



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών
Εργαστήριο Επεξεργασίας Πληροφορίας και Υπολογισμών

Υλοποίηση συστήματος εντοπισμού θέσης σε
εσωτερικό χώρο με χρήση αισθητήρων κινητού
τηλεφώνου, προς εξαγωγή πληροφοριών
επισκεψιμότητας τοποθεσιών

Διπλωματική Εργασία
του
Μηνά Κοσμίδη
ΑΕΜ: 9008

Επιβλέπων: Ανδρέας Συμεωνίδης
Καθηγητής Α.Π.Θ.
Συνεπιβλέπων: Εμμανουήλ Τσαρδούλιας
Ερευνητής Α.Π.Θ.

Περίληψη

Το πρόβλημα του εντοπισμού θέσης είναι ένα από τα πιο συχνά προβλήματα που ασυνείδητα καλείται να λύσει ένας άνθρωπος μέσα στην καθημερινότητά του. Για παράδειγμα, από την περιήγηση σε μια πόλη του εξωτερικού, στη αναζήτηση βέλτιστων διαδρομών για την αποφυγή κίνησης, μέχρι και την εύρεση της εξόδου ενός μεγάλου εμπορικού κέντρου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση της θέσης του σε σχέση με τον χώρο ενδιαφέροντός του, είτε ο χώρος απαρτίζεται από έναν δρόμο, έναν όροφο κτηρίου ή ακόμα και μια ολόκληρη πόλη. Αυτή η ανάγκη οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνολογιών εύρεσης θέσης των οποίων οι εφαρμογές κυμαίνονται από εντοπισμό θέσης παγκοσμίου βεληνεκούς με ακρίβεια κάποιων μέτρων (Global Positioning System (GPS)) έως κάλυψη χώρου εργασίας με ακρίβεια κάτω του εκατοστού (π.χ Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)).

Η μεγαλύτερη πρόκληση με τις εφαρμογές εύρεσης θέσης εσωτερικού χώρου (Indoors Positioning System (IPS)) είναι πως σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου όπου εξειδικευμένα συστήματα εντοπισμού, όπως το GPS, στερούνται ακρίβειας ή αποτυγχάνουν πλήρως, εμφανίζεται η ανάγκη ανάπτυξης εφαρμογών που βασίζονται σε ακριβούς αισθητήρες (π.χ χρήση LiDAR για ρομποτικές διατάξεις) ή σε ειδικά προσαρμοσμένες διατάξεις (π.χ. Wi-Fi - based solutions, Camera - based solutions). Όμως, χάρη στην ραγδαία ανάπτυξη των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones) σε συνδυασμό με το πλήθος των εξελιγμένων αισθητήρων που παρέχουν, οι κινητές συσκευές αποτελούν ιδανικό μέσο για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος δίνοντας τη δυνατότητα μιας οικονομικής και με πολλές προοπτικές λύσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη μιας offline, αυτοματοποιημένης και ανεξάρτητης από εξωτερικές διατάξεις εφαρμογής smartphone η οποία δίνει την δυνατότητα στον χρήστη, κρατώντας την κινητή συσκευή μπροστά του, να πλοηγείται εντός του χώρου ενδιαφέροντος του. Η εφαρμογή αυτή συλλέγει τα δεδομένα από το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο, τα επεξεργάζεται και εμφανίζει την θέση του χρήστη μέσα στον αντίστοιχο χάρτη στην οθόνη σε πραγματικό χρόνο. Η λειτουργική δομή της εφαρμογής χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα, της πλοήγησης (navigation) και της εύρεσης θέσης του χρήστη (localization). Η λειτουργία της πλοήγησης βασίζεται σε μια μέθοδο Pedestrian Dead Reckoning (PDR) για την αναγνώριση βημάτων και περιστροφών του χρήστη κατά την βάδισή του. Στο τμήμα του localization χρησιμοποιείται ένα Φίλτρο Σωματιδίων (Particle Filter) το οποίο αξιοποιεί την πληροφορία του εσωτερικού χώρου από τον αντίστοιχο χάρτη πληρότητας και τα αποτέλεσματα της φάσης της πλοήγησης, συνδυάζοντάς τα και υπολογίζοντας την τελική εκτιμήτρια θέση και κατεύθυνση του χρήστη σε σχέση με χώρο ενδιαφέροντος.

Η ολοκληρωμένη μορφή των αλγορίθμων και της εφαρμογής χρήστη, διαμορφώθηκαν μέσω μιας σειράς πειραμάτων ελέγχου της ορθής λειτουργίας τόσο των επιμέρους μεθόδων όσο και της ολοκληρωμένης εφαρμογής. Επίσης τα αντίστοιχα πειράματα προσπαθούν να καλύψουν ένα ικανοποιητικό σύνολο περιπτώσεων χρήσης (use cases) με στόχο την αξιολόγηση των αλγορίθμων.

Ο σχεδιασμός της εφαρμογής σε επίπεδο χρήστη είχε ως βασικό γνώμονα να την καθιστά εύχρηστη και απλούστερη ενώ παράλληλα να παρέχει την δυνατότητα επιπλέον βοηθητικών

λειτουργιών. Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε με την βοήθεια της πλατφόρμας Expo Go σε προγραμματιστικό περιβάλλον JavaScript και React Native.

Title

Implementation of an indoor positioning system for area classification, using mobile phone sensors

Abstract

Localization is one of the most common problems that people unconsciously have to solve in their daily lives. For example, from wandering in a foreign city, to finding the best route to avoid traffic or the exit of a large shopping centre, knowing one's position in relation to the area of interest, whether the area consists of a street, a floor of a building or even a whole city, is a prerequisite. This need has led to the development of positioning technologies whose applications range from global positioning with an accuracy of a few meters (e.g. Global Positioning System (GPS)) to covering a workspace with an accuracy of less than a centimeter (e.g. Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)).

The biggest challenge with Indoors Positioning System (IPS) applications is that in an indoor environment where specialized positioning systems, such as GPS, lack accuracy or fail completely, reliability on accurate and expensive sensors (e.g. use of LiDAR for robotic devices) or on specially adapted devices (e.g. Wi-Fi - based solutions , Camera - based solutions) is required. However, thanks to the rapid growth of smartphones, combined with the multitude of sophisticated sensors they provide, they constitute the ideal medium to overcome these aforementioned problems, creating the potential for an economical solution with many perspectives.

The specific thesis deals with the development of an offline, autonomous and automated smartphone application that enables the user to navigate within his area of interest, by holding the mobile device in front of them. This application collects data from the accelerometer and gyroscope, processes it and displays the user's position within the corresponding map on the screen in real time. The functional structure of the application is divided into two main parts, the navigation part and the localization part. The navigation function is based on a PDR method for recognizing the user's steps and rotation. In the localization part, a Particle Filter which utilizes the indoor space information from the corresponding occupancy map is used which combines the spatial data with the results of the navigation component in order to calculate the final estimated pose of the user with respect to the space of interest.

The individual modules as well as the user application, were validated through a series of experiments ensuring the proper functionality of each module within the application. The respective experiments also attempt to cover a sufficient set of use cases to evaluate the functionality of the comprehensive application.

The design of the application at user level was based on creating a convenient and practical application while providing additional auxiliary functions. The application was developed using the Expo Go platform in a JavaScript and React Native programming environment.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται και ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Α.Π.Θ. Αρχικά, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ τους γονείς μου Δαμιανό και Ειρήνη, καθώς και τον μεγάλο μου αδερφό Αντώνη, που με στηρίζανε με όλους του δυνατούς τρόπους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και μου συμπαραστάθηκαν σε όλες τις δυσκολίες και τις προκλήσεις που αντιμετώπισα, δείχνοντάς μου την αγάπη τους και την πίστη τους σε μένα να πραγματοποιήσω τα όνειρά μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Συμεωνίδη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, αναθέτοντας μου την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τον Ερευνητή του τμήματος Δρ. Εμμανουήλ Τσαρδούλια για την υπομονή, την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και την τεράστια βοήθεια που μου έδωσε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συνοδοιπόρους που με στήριξαν ανελλιπώς κατά την διάρκεια αυτού του ταξιδιού και που στόλισαν τα φοιτητικά μου χρόνια γεμάτο όμορφες και ξεχωριστές στιγμές.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	7
1.1 Περιγραφή προβλήματος	8
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής	9
1.3 Διάρθρωση	9
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	11
2.1 Αισθητήρες έξυπνων τηλεφώνων (Smartphones)	11
2.1.1 Γυροσκόπιο	12
2.1.2 Επιταχυνοσιόμετρο	12
2.2 Ανθρώπινο βάδισμα	13
2.3 Επεξεργασία δεδομένων	14
2.3.1 Κινητός Μέσος Όρος	14
2.3.2 Σταθμισμένος Μέσος Όρος	14
2.3.3 Quaternions	15
2.4 Occupancy Grid Mapping	17
2.5 Πίνακες σύγχυσης	18
2.6 Σύνθεση πληροφοριών Fusion	19
2.6.1 Pedestrian Dead Reckoning	20
2.6.2 Particle Filter	21
2.7 Υλοποίηση Εφαρμογής Χρήστη	21
2.7.1 Expo	21
2.7.2 Android Studio	22
3 Επισκόπηση Ερευνητικής Περιοχής	23
3.1 Εμπορικά συστήματα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο	23
3.2 Μέθοδοι και τεχνικές pedestrian dead reckoning	25
3.3 Εντοπισμός θέσης	26
3.3.1 Συνεισφορά εργασίας	27
4 Υλοποίηση	28
4.1 Αρχιτεκτονική Λογισμικού	28
4.1.1 Μετρήσεις αισθητήρων	29
4.2 Πλογήση με χρήση μεθόδου PDR	29
4.2.1 Προ-επεξεργασία Δεδομένων	30
4.2.2 ZEro Movement Update (ZEMU)	32
4.2.3 Zero Angular Rotation Update (ZARU)	33
4.2.4 Step Detection and UPdate (SDUP)	34
4.2.5 User Rotation Update (URU)	36

