.7}{s^2 + 5.94s + 1565} \approx \frac{-114.7}{s^2 + 5.94s + 1565} \quad (6-1)$$

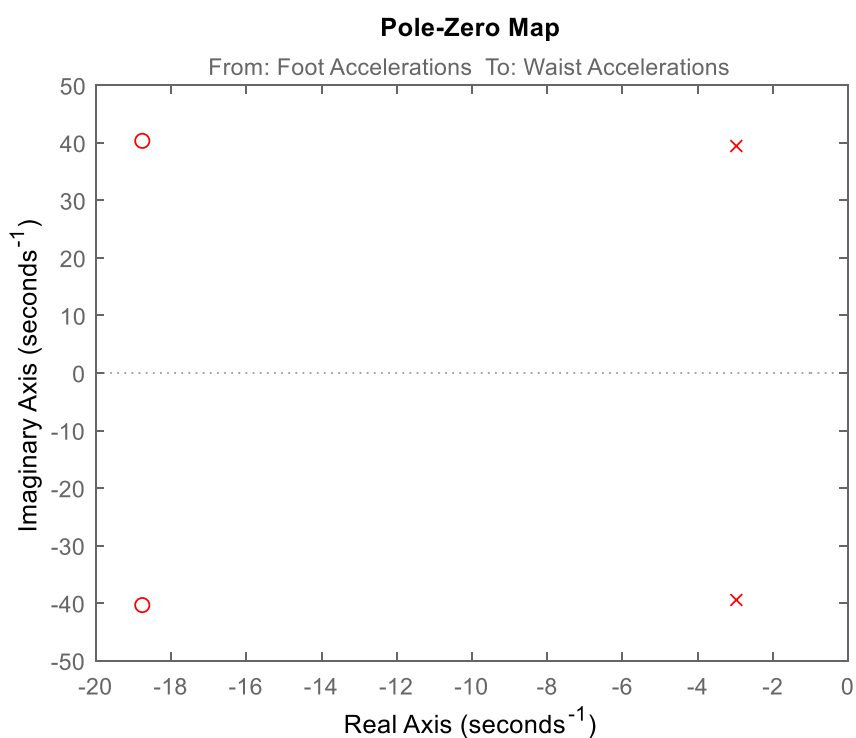
Η συνάρτηση μεταφοράς είναι συνεχούς χρόνου και έχει δυο πόλους και δυο μηδενιστές, που απεικονίζονται στο Σχήμα 6-12. Οι αρνητικοί όροι στον αριθμητή πιθανότατα να οφείλονται στην ανόρθωση της μέσης μετά την αρχική επαφή του ποδιού με το έδαφος (Σχήμα 6-4). Πρόκειται για μια ευσταθή συνάρτηση μεταφοράς, αφού οι πόλοι βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο.

$$\text{Πόλοι} = -2.97 \pm 39.45i \quad \text{Μηδενιστές} = -18.77 \pm 40.34i \quad (6-2)$$

Επίσης, η ιδιοσυχνότητα ω_n και ο συντελεστής απόσβεσης ζ της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$\omega_n = \sqrt{1565} = 39.56 \text{ rad / s} \quad \zeta = 0.075 \quad (6-3)$$

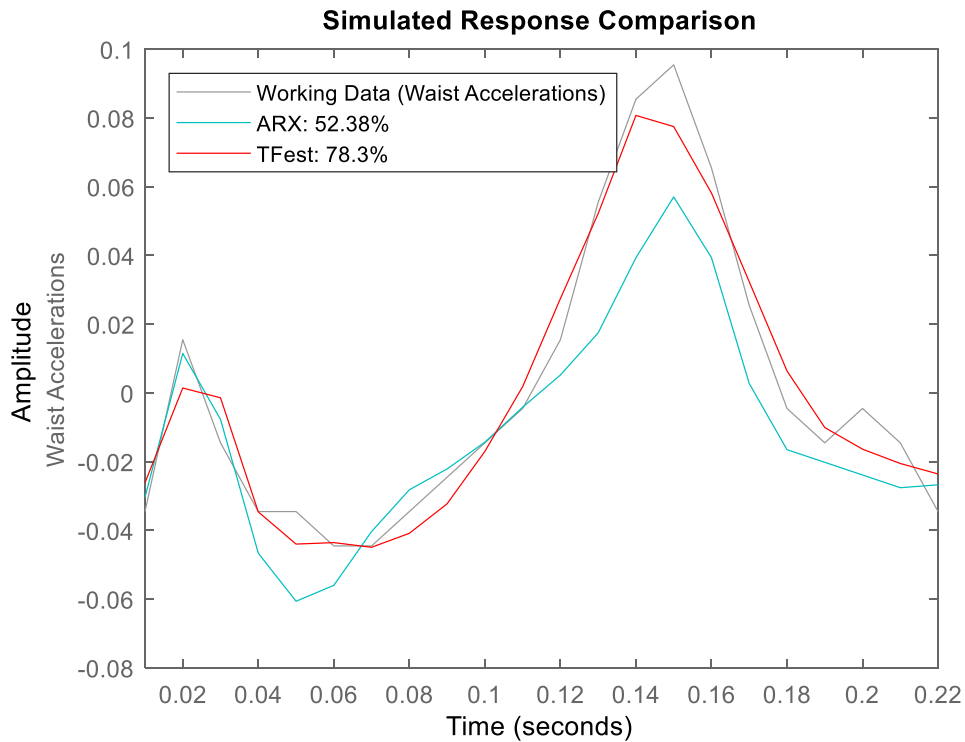
Επομένως, πρόκειται για μια υπο-αποσβαινόμενη ταλάντωση, σχεδόν μηδενικής απόσβεσης.



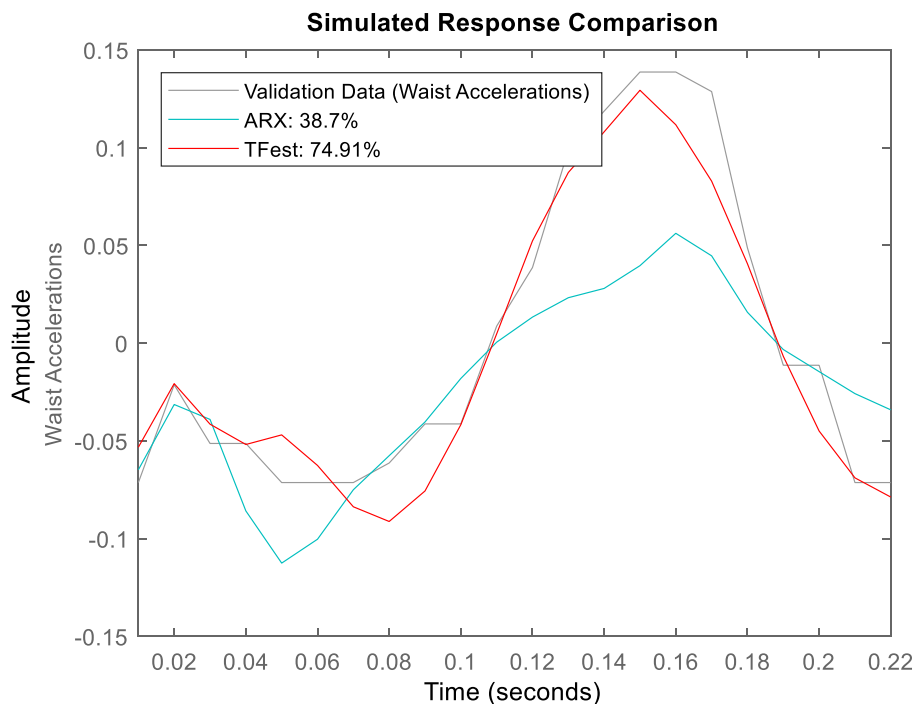
Σχήμα 6-12. Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς 2^{ης} τάξης από Heel Strike μέχρι Flat Foot (x=πόλοι, ο= μηδενιστές).

Μοντέλο 4^{ης} Τάξης

Στη συνέχεια, εξετάζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο 4^{ης} τάξης, το οποίο παρουσιάζει ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό προσαρμογής. Με την εφαρμογή των ίδιων μεθόδων της προηγούμενης υποενοότητας, προκύπτουν τα γραφήματα σύγκρισης για τα Working Data (Σχήμα 6-13) και Validation Data (Σχήμα 6-14).



Σχήμα 6-13. Σύγκριση εξόδου ζεύγους Working Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 4^{ης} τάξης με τέσσερις πόλους και τέσσερις μηδενιστές (HS-FF).



Σχήμα 6-14. Σύγκριση εξόδου ζεύγους Validation Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 4^{ης} τάξης με τέσσερις πόλους και τέσσερις μηδενιστές (HS-FF).

Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα, είναι εμφανές ότι η συνάρτηση μεταφοράς που ικανοποιεί και τα δυο ζεύγη δεδομένων είναι αυτή που προκύπτει από την εφαρμογή της TFest και παρουσιάζεται στην εξίσωση (6-4):

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-0.03202s^4 - 2.624s^3 - 668.7s^2 + 8732s - 1.148 \times 10^6}{s^4 + 54.75s^3 + (1.018 \times 10^4)s^2 + (9 \times 10^4)s + 1.404 \times 10^7} \quad (6-4)$$

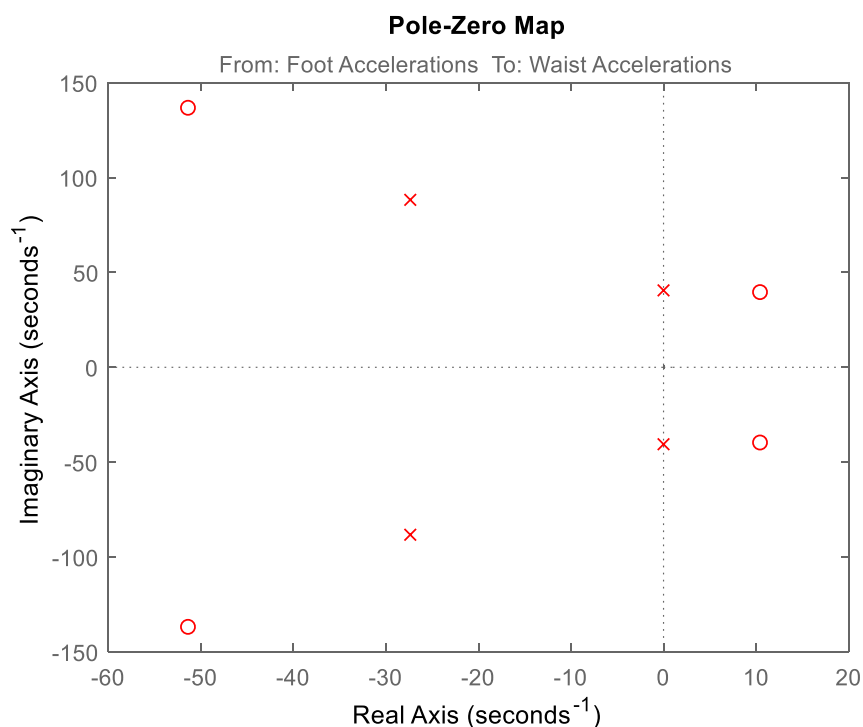
Η συνάρτηση μεταφοράς είναι συνεχούς χρόνου και έχει τέσσερις πόλους και τέσσερα μηδενιστές, που απεικονίζονται στο Σχήμα 6-15. Όπως και προηγουμένως, οι αρνητικοί όροι στον αριθμητή πιθανότατα να οφείλονται στην ανόρθωση της μέσης μετά την αρχική επαφή του ποδιού με το έδαφος (Σχήμα 6-4). Πρόκειται για μια ευσταθή συνάρτηση μεταφοράς, παρά τους δυο πόλους που λόγω κλίμακας φαίνεται να βρίσκονται πάνω στο φανταστικό άξονα.

$$\text{Πόλοι} = \begin{cases} -27.38 \pm 88.25i \\ 3.8 \times 10^{-8} \pm 40.54i \end{cases} \quad \text{Μηδενιστές} = \begin{cases} -0.51 \pm 1.37i \\ 0.1 \pm 0.39i \end{cases} \quad (6-5)$$

Επίσης, η ιδιοσυχνότητα ω_n και ο συντελεστής απόσβεσης ζ της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$\omega_{n,1} = \omega_{n,2} \approx 0 \quad \zeta_1 = \zeta_2 = 0.29 \quad (6-6)$$

Επομένως, πρόκειται για μια υπο-αποσβαινούμενη ταλάντωση.



Σχήμα 6-15. Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς 4^{ης} τάξης από Heel Strike μέχρι Flat Foot (x=πόλοι, ο= μηδενιστές).

Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν είναι καθαρά προσεγγιστικές και παρατίθενται κυρίως για λόγους υπόδειξης μεθοδολογίας. Η χαμηλή δειγματοληψία οδηγεί σε πολύ χαμηλό αριθμό μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο, γεγονός που ίσως να οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Επίσης, στις συναρτήσεις μεταφοράς αυτής της ενότητας περιλαμβάνονται στην ουσία δυο διαφορετικές φάσεις του Heel Strike, με την πρώτη να είναι η αρχική επαφή του πέλματος με το έδαφος και η δεύτερη η ανασήκωση της μέσης για επαναφορά στην αρχική της θέση. Επίσης, είναι