4.3	PF Localization	41
4.3.1	Χάρτες και δεδομένα	41
4.3.2	Ενημέρωση Βαρών	45
4.3.3	Επαναδειγματοληψία	47
4.4	Εφαρμογή Χρήστη	48
5	Πειραματικά Αποτελέσματα	53
5.1	Υποθέσεις και Παραδοχές	53
5.2	Πειράματα PDR	54
5.2.1	Εκτίμηση Μήκους Βήματος	54
5.2.2	Αξιολόγηση εκτίμησης αποστάσεων και περιστροφών χρήστη	54
5.3	Πειράματα PF	64
5.3.1	Πειράματα Επισκεψιμότητας	65
5.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	80
6	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	85
6.1	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων	85
6.2	Προβλήματα	86
6.3	Μελλοντικές επεκτάσεις	87
A'	Ακρωνύμια και συντομογραφίες	88

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Αισθητήρες Κίνησης Κινητού Τηλεφώνου [Πηγή]	11
2.2 Ο κύκλος βάδισης [Πηγή]	13
2.3 Περιγραφή ορολογίας του κύκλου βάδισης [Πηγή]	14
2.4 Κάθε 3D περιστροφή περιγράφεται από έναν άξονα περιστροφής και την γωνία περιστροφής γύρω από αυτόν τον άξονα [Πηγή]	16
2.5 Παράδειγμα διαμόρφωσης κελιών ενός χάρτη πληρότητας [Πηγή]	18
2.6 Πίνακας σύγχυσης δύο κλάσεων (Positive - Negative)	18
2.7 Για μια εφαρμογή PDR, είναι αρκετό ο χρήστης να κρατάει μπροστά του το smartphone	20
4.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος	28
4.2 Σύστημα συντεταγμένων κινητού τηλεφώνου. Για τις περιστροφές λαμβάνεται υπόψιν ο κανόνας του δεξιού χεριού.	30
4.3 Απεικόνιση παραλληλότητας μεταξύ συστημάτων κέντρο βάρους χρήστη και smartphone κατά την κίνηση, σύμφωνα με την παραδοχή ότι ο χρήστης κρατάει σταθερά μπροστά του την συσκευή	31
4.4 Στο σχήμα, με μπλε απεικονίζονται τα ακατέργαστα δεδομένα και με κόκκινο τα δεδομένα ΚΜΟ	32
4.5 Φιλτραρισμένα δεδομένα επιτάχυνσης με την διακύμανση αυτών (πάνω) και δεδομένα επιτάχυνσης εντός πεδίων κατάστασης κίνησης (κάτω)	33
4.6 Αρχιτεκτονική λειτουργίας SDUP	34
4.7 Εύρεση μέγιστων/ ελαχίστων για κάθε βήμα	36
4.8 Αρχιτεκτονική λειτουργίας URU	37
4.9 Φιλτραρισμένα μηνύματα γωνιακής ταχύτητας με την διακύμανση αυτών (πάνω) και δεδομένα γωνιακής ταχύτητας εντός πεδίων κατάστασης περιστροφής (κάτω)	38
4.10 Οπτικοποίηση εκτίμησης γωνίας περιστροφής	40
4.11 Ενδεικτικό παράδειγμα μετακίνησης του χρήστη εντός περιβάλλοντός χάρτη	42
4.12 Παραδείγματα δυαδικών χαρτών πληρότητας	43
4.13 Επεξεργασία χάρτη εργαστηρίου	44
4.14 Κατακερματισμός τοποθεσιών του χώρου του εργαστηρίου.	44
4.15 Προσεγγιστική απεικόνιση της κάτοψης και κατακερματισμού και αντίστοιχος πίνακας πληρότητας	45
4.16 Κατευθύνσεις εύρεσης εμποδίων	46
4.17 Διαδικασία επιλογής σωματιδίων. Το μέγεθος των τμημάτων είναι ίσο με το βάρος του αντίστοιχου σωματιδίου	48
4.18 Επιλογή χάρτη μέσω της εφαρμογής Inside-mApp	49
4.19 Εμφάνιση επιλεγμένου χάρτη και οθόνη λειτουργιών	50

4.20 Παράδειγμα χρήσης εφαρμογής Inside-mApp	52
5.1 Διαστάσεις γηπέδου μπάσκετ Πηγή	55
5.2 Διαδρομές γύρω από το μισό γήπεδο	55
5.3 Πείραμα 1ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής	56
5.4 Πείραμα 2ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής	57
5.5 Διαδρομές πάνω στη βασική γραμμή	58
5.6 Πείραμα 3ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής	58
5.7 Πείραμα 4ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής	59
5.8 Σύνθεση προηγούμενων πειραμάτων	60
5.9 Πείραμα 5ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής	61
5.10 Πείραμα 6ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής	62
5.11 Διαγράμματα σφαλμάτων	64
5.12 Ενδεικτικές διαδρομές πειραμάτων στο οικιακό περιβάλλον. Με πράσινο ορίζεται το σημείο εκκίνησης και με κόκκινο το σημείο τερματισμού .	66
5.13 Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	67
5.14 Πίνακες σύγχυσης 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	68
5.15 Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 1ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη [N, k]	69
5.16 Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	70
5.17 Πίνακες σύγχυσης 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	71
5.18 Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 2ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη [N, k]	72
5.19 Ενδεικτικές διαδρομές πειραμάτων στον χώρο του εργαστηρίου. Με πράσινο ορίζεται το σημείο εκκίνησης και με κόκκινο το σημείο τερματισμού .	73
5.20 Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	74
5.21 Πίνακες σύγχυσης 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	75
5.22 Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 1ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη [N, k]	76
5.23 Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	77
5.24 Πίνακες σύγχυσης 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη [N, k]	78
5.25 Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 2ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη [N, k]	79
5.26 Ραβδογράμματα συντελεστών απόδοσης πληροφοριών επισκεψιμότητας .	83

Κατάλογος Πινάκων

4.1 Μορφή δεδομένων αισθητήρων	29
4.2 Πίνακας σημαιών/παραμέτρων διαδικασίας SDUP	36
4.3 Πίνακας σημαιών/παραμέτρων διαδικασίας URU	40
4.4 Μορφή δεδομένων χάρτη	45
5.1 Υπολογισμός <i>K</i>	54
5.2 Πείραμα 1ο - Μήκος απόστασης	56
5.3 Πείραμα 1ο - Στροφές Χρήστη	56
5.4 Πείραμα 2ο - Μήκος απόστασης	57
5.5 Πείραμα 2ο - Στροφές Χρήστη	57
5.6 Πείραμα 3ο - Μήκος απόστασης	59
5.7 Πείραμα 3ο - Στροφές Χρήστη	59
5.8 Πείραμα 4ο - Μήκος απόστασης	60
5.9 Πείραμα 4ο - Στροφές Χρήστη	60
5.10 Πείραμα 5ο - Μήκος απόστασης	61
5.11 Πείραμα 5ο - Στροφές Χρήστη	62
5.12 Πείραμα 6ο - Μήκος απόστασης	63
5.13 Πείραμα 6ο - Στροφές Χρήστη	63
5.14 Μορφή καταγεγραμμένων δεδομένων	65
5.15 Συντελεστές πειραμάτων PF	65
5.16 Κατακερματισμός οικιακού χώρου	66
5.17 Κατακερματισμός χώρου εργαστηρίου	73
5.18 Συγκεντρωτικός πίνακας - Μήκος απόστασης	80
5.19 Συγκεντρωτικός πίνακας - Στροφές Χρήστη	81
5.20 Μετρικές αξιολόγησης πειραμάτων οικιακού χώρου	82
5.21 Μετρικές αξιολόγησης πειραμάτων στον χώρο του εργαστηρίου	83

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Δύο προβλήματα που έχουν απασχολήσει αρκετά την ερευνητική κοινότητα εδώ και πάρα πολλά χρόνια, είναι η χαρτογράφηση του χώρου στον οποίο ενεργούν άνθρωποι καθώς και η εύρεση της τοποθεσίας τους εντός του χώρου που ενεργούν. Τα δύο αυτά προβλήματα ουσιαστικά αποτελούν τις δύο όψεις του ίδιου νομίσματος.