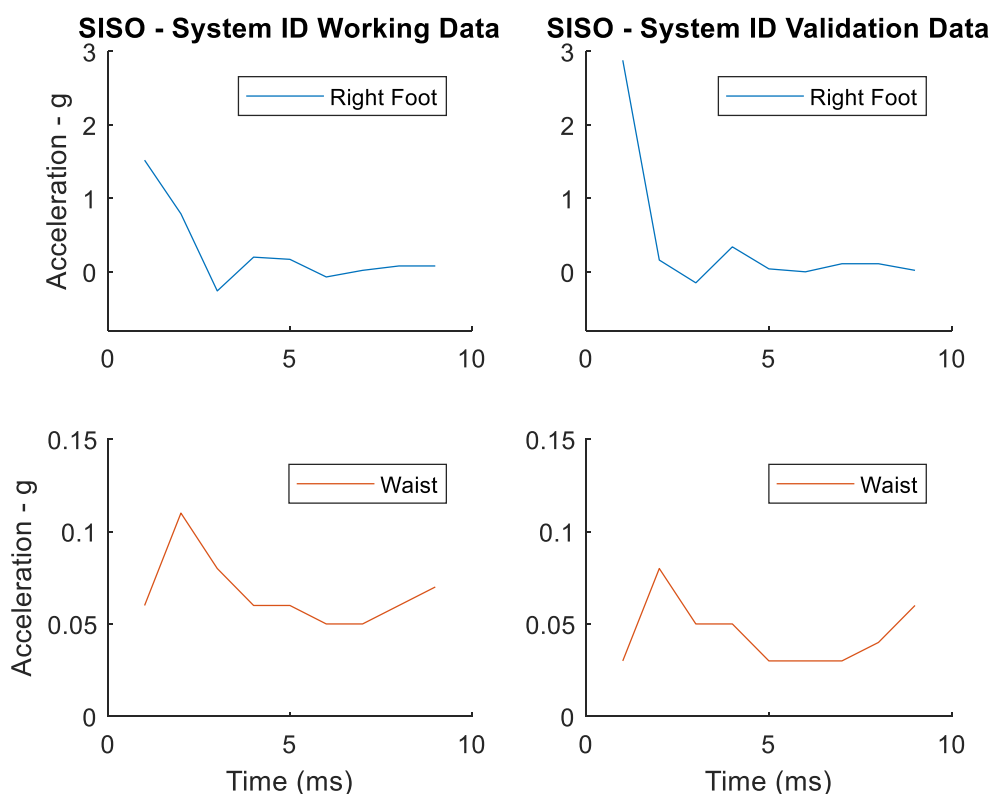
λογικό όσο μεγαλώνει η τάξη της εκτιμώμενης συνάρτησης μεταφοράς να βελτιώνεται και το estimation fit, είναι πιο σημαντικό όμως να εκτιμηθεί μια συνάρτηση μεταφοράς συσχετισμένη με ένα απλοποιημένο μοντέλο, παρά η επιλογή ενός συστήματος πολύ υψηλής τάξης με πολύ καλό fit αλλά κανένα νόημα.

Στην επόμενη ενότητα θα ληφθεί υπ'όψιν μόνο η αρχική επαφή, για την επίτευξη μιας πιο συγκεκριμενοποιημένης μοντελοποίησης του ποδιού κατά την κρούση με το έδαφος.

6.2.2 Εύρεση Συνάρτησης Μεταφοράς μόνο για τη φάση της Αρχικής Επαφής του ποδιού με το έδαφος (Initial Contact).

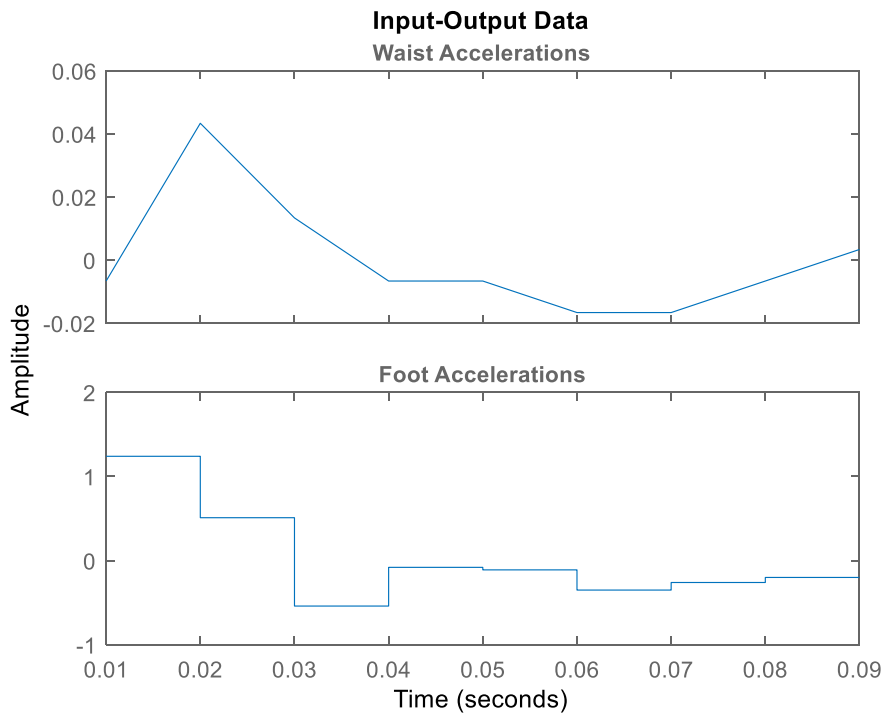
Στην ενότητα αυτή, επιχειρείται η προσέγγιση εύρεσης της συνάρτησης μεταφοράς που περιγράφει τη δυσκαμψία του ποδιού (leg stiffness), της εσωτερικής αντίστασης ουσιαστικά που προβάλλει το πόδι κατά την αρχική επαφή του με το έδαφος για τη διατήρηση της ομαλής κίνησης της μέσης.

Τα ζεύγη σημάτων που επιλέγονται για την ανάλυση της ενότητας αυτής, βασίζονται στα σήματα της προηγούμενης ενότητας (6.2.1) και περιλαμβάνουν επιταχύνσεις από το Heel Strike μέχρι τη στιγμή που η επιτάχυνση της μέσης αρχίζει να αυξάνεται για δεύτερη φορά.

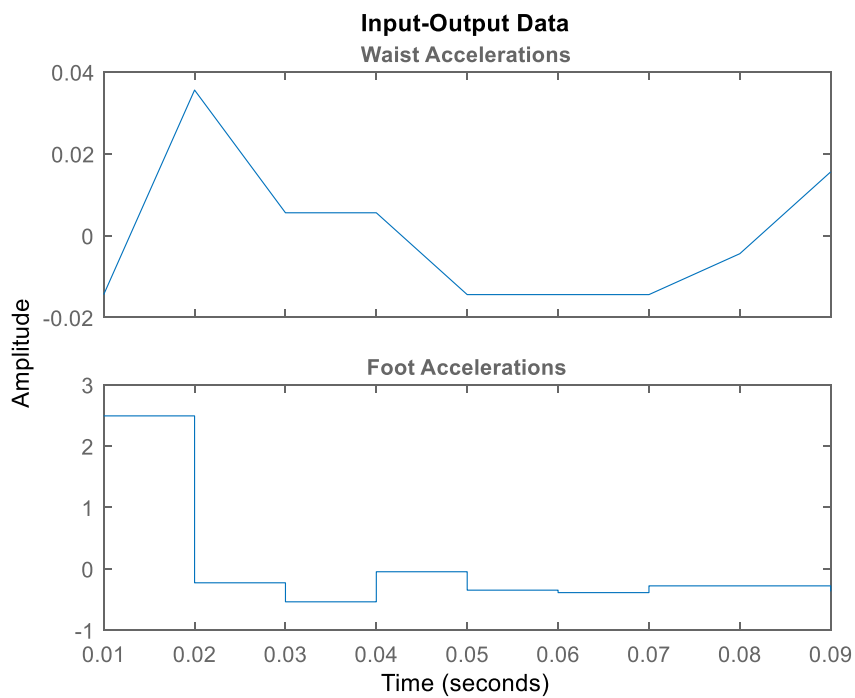


Σχήμα 6-16. Επιλεγμένα ζεύγη σημάτων ποδιού και μέσης για Αναγνώριση Δυσκαμψίας Ποδιού (Δεξί Πόδι).

Στη συνέχεια, τα νέα ζεύγη σημάτων οργανώνονται σε οντότητες αναγνωρίσιμες από τις μεθόδους του System ID και εξομαλύνονται με την τεχνική detrend (Σχήμα 6-17 και Σχήμα 6-18).



Σχήμα 6-17. Working Data για εφαρμογή μεθόδων System Identification (IC, Δεξί Πέλιμα).



Σχήμα 6-18. Validation Data για εφαρμογή μεθόδων System Identification (IC, Δεξί Πέλιμα).

Οι πίνακες των estimation fits που προκύπτουν είναι πολύ μικρότεροι από πριν, καθώς οι συναρτήσεις αναγνώρισης συστημάτων, *tfest* και *arx*, δεν είναι ικανές να εκτιμήσουν πάνω από 3^{ης} τάξης συστήματα λόγω του πολύ μικρού αριθμού μετρήσεων (Πίνακας 6-3 και Πίνακας 6-4). Με κόκκινο χρώμα τονίζονται τα ζεύγη πόλων και μηδενιστών του μοντέλου 2^{ης} τάξης που επιλέγεται.

Πίνακας 6-3. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την ARX (IC).

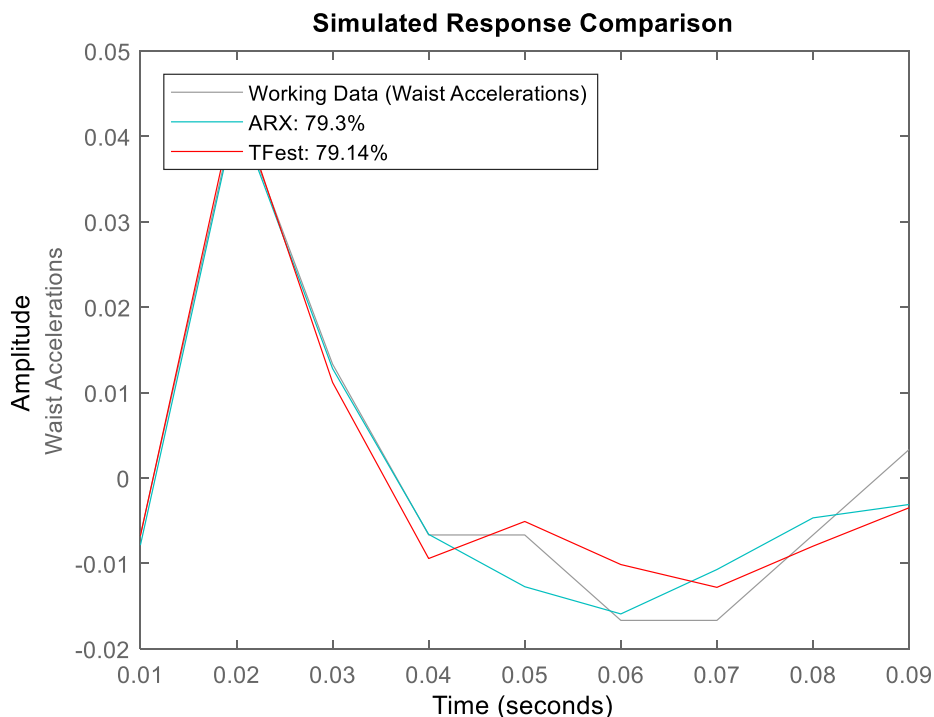
Πόλοι	Μηδενιστές			
	0	1	2	3
1	4,22	32,22	0,00	0,00
2	61,23	79,38	80,46	0,00
3	71,73	80,00	94,40	-

Πίνακας 6-4. Ποσοστά προσαρμογής % συναρτήσεων μεταφοράς διαφορετικού αριθμού πόλων και μηδενιστών για την TFest (IC).

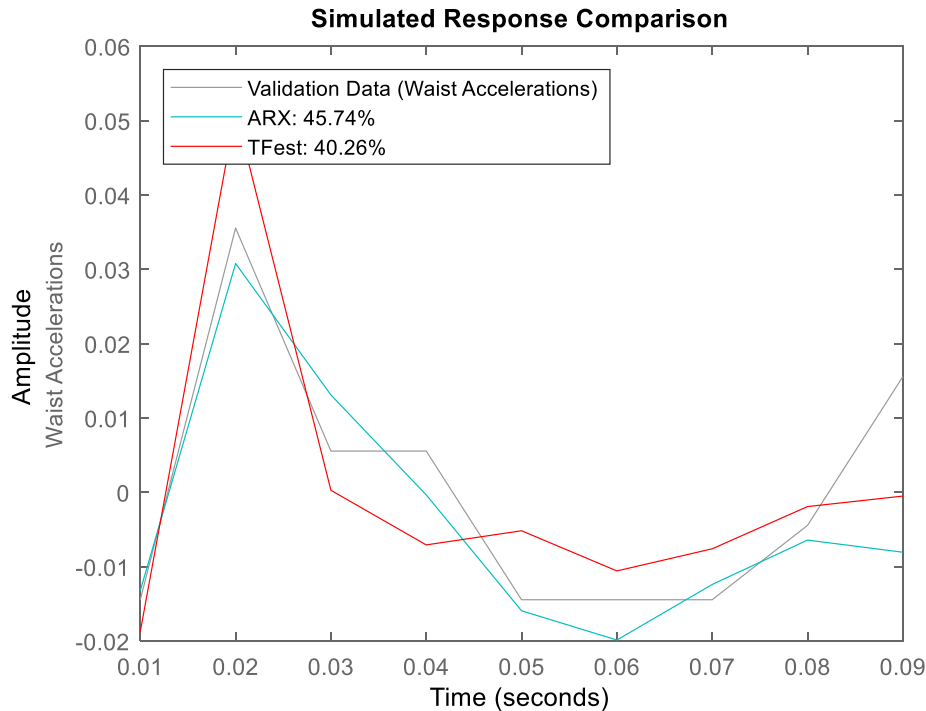
Πόλοι	Μηδενιστές			
	0	1	2	3
1	59,98	65,02	0	0
2	63,63	67,37	79,14	0,00
3	76,18	83,01	64,44	65,74

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι το απλοποιημένο μοντέλο 2^{ης} τάξης που επιλέχθηκε για την μοντελοποίηση της κρούσης του ποδιού με το έδαφος, παρουσιάζει κι εδώ ένα αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό προσαρμογής και στις δυο συναρτήσεις αναγνώρισης, με την ύπαρξη δύο πόλων και δύο μηδενιστών στη συνάρτηση μεταφοράς.

Οι γραφικές συγκρίσεις μεταξύ της εξόδου του ζεύγους Working Data και Validation Data σε σχέση με τις εξόδους που προκύπτουν από τις συναρτήσεις μεταφοράς που επιλέχθηκαν παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 6-19 και Σχήμα 6-20 αντίστοιχα).



Σχήμα 6-19. Σύγκριση εξόδου ζεύγους Working Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (IC).



Σχήμα 6-20. Σύγκριση εξόδου ζεύγους Validation Data με τις εξόδους των εκτιμώμενων συναρτήσεων μεταφοράς για σύστημα 2^{ης} τάξης με δυο πόλους και δυο μηδενιστές (IC).