Η χαρτογράφηση πραγματεύεται τον ορισμό ενός χώρου, όπου με δεδομένη μια αρχική θέση και προσανατολισμό, είναι δυνατή η απεικόνιση αυτού σύμφωνα με μια κλίμακα. Απόδειξη ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει απασχολήσει τους ανθρώπους από την αρχαιότητα, το γεγονός ότι, σύμφωνα με αρχαιολόγους, τα παλαιότερα σχέδια που έχουν ανακαλυφθεί και μπορούν να χαρακτηριστούν ως χάρτες χρονολογούνται στη 7η χιλιετία π.Χ¹. Η εμφάνιση της γεωμετρίας πυροδότησε μια σημαντική εξέλιξη στην δημιουργία χαρτών. Άλλωστε η λέξη “γεωμετρία” εγγενώς ετυμολογικά σημαίνει “μέτρηση της γης”. Κατά την ιστορία της ανθρωπότητας οι χάρτες της κάθε εποχής μπορούσαν και ξεπερνούσαν σε κλίμακα τους προγενέστερους τους, ξεκινώντας από τους πρώτους χάρτες επιπέδου οικισμών που ήταν χαραγμένοι σε πέτρα, φτάνοντας στους τυπωμένους σε χαρτί που απεικόνιζαν εμπορικούς δρόμους, και καταλήγοντας στο σήμερα με την πλέον επικρατέστερη μορφή των ψηφιακών χαρτών παγκοσμίου βεληνεκούς. Αξιοσημείωτο δε είναι το γεγονός ότι πλέον υπάρχουν στην διάθεσή μας ακόμα και διαγαλαξιακοί χάρτες².

Από την άλλη πλευρά, ο εντοπισμός θέσης προσπαθεί να ορίσει την ακριβή τοποθεσία ενός ανθρώπου (ή ενός αντικειμένου) σε σχέση με έναν δεδομένο καλά ορισμένο χώρο (χάρτη). Οι δύο έννοιες είναι άκρως αλληλένδετες μεταξύ τους καθώς η χαρτογράφηση περιέχει την έννοια του ορισμού θέσης, καθώς βασίζεται στις σχετικές θέσεις του χαρτογράφου για την σωστή απεικόνιση του χώρου, ενώ το πρόβλημα του localization προϋποθέτει την ύπαρξη ενός χάρτη έτσι ώστε να έχει νόημα η σημασία της θέσης μέσα σε αυτόν. Άξιο αναφοράς είναι πως με τον όρο “θέση” δεν εννοείται πάντα ένα σημείο το οποίο αναπαριστά τις διαστάσεις ενός ανθρώπου ή ενός αντικειμένου του οποίου θέλουμε να βρούμε την τοποθεσία του. Εκ φύσεως, και σύμφωνα με την σύνδεση των εννοιών του χάρτη και της θέσης, αναλόγως με τον τύπο και την κλίμακα του χάρτη που μελετάται, η θέση θα παρέχει και την αντίστοιχη πληροφορία με την αντίστοιχη ακρίβεια. Για παράδειγμα, σε έναν χάρτη του μετρό, κάθε πιθανή θέση ενδιαφέροντος μπορεί να απεικονίζεται ως μια κουκκίδα που μπορεί να περιγράφει το μέγεθος του συρμού σε

¹<https://en.wikipedia.org/wiki/Cartography>

²<https://mapoftheuniverse.net/>

σχέση με το μήκος της γραμμής, και να βρίσκεται μεταξύ δύο στάσεων σε αποστάσεις από την κάθε μία σε αναλογία με την απόσταση που διανύθηκε. Δεν θα είχε κανένα νόημα να περιγράφεται η θέση του παραδείγματος με γεωγραφικές συντεταγμένες ή η απεικόνισή της να περιγράφει διαστάσεις ανθρώπου.

Στην εποχή τεχνολογικής έκρηξης που διανύουμε, έχουν αναπτυχθεί συστήματα τα οποία παρέχουν την δυνατότητα προσδιορισμού θέσης ενός ατόμου σε παγκόσμια κλίμακα και με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Χαρακτηριστικά, το GPS είναι ένα παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης χρηστών και βασίζεται σε ένα πλέγμα εικοσιεσσάρων δορυφόρων της Γης. Κάθε δέκτης GPS μπορεί να έχει ενσωματωμένους γεωπολιτικούς χάρτες στο σύστημά του διευκολύνοντας την πλοιόγηση σε οποιονδήποτε χώρο δίνοντας την δυνατότητα ανάπτυξης πλήθους εφαρμογών σε τομείς όπως η αεροναυπηγία, η αυτόνομη οδήγηση, η γεωργία ακριβείας (precision agriculture) κ.α.

1.1 Περιγραφή προβλήματος

Στην σύγχρονη εποχή, πλέον πολλές από τις δραστηριότητες των ανθρώπων λαμβάνουν χώρα σε εσωτερικούς χώρους, τόσο σε δημόσιες όσο και σε ιδιωτικές δομές. Έτσι με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η ανάγκη ανάπτυξης αντίστοιχων εφαρμογών αναγνώρισης τοποθεσίας χρήστη. Σε ένα τέτοιο όμως περιβάλλον το σήμα GPS που λαμβάνει ο δέκτης είναι αρκετά αδύναμο, ή είναι μη διαθέσιμο, μειώνοντας σημαντικά την ακρίβεια της εκτίμησης θέσης εντός του χώρου καθιστώντας την χρήση τέτοιων συστημάτων άχαρη.

Όμως, τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών smartphones, σε συνδυασμό με την ποικιλία ενσωματωμένων αισθητήρων που παρέχον και την εκτόξευση των πωλήσεών τους παγκοσμίως, τα καθιστούν την πιο διαδεδομένη ηλεκτρονική συσκευή στον κόσμο και αδιαμφισθίτητα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Επομένως τα κινητά τηλέφωνα είναι το ιδανικότερο ελάχιστο μέσο για την ανάπτυξη εφαρμογών εύρεσης θέσης, καθώς η άμεση διαθεσιμότητα ποιοτικών αισθητήρων κίνησης, όπως το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο, είναι ικανά να αναγνωρίσουν τις αλλαγές στην κίνηση και την περιστροφή του χρήστη. Ταυτόχρονα οι συσκευές κινητών τηλεφώνων είναι αρκετά πρακτικές λόγω των μικρών τους διαστάσεων.

Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών θα θέλαμε να εντοπίζουμε σε σταθμούς τρένων, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, μουσεία κ.α., δηλαδή μεγάλους και σύνθετους χώρους, στους οποίους συγχρωτίζονται πολλά άτομα κατά την διάρκεια μιας μέρας. Μερικά παραδείγματα τομέων που θα μπορούσαν να ενσωματώσουν τέτοιες εφαρμογές είναι:

- **Μέσα και Μεταφορές:** Ο εντοπισμός θέσης μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμος σε δομές μεταφορών όπως τα αεροδρόμια, οι σταθμοί τρένων, τα λιμάνια και οι σταθμοί υπεραστικών λεωφορείων με την παροχή πληροφορίας θέσης των επιβατών. Παράλληλα τέτοιες εφαρμογές μπορούν να συμβάλλουν στην βελτίωση ροής των ανθρώπων εντός των εγκαταστάσεων.
- **Παροχές υπηρεσιών Υγείας:** Η εύρεση τοποθεσίας και η επισκεψιμότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις δομές υγείας για την διευκόλυνση παρακολούθησης των ασθενών, την παροχή βοήθειας πλοιόγησης επισκεπτών μέσα στα νοσοκομεία, καθώς και την παροχή πληροφοριών διαθεσιμότητας κρεβατιών ή άλλων πόρων.

- **Αρχαιολογικοί χώροι και Μουσεία:** Η πληροφορία της θέσης ενός επισκέπτη ή και των διαθέσιμων εκθεμάτων, σε συνδυασμό με την πληροφορία επισκεψιμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία προτάσεων περιήγησης του επισκέπτη εξασφαλίζοντας του την καλύτερη δυνατή εμπειρία.
- **Βοηθήματα Προσβασιμότητας:** Για τα άτομα με προβλήματα όρασης, ο εντοπισμός της θέσης τους εντός μιας δομής, μπορεί να αξιοποιηθεί έτσι ώστε να τους δίνεται η δυνατότητα να περιηγούνται με μεγαλύτερη άνεση και ακρίβεια σε άγνωστους δημόσιους εσωτερικούς χώρους.
- **Συστήματα Ασφαλείας:** Σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης, όπως πυρκαγιές, σεισμοί κ.τ.λ., η πληροφορία της θέσης μπορεί να φανεί χρήσιμη για εφαρμογές έκτακτης εκκένωσης κτιρίων παρέχοντας οδηγίες για την ομαλή και οργανωμένη μετακίνηση των ανθρώπων σε κάποιο ασφαλές σημείο αποφεύγοντας τυχόν αδιέξοδα λόγω καπνού ή κατάρρευσης του κτηρίου.

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προτείνει μια οικονομικότερη με προοπτικές προσέγγιση στο πρόβλημα της εύρεσης θέσης σε εσωτερικό χώρου μέσω της δημιουργίας ενός αυτόνομου συστήματος πραγματικού χρόνου, ανεξάρτητου από ειδικά προσαρμοσμένες εξωτερικές διατάξεις. Η προσέγγιση της θέσης δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στην εκτίμηση θέσης σε επίπεδο υποσυνόλων του χώρου, έναντι της εύρεσης ακριβούς τοποθεσίας του χρήστη, με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών επισκεψιμότητας εντός αυτών. Με τον όρο επισκεψιμότητα εννοούμε την πληροφορία που περιγράφει την αναγνώριση του υποσυνόλου του χώρου που βρίσκεται ο χρήστης καθώς αυτός περιηγείται μέσα στον χώρο και μετακινείται μεταξύ των διάφορων τοποθεσιών. Μέσω της εργασίας στοχεύουμε στην ανάπτυξη μιας εύχρηστης android εφαρμογής η οποία αξιοποιεί μετρήσεις από τους αισθητήρες του smartphone και δίνει την δυνατότητα σε κάθε χρήστη να περιηγείται του χώρου στον οποίο είναι διαθέσιμος ο χάρτης εμφανίζοντάς στην οθόνη του την θέση του και τις αντίστοιχες πληροφορίες επισκεψιμότητας σε πραγματικό χρόνο.

1.3 Διάρθρωση

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας είναι η εξής:

- **Στο κεφάλαιο 1** (παρόν κεφάλαιο) γίνεται αναφορά στο γενικότερο πρόβλημα της εύρεσης θέσης και στο αντικείμενο μελέτης το οποίο πραγματεύεται η διπλωματική εργασία, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα αξιοποίησης αντίστοιχων εφαρμογών και τελικά η δομή της εργασίας.
- **Στο κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται εν συντομίᾳ οι βασικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν και είναι απαραίτητες για την αφομοίωση της διπλωματικής εργασίας.
- **Στο κεφάλαιο 3** γίνεται μια σύντομη επισκόπηση της ερευνητικής περιοχής γύρω από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία καθώς και μια σύντομη αναφορά σε υπάρχουσες τεχνολογίες εύρεσης θέσης σε εσωτερικούς χώρους.

- **Στο κεφάλαιο 4** γίνεται λεπτομερής αναφορά της υλοποίησης της εφαρμογής και του τρόπου λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων. Στο τέλος παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα της ανάπτυξης της εφαρμογής.
- **Στο κεφάλαιο 5** καταγράφονται τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης τεκμηριώνοντας αποφάσεις και παραδοχές που ελήφθησαν για την ανάπτυξη της εφαρμογής.
- **Στο κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε και τελικώς γίνεται λόγος σε ανοιχτά θέματα και μελλοντικές επεκτάσεις της έρευνας-εφαρμογής.

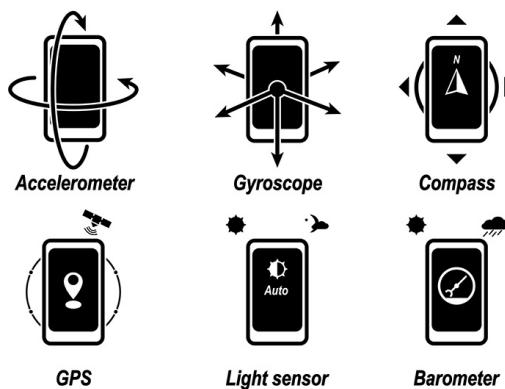
Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποτελεί μια σύνοψη της θεωρίας των κύριων περιοχών μελέτης που χρησίμευσαν την κατανόηση και την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.1 Αισθητήρες έξυπνων τηλεφώνων (Smartphones)

Τα έξυπνα τηλέφωνα αποτελούν την πιο δημοφιλή και διαδεδομένη παγκοσμίως ηλεκτρονική συσκευή χάρη στο πλήθος των δυνατοτήτων που παρέχουν μέσω του λογισμικού τους, των εφαρμογών τους και ενός συνόλου ενσωματωμένων αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να αντιλαμβάνονται την κίνηση και τον προσανατολισμό, την θέση, ακόμα και περιβαλλοντικά μεγέθη. Η ταχεία εξέλιξη των μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS, Micro-Electromechanical Systems), έχουν οδηγήσει στην δυνατότητα διάθεσης αισθητήρων υψηλής ποιότητας, ταχύτητας και ακρίβειας σε κάθε εμπορική συσκευή έξυπνου τηλεφώνου. Μια βασική ομάδα αισθητήρων MEMS, που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές εύρεσης θέσης είναι οι αισθητήρες κίνησης και θέσης (motion sensors). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1, οι αισθητήρες κίνησης είναι το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο, το GPS, το φωτισμόμετρο, το αισθητήρας προσέγγισης (proximity sensor) και το βαρόμετρο.



Σχήμα 2.1: Αισθητήρες Κίνησης Κινητού Τηλεφώνου [Πηγή]

Επιπροσθέτως, στην ανάπτυξη εφαρμογών εύρεσης θέσης της συσκευής χρησιμοποιείται εκτενώς και το GPS, η λειτουργία Wi-Fi, Bluetooth, ακόμα και η λειτουργία της κάμερας για την ανάγνωση QR codes.

Λόγω της φιλοσοφίας της παρούσας εργασίας για την δημιουργία μιας εφαρμογής χρήστη ανεξάρτητη από ειδικές διατάξεις και εξειδικευμένες υποδομές (δίκτυο Wi-Fi, φωτισμός, ακουστική, QR code κ.τ.λ), δίνεται έμφαση στους αισθητήρες κίνησης.

2.1.1 Γυροσκόπιο

Το γυροσκόπιο έχει την δυνατότητα να καταγράφει τον προσανατολισμό και τη γωνιακή ταχύτητα μιας συσκευής στον τρισδιάστατο χώρο. Βοηθά στον προσδιορισμό του προσανατολισμού της συσκευής, είτε αυτή έχει κλίση, είτε περιστρέφεται, είτε μετακινείται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Οι πιο συνήθεις λειτουργίες που αξιοποιούν το γυροσκόπιο είναι:

- **Παιχνίδια:** Το γυροσκόπιο επιτρέπει τον έλεγχο κίνησης σε εφαρμογές παιχνιδιών όπου ο χρήστης μπορεί να χειρίζεται το περιβάλλον του παιχνιδιού περιστρέφοντας την συσκευή.
- **Εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality) και επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality):** Η ύπαρξη γυροσκοπίου είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση των κινήσεων του χρήστη μέσω της συσκευής για την παροχή μιας πιο καθηλωτικής εμπειρίας σε τέτοιοι είδους εφαρμογές.

Κατά σύμβαση η μονάδα μέτρησης των δεδομένων που παρέχει ένα γυροσκόπιο είναι rad/s ενώ είναι διαθέσιμη και η μετατροπή αυτών σε o/sec .

2.1.2 Επιταχυνσιόμετρο

Το επιταχυνσιόμετρο καταγράφει την επιτάχυνση μιας συσκευής κατά μήκος των άξονων x, y και z. Κύρια λειτουργία του είναι να ανιχνεύει αλλαγές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση της κίνησης. Στα smartphones, τα επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για:

- **Περιστροφή της οθόνης:**
Τα επιταχυνσιόμετρα σε συνεργασία με το γυροσκόπιο έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύουν αλλαγές στον προσανατολισμό της συσκευής ώστε να προσαρμόζεται η εικόνα της οθόνης ανάλογα με το αν βρίσκεται σε λειτουργία πορτραίτου ή σε λειτουργία τοπίου.
- **Αναγνώριση χειρονομιών:**
Ως χειρονομίες εννοούνται κινήσεις όπως η ανατροπή (tilt, η ανακίνηση (shake), ή το απότομο γύρισμα flipping της συσκευής, οι οποίες χρησιμεύουν για την εκτέλεση συγκεκριμένων ενεργειών σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. παιχνίδια, ή ακόμα για την ενεργοποίηση λειτουργιών του λογισμικού (π.χ. επανεκκίνηση, αναίρεση).