Από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα, προκύπτει ότι και οι δυο συναρτήσεις μεταφοράς, ενώ ικανοποιούν σε μεγάλο βαθμό τα Working Data, χάνουν σχεδόν εξίσου σε ποσοστό προσαρμογής κατά την εφαρμογή τους στα Validation Data, χωρίς όμως να λαμβάνει το estimation fit απαγορευτικές τιμές. Για το λόγο αυτό θα παρατεθούν οι συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν κι από τις δύο μεθόδους.

Η πρώτη συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου TFest (6-7).

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{0.02715s^2 + 8.11s - 117.1}{s^2 + 111s + 0.004037} \quad (6-7)$$

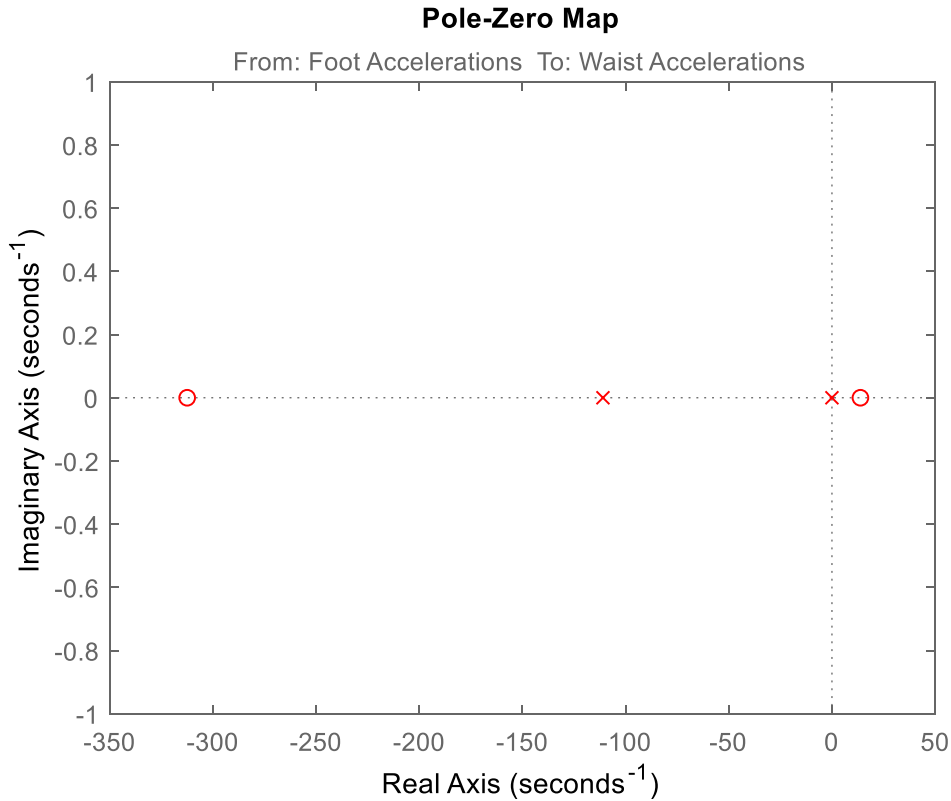
Η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς είναι συνεχούς χρόνου και έχει δυο πόλους και δυο μηδενιστές, που απεικονίζονται στο Σχήμα 6-21. Σε αντίθεση με πριν, οι αρνητικοί όροι στον αριθμητή έχουν πλέον εξαφανιστεί. Η συνάρτηση μεταφοράς αυτή είναι οριακά ευσταθής, λόγω της ύπαρξης πόλου στον φανταστικό άξονα. Επίσης, είναι εμφανές ότι ο ένας πόλος και ο ένας μηδενιστής απέχουν πολύ από τους πρώτους που βρίσκονται κοντά στο μηδέν.

$$\text{Πόλοι} = \begin{cases} -110.97 \\ -3.64 \times 10^{-5} \end{cases} \quad \text{Μηδενιστές} = \begin{cases} -312.45 \\ 13.8 \end{cases} \quad (6-8)$$

Επίσης, η ιδιοσυχνότητα ω_n και ο συντελεστής απόσβεσης ζ της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$\omega_n = \begin{cases} 3.64 \times 10^{-5} \\ 110.97 \end{cases} \text{ rad / s} \quad \zeta_1 = \zeta_2 = 1 \quad (6-9)$$

Επομένως, πρόκειται για μια ταλάντωση με κρίσιμη απόσβεση.



Σχήμα 6-21. Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς Συνεχούς Χρόνου 2^{ης} τάξης κατά την αρχική επαφή (Initial Contact) του ποδιού με το έδαφος (x=πόλοι, ο= μηδενιστές).

Η δεύτερη συνάρτηση μεταφοράς, προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου Arx (6-10).

$$H(z^{-1}) = \frac{0.03033 - 0.008958z^{-1}}{1 - 0.7101z^{-1} + 0.4212z^{-2}} \quad (6-10)$$

Η ίδια συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$H(z) = \frac{0.03033z^2 - 0.008958z}{z^2 - 0.7101z + 0.4212} \quad (6-11)$$

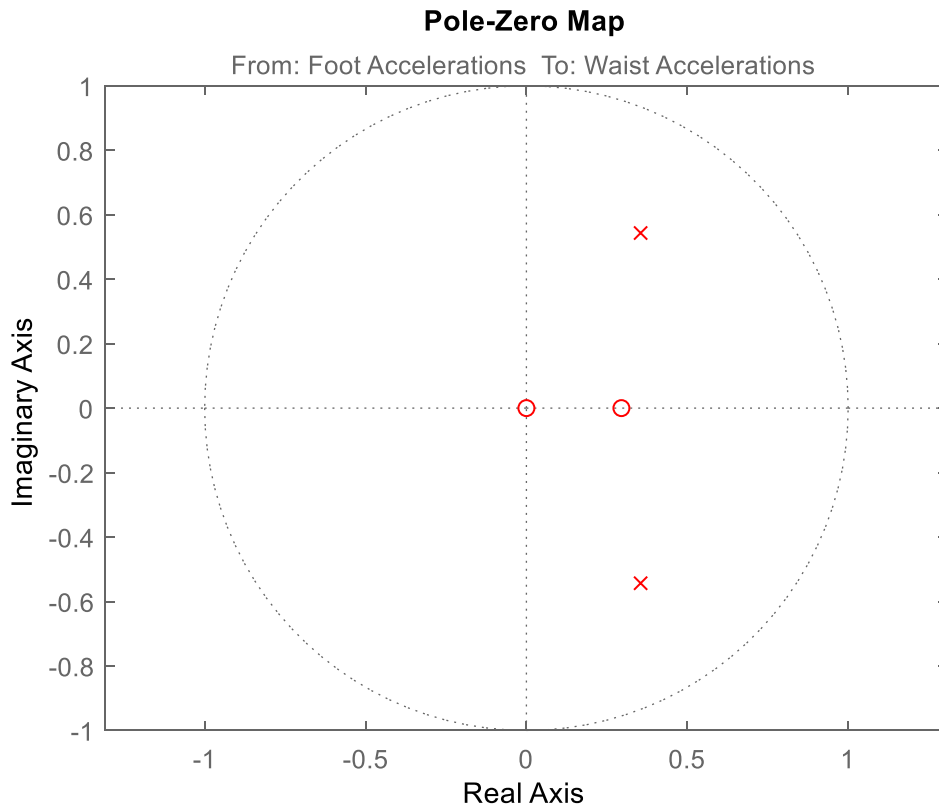
Πρόκειται για μια συνάρτηση μεταφοράς διακριτού χρόνου, δειγματοληψίας Ts= 0.01s με δυο πόλους και δυο μηδενιστές, οι οποίοι απεικονίζονται στο Σχήμα 6-22. Είναι μια ευσταθής συνάρτηση μεταφοράς, αφού οι πόλοι βρίσκονται εντός του μοναδιαίου κύκλου.