Το επιταχυνσιόμετρο παρέχει την δυνατότητα συλλογής δύο τύπου δεδομένων επιτάχυνσης:

- Επιτάχυνση ανά άξονα με την συμβολή της βαρύτητας, σε g

- Επιτάχυνση ανά άξονα χωρίς την συμβολή της βαρύτητας, σε m/s^2

Μια ισοδύναμη ερμηνεία των μετρήσεων του επιταχυνσιόμετρου είναι η μέτρηση της δύναμης που ασκείται στην συσκευή είτε από την κίνηση είτε από την βαρύτητα.

Συνδυάζοντας δεδομένα από το γυροσκόπιο και το επιταχυνσιόμετρο, τα smartphones μπορούν να παρακολουθούν με ακρίβεια την κίνηση, τον προσανατολισμό και την επιτάχυνση, επιτρέποντας ένα ευρύ φάσμα διαδραστικών και διαισθητικών λειτουργιών για τους χρήστες.

2.2 Ανθρώπινο βάδισμα

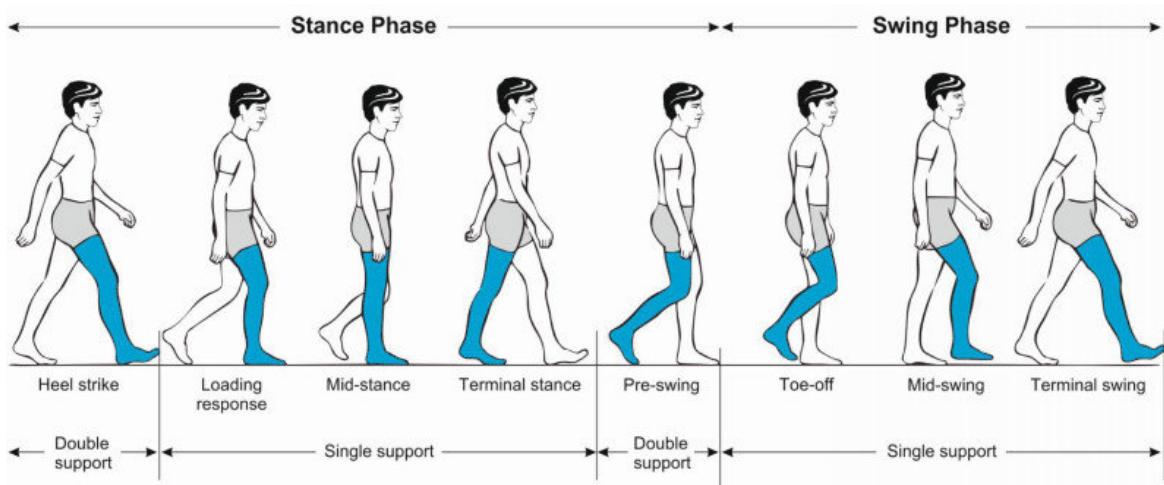
Η δυναμική και κινητική ανάλυση του βηματισμού του ανθρώπου αποτελεί από τα βασικά αντικείμενα μελέτης των κλάδων της Κινησιολογίας και της Εμβιομηχανικής. Οι αναλύσεις αυτές, και τα αποτελέσματά τους, χρησιμεύουν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την πρόληψη ασθενειών και παθήσεων, την ανάπτυξη εφαρμογών υγείας για smartwatch, στην ανάπτυξη των δίποδων ρομπότ, μέχρι και στην σχεδίαση προσθετικών μελών [1–3].

Ένας κύκλος βάδισης ορίζεται ως ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών επαφών του ίδιου ποδιού με το έδαφος [4]. Ο κύκλος αυτός μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές φάσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2

- **Στάση (Stance Phase)**

Κατά την φάση αυτή, το πέλμα το ποδιού είναι σε επαφή με το έδαφος και αποτελεί περίπου το 60% του βηματισμού. Κατ' επέκταση η στάση μπορεί να χωριστεί σε άλλες πέντε επιμέρους φάσεις:

- Αρχική επαφή
- Απόκριση φόρτισης
- Μέση στάση
- Τελική στάση
- Προαιώρηση



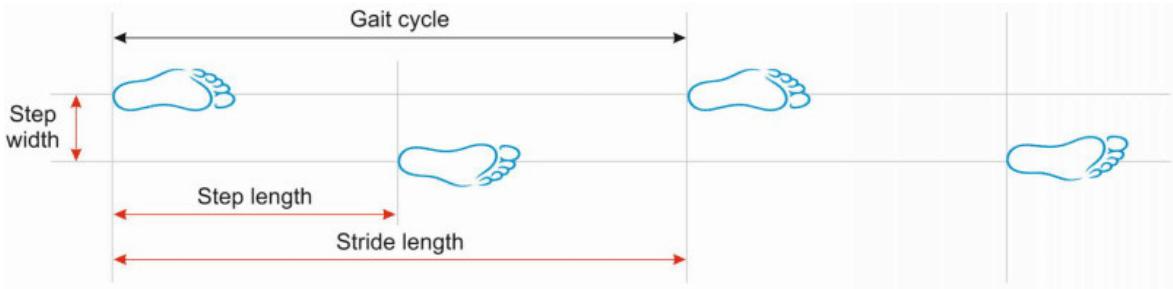
Σχήμα 2.2: Ο κύκλος βάδισης [Πηγή]

- Αιώρηση (Swing Phase)

Αντίστοιχα, η φάση της αιώρησης είναι το χρονικό διάστημα κατά την οποία το πέλμα του ποδιού δεν είναι σε επαφή με το έδαφος και μπορεί να χωριστεί σε τρεις επιμέρους φάσεις:

- Αρχική αιώρηση
- Μέση αιώρηση
- Τελική αιώρηση

Ως μήκος βήματος ονομάζουμε την απόσταση μεταξύ των σημείων διαδοχικών επαφών αμφίρροπων ποδιών όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 2.3.



Σχήμα 2.3: Περιγραφή ορολογίας του κύκλου βάδισης [Πηγή]

Παρατηρείται ότι η συχνότητα, η ταχύτητα βάδισης και το μήκος αλλάζουν από βήμα σε βήμα και είναι διαφορετικά για κάθε άνθρωπο.

2.3 Επεξεργασία δεδομένων

2.3.1 Κινητός Μέσος Όρος

Ο κινητός μέσος όρος ή **ΚΜΟ**, είναι ένας μαθηματικός υπολογισμός που περιγράφει ένα είδους συνέλιξης. Συχνά χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ανάλυσης χρονοσειρών, όπως η ανάλυση χρηματιστηριακών δεικτών, και αποτελεί σημαντικό εργαλείο της τεχνικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένων n στοιχείων δεδομένων $p_1, p_2 \dots p_n$, ο απλός κινητός μέσος όρος των προηγούμενων k στοιχείων ορίζεται ως

$$\begin{aligned} SMA_k &= \frac{p_{n-k+1} + p_{n-k+2} + \dots + p_n}{k} \\ &= \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n p_i \end{aligned}$$

Ο ΚΜΟ έχει την δυνατότητα να αποκόβει τα στοιχεία υψηλών συχνοτήτων από τα δεδομένα, επιδεικνύοντας συμπεριφορά χαμηλοπερατού ψηφιακού φίλτρου. Στην επεξεργασία σημάτων, χρησιμοποιείται συνήθως για την εξομάλυνση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων και την ανάδειξη μακροπρόθεσμων τάσεων ή κύκλων.

2.3.2 Σταθμισμένος Μέσος Όρος

Ο σταθμισμένος μέσος όρος αποτελεί μέθοδο εντοπισμού του μέσου όρου για σύνολα δεδομένων όπου τα δεδομένα αυτά δεν συμβάλουν με τον ίδιο τρόπο στην εύρε-

στη της μέσης τιμής. Το μέγεθος συμβολής περιγράφεται από έναν θετικό συντελεστή βάρους.

Εκ μαθηματικού ορισμού, ο σταθμικός μέσος όρος για ένα σύνολο δεδομένων $(x_1, x_2 \dots x_n)$ με εν αντιστοιχία βάρη $(w_1, w_2 \dots w_n)$ υπολογίζεται σύμφωνα με τη (2.1):

$$\bar{x}_w = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.1)$$

Η (2.1) μπορεί να απλοποιηθεί κανονικοποιώντας τα βάρη για το ίδιο σύνολο, έτσι ώστε $\sum_{i=1}^n w'_i = 1$ όπου

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (2.2)$$

στο ισοδύναμο της:

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w'_i x_i \quad (2.3)$$

Επίσης παρατηρούμε πως ο απλός μέσος όρος $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ αποτελεί ειδική περίπτωση του σταθμισμένου μέσου όρου όταν όλα τα βάρη w_i έχουν την ίδια μεταξύ τους τιμή.

2.3.3 Quaternions

Τα τετραδόνια (quaternions) είναι μια μέθοδος περιγραφής της προσανατολισμένης θέσης και περιστροφής ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ρομποτικής, γραφικών υπολογιστών, αεροναυπηγικής κ.α. Τα τετραδόνια, μαθηματικά, αποτελούν επέκταση των μιγαδικών αριθμών και ορίζονται ως

$$\mathbf{q} = a + bi + cj + dk \quad (2.4)$$

όπου $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ και,

$$i^2 = j^2 = k^2 = i \cdot j \cdot k = -1 \quad (2.5)$$

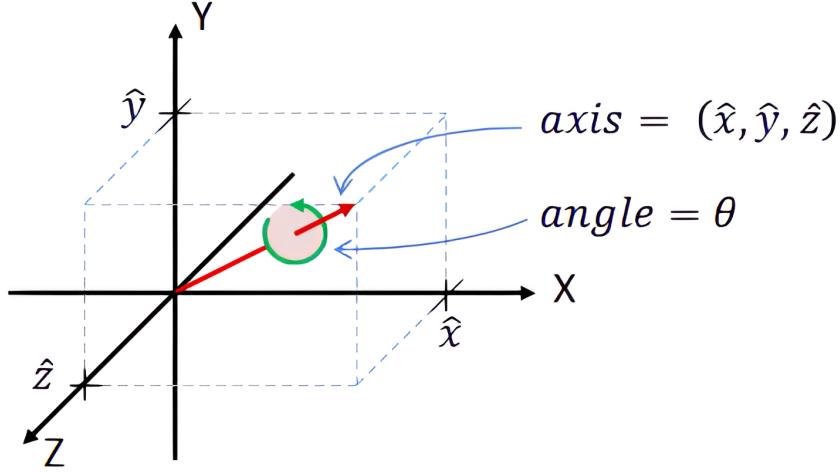
Ο χώρος των τετραδονίων συμβολίζεται με \mathbb{H} και σε αναλογία με τους μιγαδικούς αριθμούς, κάθε τετραδόνιο αποτελείται από ένα βαθμωτό μέρος $a \in \mathbb{R}$ και ένα διανυσματικό μέρος $bi + cj + dk \in \mathbb{R}^3$. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και την γραφή

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= (r, \vec{u}) \\ &= (q_0, q_1, q_2, q_3), q_i \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Για την αναπαράσταση προσανατολισμού και περιστροφών χρησιμοποιούνται τα μοναδιαία τετραδόνια, $|q| = 1$ όπου και ονομάζονται τετραδόνια περιστροφών (rotation quaternions)

Axis-Angle to Quaternion

Σύμφωνα με την θεωρία περιστροφών του Euler, οποιαδήποτε περιστροφή στον τρισδιάστατο χώρο (ή ακολουθία περιστροφών) μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας δύο παραμέτρους όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.4: ένα μοναδιαίο διάνυσμα, όπου ορίζει τον άξονα περιστροφής, και μια γωνία θ που περιγράφει το μέγεθος της περιστροφής γύρω από αυτόν τον άξονα.



Σχήμα 2.4: Κάθε 3D περιστροφή περιγράφεται από έναν άξονα περιστροφής και την γωνία περιστροφής γύρω από αυτόν τον άξονα [Πηγή]

Επομένως μια περιστροφή άξονα-γωνίας περιγράφεται από τέσσερις αριθμούς $(\theta, \hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ όπου θ είναι η γωνία περιστροφής και $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ είναι ο άξονας περιστροφής.

Γνωρίζοντας τα στοιχεία $(\theta, \hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ μπορούμε να τα μετατρέψουμε σε τετραδόνιο περιστροφής $\mathbf{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3)$ ως έχει:

$$q_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.7\alpha')$$

$$q_1 = \hat{x} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.7\beta')$$

$$q_2 = \hat{y} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.7\gamma')$$

$$q_3 = \hat{z} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.7\delta')$$

Όπως φαίνεται το πραγματικό μέρος του τετραδονίου (q_0) ορίζεται αποκλειστικά από την γωνία περιστροφής θ .

Quaternion to Rotation Matrix

Δεδομένου ενός τετραδονίου περιστροφής $\mathbf{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3)$, ο αντίστοιχος πίνακας περιστροφής που εξάγεται από αυτό είναι ο :

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

όπου $R \in \text{SO}(3)$, με $\text{SO}(3)$ να αναφερόμαστε στο σύνολο των τρισδιάστατων περιστροφών.

Euler Angles to Quaternion

Οι γωνίες Euler αποτελούν επίσης μια μέθοδο αναπαράστασης προσανατολισμού ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο και είναι η πιο διαδεδομένη σε μια πληθώρα εφαρμογών όπως η ρομποτική, καθώς υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων και συμβάσεων ορισμού των γωνιών αυτών. Για χάρη απλότητας στην παρούσα εργασία θα αναφέρομαστε στην παραλλαγή Tait-Bryan με σειρά περιστροφών yaw-pitch-roll (αντίστοιχες περιστροφές γύρω από z-y-x άξονες).

Δεδομένου αυτού το ορισμού, οι αντίστοιχες γωνίες (y, p, r) μπορούν να μετατραπούν στο αντίστοιχο τετραδόνιο ως:

$$q_0 = \cos\left(\frac{r}{2}\right) \cos\left(\frac{p}{2}\right) \cos\left(\frac{y}{2}\right) + \sin\left(\frac{r}{2}\right) \sin\left(\frac{p}{2}\right) \sin\left(\frac{y}{2}\right) \quad (2.9\alpha')$$

$$q_1 = \sin\left(\frac{r}{2}\right) \cos\left(\frac{p}{2}\right) \cos\left(\frac{y}{2}\right) - \cos\left(\frac{r}{2}\right) \sin\left(\frac{p}{2}\right) \sin\left(\frac{y}{2}\right) \quad (2.9\beta')$$

$$q_2 = \cos\left(\frac{r}{2}\right) \sin\left(\frac{p}{2}\right) \cos\left(\frac{y}{2}\right) + \sin\left(\frac{r}{2}\right) \cos\left(\frac{p}{2}\right) \sin\left(\frac{y}{2}\right) \quad (2.9\gamma')$$

$$q_3 = \cos\left(\frac{r}{2}\right) \cos\left(\frac{p}{2}\right) \sin\left(\frac{y}{2}\right) - \sin\left(\frac{r}{2}\right) \sin\left(\frac{p}{2}\right) \cos\left(\frac{y}{2}\right) \quad (2.9\delta')$$

Οι εξισώσεις (2.9α') - (2.9δ') λειτουργούν για όλες τις γωνίες Euler συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων gimbal lock, όπου η γωνία pitch αντιστοιχεί σε ± 90 deg.

Quaternions to Euler Angles

Κατ' αντίστοιχία, δεδομένου ενός τετραδόνιου, $\mathbf{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3)$ μπορούμε να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες γωνίες Euler.

$$roll = r = \text{atan2}[2(q_0q_1 + q_2q_3), q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2] \quad (2.10\alpha')$$

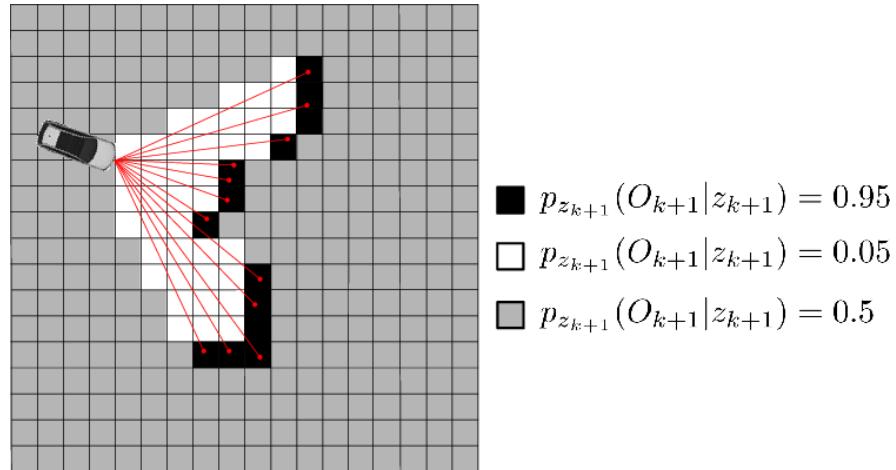
$$pitch = p = \arcsin[2(q_0q_2 - q_1q_3)] \quad (2.10\beta')$$

$$yaw = y = \text{atan2}[2(q_0q_3 + q_1q_2), q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2] \quad (2.10\gamma')$$

2.4 Occupancy Grid Mapping

Η κατασκευή χαρτών κατάληψης πλέγματος (occupancy grid mapping) αναφέρεται σε μια οικογένεια αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται εκτενώς στην ρομποτική και λύνουν το πρόβλημα της αναπαράστασης ενός άγνωστου, εξ αρχής, χώρου με δεδομένα επιρρεπή σε θόρυβο και αβεβαιότητα, γνωρίζοντας ικανοποιητικά τον προσανατολισμό και την θέση του συστήματος μέσα στον χώρο. Η φιλοσοφία ενός χάρτη πληρότητας είναι η αναπαράσταση του περιβάλλοντος χώρου του συστήματος που ενεργεί σε αυτό, ως ένα ομοιόμορφο πλέγμα όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε μια τιμή πιθανότητας, η οποία εκφράζει την παρουσία ενός εμποδίου (δηλαδή αν κάποιο κελί είναι 'κατειλημμένο' ή όχι). Επιπλέον αναλόγως την σύμβαση του χάρτη (grayscale, binary, bitmap κλπ) μπορεί να υπάρξει και μια ενδιάμεση πιθανότητα η οποία ουσιαστικά δηλώνει άγνωστη ακόμα πληροφορία για το σύστημα (σχήμα 2.5).