$$\text{Πόλοι} = 0.35 \pm 0.54i \quad \text{Μηδενιστές} = \begin{cases} 0 \\ 0.29 \end{cases} \quad (6-12)$$

Επίσης, η ιδιοσυχνότητα ω_n και ο συντελεστής απόσβεσης ζ της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$\omega_{n,1} = \omega_{n,2} = 108.21 \text{ rad / s} \quad \zeta_1 = \zeta_2 = 0.4 \quad (6-13)$$

Επομένως, πρόκειται για μια υπο-αποσβαινούμενη ταλάντωση.



Σχήμα 6-22. Πόλοι και Μηδενιστές της Συνάρτησης Μεταφοράς Διακριτού Χρόνου 2^{ης} τάξης κατά την αρχική επαφή (Initial Contact) του ποδιού με το έδαφος (x=πόλοι, o= μηδενιστές).

Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν είναι και σε αυτήν την ενότητα προσεγγιστικές και παρατίθενται κυρίως για λόγους υπόδειξης μεθοδολογίας. Όπως και στην Ενότητα 6.2.1, η χαμηλή δειγματοληψία σε συνδυασμό με την επιλογή της συγκεκριμένης φάσης του βαδίσματος, οδηγεί σε πολύ χαμηλό αριθμό δεδομένων για τις μεθόδους εκτίμησης που χρησιμοποιούνται, γεγονός που ίσως να οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Επίσης, είναι αδύνατο με μόλις 9 μετρήσεις να εκτιμηθούν συστήματα μεγαλύτερων τάξεων. Παρ'όλα αυτά, οι δυο συναρτήσεις μεταφοράς που εκτιμήθηκαν αποτελούν μια αρκετά ρεαλιστική προσέγγιση στην μοντελοποίηση του ποδιού κατά την κρούση με το έδαφος στη φάση της αρχικής επαφής (IC).

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Σε αυτήν την εργασία υλοποιήθηκε μια πρότυπη πειραματική διάταξη για τη λήψη και αποθήκευση μετρήσεων κατά το ανθρώπινο βάδισμα, καθώς επίσης και αλγόριθμοι για την επεξεργασία και ανάλυσή τους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση των συμπερασμάτων που αφορούν στη λειτουργία της διάταξης αυτής και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και προτείνονται κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για βελτίωση και περαιτέρω εργασία.

7.1 Συμπεράσματα

Σε ότι αφορά το τεχνολογικό κομμάτι, η χρήση των ασύρματων αισθητήριων συσκευών της Dialog Semiconductors, ανέδειξε την ευκολία που παρέχει η τεχνολογία αυτή στη λήψη μετρήσεων επιτάχυνσης και γωνιακής ταχύτητας. Το πρωτόκολλο BLE συντελεί στην πολύ χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση αυτών των συσκευών καθιστώντας την πειραματική διάταξη ενεργειακά αυτόνομη, ικανή να λειτουργεί χωρίς αλλαγή μπαταριών για πολλές ώρες. Επίσης, η χρήση των μπαταριών coin cell οδηγεί σε ελαφριά κατασκευή, καθιστώντας τους αισθητήρες αυτούς ιδανικούς για χρήση σε μη επεμβατική δειγματοληψία για τη μελέτη του ανθρώπινου βαδίσματος. Σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης είναι η ασύρματη λειτουργία της, η οποία ενισχύει τη φορητότητα των συσκευών επιτρέποντας τη διεξαγωγή πειραμάτων και έξω από τα αυστηρά όρια του εργαστηρίου. Τέλος, στη φορητότητα και διευκόλυνση των πειραμάτων συμβάλλει καθοριστικά και το εξαιρετικά μικρό μέγεθος των συσκευών αυτών. Μειονέκτημα αποτελεί ο περιορισμός δειγματοληψίας σε συχνότητες μέχρι 100 Hz, καθιστώντας αδύνατη την καταγραφή και μελέτη συμβάντων υψηλότερων συχνοτήτων. Επίσης, ο τρόπος της χρονικής οργάνωσης των μετρήσεων στο επίπεδο της συσκευής, δυσχεραίνει την περαιτέρω ερμηνία, συγχρονισμό και ανάλυση των δεδομένων.

Η διάταξη πρόσδεσης των συσκευών στο χρήστη αποδείχτηκε εύκολη στην κατασκευή και στη χρήση καθώς και στην προσαρμογή της σε διάφορα μεγέθη παπουτσιών και μέσης. Ο μη ενδοτικός σχεδιασμός δεν αλλοίωσε την ποιότητα των μετρήσεων, ενώ η ελαστικότητα του συστήματος πρόσδεσης δεν ήταν παρεμβατική στη φυσικότητα κίνησης του χρήστη. Παρατηρήθηκε όμως ότι σε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, η πρόσδεση άρχισε να χαλαρώνει.

Η εφαρμογή του κινητού τηλεφώνου παρουσιάζει αυξημένο τεχνολογικό ενδιαφέρον καθώς επικοινωνεί ταυτόχρονα με τρεις ασύρματες συσκευές IMU σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, η διεπαφή με το χρήστη είναι απλή και κατανοητή επιτρέποντας τη χρήση από τον οποιονδήποτε. Παρ'όλα αυτά, παρουσιάζει ενίοτε κάποια σφάλματα, όπως το πάγωμα κατά τη λήψη των μετρήσεων και την πτώση της συχνότητας δειγματοληψίας.

Κλείνοντας το τεχνολογικό κομμάτι της εργασίας, και οι δυο βάσεις δεδομένων που εξετάστηκαν κρίθηκαν αποτελεσματικές και εύκολες στη λειτουργία τους. Η InfluxDB μπορεί να λειτουργεί χωρίς κόστος, αρκετά γρήγορα και αξιόπιστα. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα της διαγραφής μετρήσεων με ίδιο χρονικό στίγμα, γεγονός που αύξησε την περιπλοκότητα του κώδικα της εφαρμογής του κινητού. Επίσης, η λειτουργία της απαιτεί συνήθως την εγκατάσταση επιπλέον λογισμικού για να λειτουργήσει σε παράλληλο λειτουργικό σύστημα. Ακόμη, ως σχεσιακή βάση δεδομένων, απαιτεί προκαθορισμό των πινάκων εισαγωγής δεδομένων σε αυτήν. Από την άλλη, η MongoDB είναι μια

βάση δεδομένων τελευταίας τεχνολογίας, που λειτουργεί σε διαδικτυακό διακομιστή και που είναι ικανή να λαμβάνει και να αποθηκεύει οποιουδήποτε είδους και δομής δεδομένων, δίχως να απαιτεί κανέναν προκαθορισμό. Το μόνο της μειονέκτημα είναι ότι καθώς απαιτεί πληρωμή για τη χρήση της, η δοκιμαστική της χρήση δεν ήταν επαρκής για την ικανοποίηση των αναγκών της παρούσης εργασίας.