Το αντίστροφο πρόβλημα προσπαθούν να λύσουν οι αλγόριθμοι localization, δηλαδή σε μια δεδομένη αναπαράσταση του χώρου στον οποίο βρίσκεται ένα σύστημα, λαμβάνοντας πιθανώς θορυβώδη δεδομένα από αισθητήρες, ψάχνουμε να ορίσουμε με μεγαλύτερη πιθανή ακρίβεια την πόζα του συστήματος μέσα σε αυτόν τον χώρο.



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα διαμόρφωσης κελιών ενός χάρτη πληρότητας [Πηγή]

2.5 Πίνακες σύγχυσης

Οι πίνακες σύγχυσης (Confusion Matrices) ή αλλιώς πίνακες σφαλμάτων (Error Matrices), αποτελούν μέθοδο μέτρησης της απόδοσης αλγορίθμων, συνήθως για το πρόβλημα ταξινόμησης μηχανικής μάθησης όπου η έξοδος μπορεί να είναι δύο ή περισσότερες κλάσεις. Η διάταξή τους είναι συγκεκριμένη και επιτρέπει την οπτικοποίηση της απόδοσης των αλγορίθμων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, κάθε γραμμή του πίνακα αντιπροσωπεύει τις εγγραφές των πραγματικών κλάσεων ενώ οι στήλες αντιπροσωπεύουν τις περιπτώσεις πρόβλεψης κλάσεων.

		PREDICTED CLASS	
		TRUE POSITIVE	FALSE NEGATIVE
ACTUAL CLASS	TRUE POSITIVE		
	FALSE POSITIVE		TRUE NEGATIVE

Σχήμα 2.6: Πίνακας σύγχυσης δύο κλάσεων (Positive - Negative)

Τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου περιλαμβάνουν το πλήθος των δειγμάτων που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη κλάση και τα οποία ορθώς ταξινομήθηκαν σε αυτή από το μοντέλο. Αντίστοιχα τα στοιχεία εκτός διαγωνίου περιλαμβάνουν το πλήθος των δειγμάτων τα οποία ταξινομήθηκαν λανθασμένα σε διαφορετική κλάση από αυτήν που ανήκουν στην πραγματικότητα.

Μερικές χρήσιμες μετρικές που μπορούν να εξαχθούν από έναν τέτοιον πίνακα είναι:

- *Overall Accuracy (OA)*: Η συνολική ακρίβεια του αλγορίθμου που μελετάται ορίζεται ως το ποσοστό των ορθώς ταξινομημένων δειγμάτων ως προς το συνολικό πλήθος των δειγμάτων. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του πίνακα, η ακρίβεια υπολογίζεται ως εξής:

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (2.11)$$

- *Precision (P)*: Η ακρίβεια κλάσης περιγράφει την ικανότητα του αλγορίθμου να αναγνωρίζει σωστά τα δείγματα της συγκεκριμένης κλάσης και ορίζεται ως ο λόγος των δειγμάτων που ανήκουν στην κλάση προς τον λόγο των δειγμάτων που προέβλεψε ο αλγόριθμος ότι ανήκουν σε αυτήν στην κλάση. Δηλαδή για την περίπτωση της κλάσης Positive:

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.12)$$

- *Recall (R)*: Ως ανάκλαση (ή ευαισθησία) κλάσης ορίζεται το μέγεθος των δειγμάτων που ταξινομήθηκαν σωστά στην κλάση προς το σύνολο των δειγμάτων που ανήκουν πραγματικά σε αυτήν, και περιγράφει την ικανότητα του αλγορίθμου να μπορεί να αναγνωρίζει όλα τα δείγματα που ανήκουν στην αντίστοιχη κλάση. Δηλαδή για την κλάση Positive:

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.13)$$

- *F1 score*: Ο συντελεστής F1 είναι μια μετρική που λαμβάνει υπόψη τόσο την ακρίβεια (P) όσο και την ανάκληση (R) και ορίζεται ως εξής:

$$F1 = 2 \frac{P \cdot R}{P + R} \quad (2.14)$$

Πρόκειται για τον αρμονικό μέσο όρο της ακρίβειας και της ανάκλησης και αποτελεί πιο αξιόπιστο μέτρο απόδοσης από την ακρίβεια (OA).

Οι παραπάνω μετρικές μπορούν να αξιοποιηθούν και για πίνακες σύγχυσης περισσότερων κλάσεων, όμως ο υπολογισμός της ακρίβειας και της ανάκλησης για κάθε κλάση μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο αριθμό μετρήσεων απόδοσης. Όσο περισσότερες κλάσεις, τόσο περισσότερες μετρικές λαμβάνονται και μπορεί να είναι δύσκολο να ερμηνευτούν και να κατανοηθούν. Για αυτόν τον λόγο συνηθίζεται ο υπολογισμός μιας μέσης τιμής.

2.6 Σύνθεση πληροφοριών Fusion

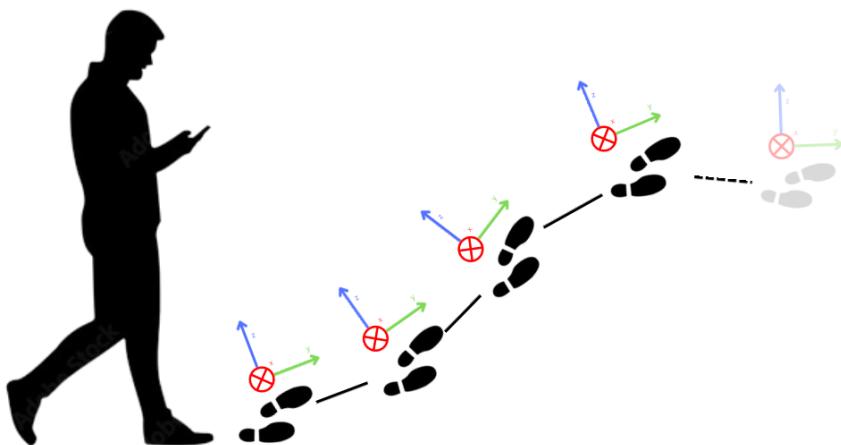
Μετά την συλλογή και την απαραίτητη επεξεργασία των διαφόρων δεδομένων από τους αισθητήρες της κινητής συσκευής, απαραίτητη είναι η σύνθεση αυτών με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς και την δημιουργία νέων δεδομένων.

2.6.1 Pedestrian Dead Reckoning

Ο όρος Dead Reckoning (DR) αναφέρεται στη μέθοδο προσέγγισης της τρέχουσας θέσης ενός κινούμενου συστήματος με βάση τις εκτιμώμενες κινήσεις από μια προηγουμένως γνωστή θέση. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται κατά κόρον στην ναυτιλία για την εκτίμηση της διαδρομής που τείνει να ακολουθήσει ένα πλοίο εν πλω. Αντίστοιχες εφαρμογές DR μπορούμε επιπλέον να βρούμε στην αεροναυπηγική, στην ρομποτική και το τελευταίο διάστημα με την ανάπτυξη της αυτόνομης οδήγησης, σε συστήματα αυτοκινήτων για λειτουργίες υποβοηθούμενης οδήγησης για περιπτώσεις που δεν υπάρχει δυνατότητα μετρήσεων GPS (π.χ. σε υπόγειους χώρους στάθμευσης).

Η μέθοδος βασίζεται στις μετρήσεις αισθητήρων Αδρανειακού Συστήματος Πλοήγησης (Inertial Navigation System (INS)), όπως το επιταχυνσιόμετρο, το γυροσκόπιο και το μαγνητόμετρο, ή σε αισθητήρες που παρέχουν ανίστοιχη πληροφορία (π.χ. περιστροφικοί αποκωδικοποιητές σε ρομποτικά συστήματα) όπου αντιλαμβάνονται τις μικρές αλλαγές στην επιτάχυνση και στην κατεύθυνση/περιστροφή του συστήματος. Έτσι, γνωρίζοντας τον προσανατολισμό και την θέση του συστήματος σε συνδυασμό με την πληροφορία της κίνησης αυτού, μπορούμε να εκτιμήσουμε την ανίστοιχη κατάσταση του συστήματος στον αμέσως επόμενο χρόνο.