Σε ότι αφορά το κομμάτι της επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων, το μεγαλύτερο εμπόδιο αποτέλεσε η ανεπαρκής συχνότητα δειγματοληψίας και ο προβληματικός συγχρονισμός των μετρήσεων. Παρ'όλα αυτά, οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν πέτυχαν τον ικανοποιητικό συγχρονισμό. Ο ευριστικός αλγόριθμος για την ανάλυση των φάσεων του βαδίσματος απέδωσε ορθά αποτελέσματα σε πλήρη αντιστοιχία με τις βιβλιογραφικές αναφορές. Η πλήρης αυτοματοποίηση της ανάλυσης, την καθιστά εύχρηστη από οποιονδήποτε και συνδυαζόμενη με την online ανάκτηση δεδομένων, μπορεί να αποτελέσει ένα τελικό προϊόν ανάλυσης πραγματικού χρόνου. Η ανάλυση των δεδομένων οδήγησε στην αναγνώριση του συστήματος, ανάλογα με την επιθυμητή του τάξη. Παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερης τάξης συστήματα είναι ικανά να περιγράψουν με ακρίβεια τη δυναμική του βαδίσματος, ενώ μικρότερης τάξης συστήματα είναι ικανά να περιγράψουν μικρό ποσοστό κάθε φορά του κύκλου βαδίσματος. Μια επαλληλία τέτοιων συστημάτων θα μπορούσε να περιγράψει τον κύκλο βαδίσματος στο σύνολό του και να οδηγήσει στο σχεδιασμό ενός τεχνητού μέλους με μεταβλητή ενδοτικότητα. Εξ'αιτίας της χαμηλής δειγματοληψίας και του μικρού αριθμού μετρήσεων που περιλαμβάνονται στη φάση του βαδίσματος που μελετήθηκε ως παράδειγμα, δεν επιτεύχθηκε μεγάλη αξιοπιστία στην εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς. Κάποια αποτελέσματα των Ενοτήτων 6.2.1 και 6.2.2 δε φαίνονται σωστά, με την Εξίσωση (6-4) να έχει μηδενιστές στο δεξί ημιεπίπεδο χωρίς ιδιαίτερο νόημα και με την Εξίσωση (6-7) να περιγράφει ουσιαστικά μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης και με πόλους που μπορούν να αγνοηθούν. Αυτό θα μπορούσε να διορθωθεί είτε με τη χρήση αισθητήρων υψηλότερης δειγματοληψίας είτε με λήψη μετρήσεων απο πιο αργό βάδισμα.

Τελικά, στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη και ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία από το στάδιο της λήψης μετρήσεων έως και τον αναλυτικό χαρακτηρισμό του βαδίσματος.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Όπως προαναφέρθηκε, κάποια σημεία της διαδικασίας χρήζουν βελτίωσης.

Αρχικά, θα μπορούσε να γίνει χρήση αισθητήρων υψηλότερης δειγματοληψίας, χωρίς να επηρεαστεί η υπόλοιπη διαδικασία ή να ληφθούν μετρήσεις σε ακόμη χαμηλότερες ταχύτητες βαδίσματος.

Επιπλέον, η εφαρμογή του κινητού τηλεφώνου μπορεί να βελτιωθεί με την ανάπτυξη πιο εύρωστου κώδικα. Επίσης, για να γίνει πιο προσβάσιμη αλλά και πιο αποδοτική, θα πρέπει να παρακαμφθεί η πλατφόρμα του EnoThings, και οι αντίστοιχες λειτουργίες να εκτελούνται από ενιαίο κώδικα σε java.

Στο κομμάτι της αναγνώρισης των φάσεων του κύκλου βადίσης, τα αναγνωρισμένα γεγονότα του αριστερού ποδιού θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην αναγνώριση ακόμη περισσότερων φάσεων για το δεξί πόδι, με σκοπό την πλήρη διακριτοποίηση των φάσεων του κύκλου βαδίσματος.

Όσον αφορά στην αναγνώριση του συστήματος, θα μπορούσε να αναγνωριστεί το μέσο βήμα που προκύπτει από πολλά βήματα, με αποτέλεσμα την ύπαρξη περισσότερων μετρήσεων στην ανάλυση. Επίσης, θα πρέπει να γίνει πιο ενδελεχής ανάλυση πόλων και μηδενιστών με απόρριψη αυτών που δεν έχουν νόημα για τη συνάρτηση μεταφοράς (για παράδειγμα τους πόλους που βρίσκονται πολύ πιο μακριά από το μηδέν σε σχέση με τους πλησιέστερους). Επίσης, θα μπορούσε να υλοποιηθεί επιπρόσθετα ένας αλγόριθμος εύρεσης παραμέτρων, για πιο συγκεκριμένη και αυτοματοποιημένη εύρεση των συντελεστών K και B του απλοποιημένου μοντέλου που περιγράφεται στην Εξίσωση (2-1).

Τέλος, η όλη επεξεργασία και ανάλυση θα μπορούσε να εκτελείται από ένα ενιαίο πρόγραμμα, χωρίς τη χρήση Matlab, ή και από μια No-SQL βάση δεδομένων σε επίπεδο Big Data. Κάτι τέτοιο, θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση ενός συστήματος μαζικής καταγραφής δεδομένων για το ανθρώπινο βόδισμα, με τελικό στόχο την ακριβή περιγραφή του και τη συμβολή στην ανάπτυξη τεχνητών μελών.

8 Βιβλιογραφία

- [1] Aghasadeghi, N., Zhao, H., Hargrove, L.J., Ames, A.D., Perreault, E.J., Bretl, T., “Learning Impedance Controller Parameters for Lower-Limb Prostheses”, *IEEE*, 2013.
- [2] Ashton, K., "That 'Internet of Things' Thing", *RFID Journal* (22), 2009, pp.97-114.
- [3] Auvinet, B., Berrut, G., Touzard, C., Moutel, L., Collet, N., Chaleil, D., Barrey, E., “Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device”, Elsevier, 2002.
- [4] Bertos, G.A., “Identification of the Mechanical Impedance of the Human Locomotor System and Quantification of Shock Absorption Characteristics: with Applications in Prosthetics”, *PhD - Field of Biomedical Engineering*, Northwestern University - Evanston, Illinois 2006.
- [5] Bertos, G.A., Childress, D.S., Gard, S.A., “The vertical mechanical impedance of the locomotor system during human walking with applications in rehabilitation”, *9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR '05)*, Chicago, USA, 2005, pp.380-383.
- [6] Bertos, G.A., Childress, D.S., Gard, S.A., “Mechanical impedance identification of the human locomotor system during able-bodied walking”, *American Society of Biomechanics Conference*, Toledo, OH, 2003.
- [7] Butler, R.J., Crowell, H.P., Davis, I.M., “Lower extremity stiffness: implications for performance and injury”, *Clinical Biomechanics* 18(6), 2003, pp.511–7.
- [8] Farley, C.T., Houdijk, H.P., Van Strien, C., Louie, M., “Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses”, *Journal of Applied Physiology*, 85(3), 1998, pp.1044-1055.
- [9] Fraden,J., “Handbook of Modern Sensors (Physics, Designs and Applications)”, Fourth Edition, Springer Science + Business Media, LLC 2010.
- [10] Fu, C., Suzuki, Y., Kiyono, K., Morasso, P., Nomura, T., “An intermittent control model of flexible human gait using a stable manifold of saddle-type unstable limit cycle dynamics”, *Journal of the Royal Society*, 11, 2014.
- [11] Gainer A., “Leg, vertical, and joint stiffness levels in rear foot and fore-foot strike landings”, *Georgia Institute of Technology*, 2014.
- [12] Gard, S.A., Childress, D.S., “An investigation of shock-absorbing prosthetic components” , *VA Chicago Health Care System, Lakeside Division*, 2000.
- [13] Hendricks, Drew. "The Trouble with the Internet of Things". London Datastore. Greater London Authority. Retrieved 10 August 2015
- [14] Hobara, H., Inoue, K., Omuro, K., Muraoka, T., Kanosue, K., “Determinant of leg stiffness during hopping is frequency-dependent”, *Eur J Appl Physiol* 111, 2011, pp.2195–2201.
- [15] Hogan, N., Sternad, D., “Dynamic primitives in the control of locomotion”, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7(71), 2013.
- [16] IoT-GSI, "Internet of Things Global Standards Initiative", *ITU*, 2015.
- [17] Istepanian, R., Hu, S., Philip, N., Sungoor, A., "The potential of Internet of m-health Things "m-IoT" for non-invasive glucose level sensing". *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2011.

- [18] Jasiewicz, J.M., Allum, J.M., Middleton, J.W., Barriskill, A., Condie, P., Purcell, B., Che Tin Li, R., "Gait event detection using linear accelerometers or angular velocity transducers in able-bodied and spinal-cord injured individuals", *Elsevier*, 2005.
- [19] Kuo, P., Wang, L., Wang, S., "Leg stiffness changes in drop jumps with different stretch amplitude", *ISBS, Caceres - Extremadura – Spain*, 2002, pp.378-380.
- [20] Martin-Felez, R., Mollineda, R., Sanchez, S., "Human Recognition Based on Gait Poses", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011.
- [21] McMahon, T.A., "Muscles, Reflexes, and Locomotion", *Princeton University Press*, 1984.
- [22] McMahon, T.A., Cheng, G.C., "The mechanics of running: how does stiffness couple with speed?", *J.Biomechanics*, Vol. 23, 1990, pp. 65-78.
- [23] Mijailovic, N., Gavrilovic, M., Rafajlovic, S., "Gait Phases Recognition from Accelerations and Ground Reaction Forces: Application of Neural Networks", *Telfor Journal*, Vol. 1, No. 1, 2009.
- [24] Mrdakovic, V., Ilic, D., Vulovic, R., Matic, M., Jankovic, N., Filipovic, N., "Leg stiffness adjustment during hopping at different intensities and frequencies", *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 16, No. 3, 2014.
- [25] Nihtianov, S., Luque, A., "Smart sensors and MEMS (Intelligent devices and microsystems for industrial Applications)", *Woodhead Publishing Limited*, 2014.
- [26] Perry, J., "Gait Analysis: Normal and Pathological Function", *SLACK Inc*, 1992.
- [27] Pham, M.T., Gautier, M., Poignet, P., "Accelerometer based identification of mechanical systems", *IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington DC*, 2002, pp.4293-4298.
- [28] Reda, C., "Can we expect the Internet of Things in healthcare?", *IoT Agenda*, 2016.
- [29] Sabanovic, A., Ohnishi, K., "Motion Control Systems", *IEEE*, 2011.
- [30] Siegler, S., Seliktar, R., & Hyman, W., "Simulation of human gait with the aid of a simple mechanical model", *Journal of Biomechanics*, 15(6), 1982, pp.415-425.
- [31] Struzik, A., Zawadki, J., "Leg stiffness during phases of countermovement and take-off in vertical jump", *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 15, No. 2, 2013.
- [32] Tao, W., Liu, T., Zheng, R., Feng, H., "Gait Analysis Using Wearable Sensors", *Sensors*, 12, 2012, pp.2255-2283.
- [33] Thang, H.M., Viet, V.Q., Thuc, N.D., Choi, D., "Gait Identification Using Accelerometer on Mobile Phone", *IEEE*, 2012.
- [34] Tilelyioğlu, E., Yilmaz, A., "Application of Neural Based Estimation Algorithm for Gait Phases of Above Knee Prosthesis", *IEEE*, 2015.
- [35] Viksten, F., "On the use of an accelerometer for identification of a flexible manipulator", *Linköping University, Sweden*, 2001.
- [36] Wang, Z., Zhao, H., Qiu, S., Gao, Q., "Stance-Phase Detection for ZUPT-Aided Foot-Mounted Pedestrian Navigation System", *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, VOL. 20, NO. 6, 2015, pp.3170-3181.
- [37] Zhang, L.Q., Xu, X., Makhsous, M., Fang, L., "Stiffness and viscous damping of the human leg", *The American Society of Biomechanics*, 2000.

- [38] Zhao, H., Kolathaya, S., Ames, A.D., “Quadratic Programming and Impedance Control for Transfemoral Prosthesis”, IEEE, 2014.

Ιστότοποι

- [39] <http://www.bbclub.gr>
- [40] <https://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>
- [41] https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems
- [42] <https://el.wikipedia.org/wiki/MySQL>
- [43] https://en.wikipedia.org/wiki/Right-hand_rule
- [44] <https://github.com/influxdata/influxdb>
- [45] https://www.gsmarena.com/motorola_moto_g5_plus-8453.php
- [46] <https://highlyscalable.wordpress.com/2012/03/01/nosql-data-modeling-techniques>
- [47] <https://www.iconfinder.com>
- [48] <https://www.mathworks.com/help/ident/gs/about-system-identification.html>
- [49] <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/arx.html>
- [50] <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html>
- [51] <http://mathworld.wolfram.com/Right-HandRule.html>
- [52] <https://www.mongodb.com/nosql-explained>
- [53] https://www.pcb.com/testmeasurement/accelerometers/Sensing_Technologies
- [54] <https://physicsandroid.wordpress.com>
- [55] <http://physics.rutgers.edu/~aatish/teach/srr/workshop3.pdf>
- [56] <http://searchsqlserver.techtarget.com/definition/relational-database>
- [57] <http://searchsqlserver.techtarget.com/definition/SQL>

Τεχνικά εγχειρίδια

- [58] IoT-CS-v1.0
- [59] M-B-030
- [60] UM-B-048 DA1458x Getting started with Development Kit - Basic_v1.1
- [61] UM-B-051 DA1458x Software Platform Reference v1.0
- [62] UM-B-063_DA14583_IoT_sensor_development_kit_1v1

9 Παράρτημα Α: «Κώδικες»

Οι κώδικες της εφαρμογής του κινητού τηλεφώνου και της ανάλυσης στο Matlab παρατίθενται στο επισυναπτόμενο cd που συνοδεύει την παρούσα εργασία.