Αντίστοιχες εφαρμογές DR, σχεδιασμένες για για πεζούς αποτελούν την ανίστοιχη υποκατηγορία μεθόδων Pedestrian Dead Reckoning (PDR). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν άλλες μεθόδους πλοήγησης παρόμοιες με αυτές των υπολογίων κινητών συστημάτων ή για να επεκτείνουν την πλοήγηση σε περιοχές όπου άλλα συστήματα πλοήγησης δεν είναι διαθέσιμα, όπως για παράδειγμα το GPS σε εσωτερικούς χώρους. Αυτές οι εφαρμογές βασίζονται σε ειδικά προσαρμοσμένα συστήματα τα οποία εφαρμόζονται πάνω στους χρήστες σε διάφορα σημεία του σώματός τους (π.χ. πόδια, μπράτσο, πλάτη, στήθος κλπ). Χάρη, όμως, στην άμεση διαθεσιμότητα αισθητήρων στα smartphones, και στην ραγδαία ανάπτυξη αυτών, επιτρέπεται πλέον η ανάπτυξη μεθόδων PDR που είναι ανεξάρτητες από διατάξεις ειδικού σκοπού όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7.



Σχήμα 2.7: Για μια εφαρμογή PDR, είναι αρκετό ο χρήστης να κρατάει μπροστά του το smartphone

Βέβαια, οι εφαρμογές PDR παρουσιάζουν προκλήσεις που δεν σχετίζονται με τις υπόλοιπες DR μεθόδους όπως πχ η μοντελοποίηση της ανθρώπινης κίνησης. Σε σχέση

με την μοντελοποίηση του κινηματικού μοντέλου ενός ρομποτικού συστήματος ή ενός αυτοκινήτου, η ανθρώπινη κίνηση είναι πιο δύσκολη και απρόβλεπτη. Στο ανθρώπινο βάδισμα δεν παρατηρείται σταθερός ρυθμός, σταθερό μήκος βήματος ή σταθερή ταχύτητα σε κάθε βήμα. Επομένως απαραίτητη είναι η μελέτη του ανθρώπινου βαδίσματος μέσα από τα κεφάλαια της εμβιομηχανικής.

2.6.2 Particle Filter

Τα particle filters (PF), όπως και τα φίλτρα Kalman ανήκουν στην ίδια κατηγορία φίλτρων Bayes και επομένως η φιλοσοφία των δύο μεθόδων είναι παρόμοια. Και τα δύο φίλτρα προσπαθούν να λύσουν το πρόβλημα της σωστής εκτίμησης της κατάστασης ενός συστήματος.

Βασικό χαρακτηριστικό των PF είναι πως χρησιμοποιούν ένα σύνολο σωματίδιων (particles) για να αναπαραστήσουν την εκ των υστέρων κατανομή μιας στοχαστικής διαδικασίας δεδομένων των θορυβωδών ή/και μερικών παρατηρήσεων. Το μοντέλο του χώρου καταστάσεων μπορεί να είναι μη γραμμικό και οι κατανομές της αρχικής κατάστασης και του θορύβου μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε μορφή.

Σε κάθε σωματίδιο αντιστοιχίζεται ένα βάρος που εκφράζει την πιθανότητα το συγκεκριμένο σωματίδιο να είναι δείγμα από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής.

Η μεθοδολογία των PF χωρίζεται σε τέσσερα βασικά τμήματα:

- Αρχικοποίηση

Κατά την οποία ορίζονται οι αρχικές καταστάσεις σύμφωνα με τις αρχικές κατανομές καταστάσεων και θορύβου.

- Εξάπλωση

Στην φάση της εξάπλωσης, σε κάθε σωματίδιο εφαρμόζεται η αλλαγή κατάστασής του βάσει των μετρήσεων των αισθητήρων του συστήματος.

- Ενημέρωση

Στο στάδιο της ενημέρωσης, αφού έχει προηγηθεί η εξάπλωση, ανανεώνονται τα βάρη κάθε σωματίδιου σύμφωνα με ένα σύνολο ορισμένων κανόνων και περιορισμών.

- Αναδειγματοληψία

Πρόκειται για την διαδικασία δειγματοληψίας σωματίδιων σύμφωνα με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που ορίζουν τα βάρη αυτών.

2.7 Υλοποίηση Εφαρμογής Χρήστη

2.7.1 Expo

Το Expo¹ είναι μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα δημιουργίας εγγενών εφαρμογών (native apps) που τρέχουν σε περιβάλλοντα iOS, Android και Web, και χρησιμοποιούν

¹[Expo homepage](#)

JavaScript² και React Native³. Διαθέτει ένα δικό του software development kit (SDK) το οποίο παρέχει πρόσβαση σε λειτουργίες της συσκευής και του συστήματος, όπως επαφές, κάμερα, γυροσκόπιο, τοποθεσία GPS κ.ο.κ., με τη μορφή πακέτων.

Παράλληλα, το Expo Go είναι ένα sandbox το οποίο επιτρέπει τον άμεσο και εύκολο πειραματισμό στην ανάπτυξη εφαρμογών Android και iOS σε πραγματικό χρόνο μέσω της αντίστοιχης mobile εφαρμογής.⁴

2.7.2 Android Studio

Το Android Studio⁵ πρόκειται το επίσημο εξειδικευμένο προγραμματιστικό περιβάλλον Integrated Development Environment (IDE) για την ανάπτυξη εφαρμογών στην πλατφόρμα Android. Παρέχει ένα σύνολο δυνατοτήτων και εργαλείων που ενισχύουν την παραγωγικότητα κατά την διάρκεια ανάπτυξης εφαρμογών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα, τον ενσωματωμένο προσομοιωτή κινητής συσκευής.

Το περιβάλλον του Android Studio είναι συμβατό με την πλατφόρμα της Expo επιτρέποντας ευκολία στην ανάπτυξη, αποσφαλμάτωση και ελέγχου των εφαρμογών.

²[Ecma International](#)

³[ReactNative homepage](#)

⁴[Expo-Go app](#)

⁵[Android Studio homepage](#)

Κεφάλαιο 3

Επισκόπηση Ερευνητικής Περιοχής

3.1 Εμπορικά συστήματα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται ένα σύνολο σημαντικών εφαρμογών indoors localization που έχουν ήδη αναπτυχθεί και είναι εμπορικά διαθέσιμα. Το συγκεκριμένο απασχολεί αρκετές εταιρίες παροχής υπηρεσιών τεχνολογίας καθώς έχουν γίνει αρκετές επενδύσεις πάνω στην ανάπτυξη και στην εισαγωγή αντίστοιχων συστημάτων στον τομέα της βιομηχανίας, της υγείας, ακόμα και σε ακαδημαϊκές δομές. Και πράγματι, στις περιπτώσεις όπου η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, με το πλήθος λύσεων διαφορετικών σεναρίων που προσφέρει, υπάρχει η εμφάνιση εταιρικών αποτελεσμάτων. Μερικά παραδείγματα εταιριών που παρέχουν λύσεις εντοπισμού θέσεων είναι:

- **Cisco¹**: Η πλατφόρμα της Cisco, Spaces² πρόκειται για μια cloud πλατφόρμα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους και παρέχει μια γκάμα από υπηρεσίες ανάλυσης τοποθεσίας, πληροφορίες λειτουργικότητας επιχείρησης, διαχείρισης εμπειρίας πελατών, παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων κ.α. Η λύση που προτείνει η Cisco προϋποθέτει την εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο cloud και μέσω αυτού διοχετεύονται οι απαραίτητες πληροφορίες θέσης χρηστών και όχι μόνο. Με τις πληροφορίες αυτές, είναι δυνατή η υλοποίηση βοηθητικών λειτουργιών για ένα περιβάλλον εργασίας όπως η οπτική απεικόνιση της διαθεσιμότητας και της χρήσης των αιθουσών συνεδριάσεων, η παρακολούθηση της πληρότητας και της ποιότητας του αέρα σε κτίρια, ορόφους και αίθουσες συνεδριάσεων και πολλά άλλα.
- **infsoft³**: Η λύση που παρέχει η infsoft δίνει την δυνατότητα εντοπισμού της θέσης ατόμων και παρακολούθησης της δραστηριότητάς τους σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την διασφάλιση την ασφάλειά και την αύξηση της παραγωγικότητας για διάφορες εφαρμογές. Τα απαραίτητα διακριτικά wearables παρέχουν αξιόπιστες

¹[Cisco Solutions Suite](#)

²[Cisco's Spaces](#)

³[infsoft People Tracking](#)

δυνατότητες εντοπισμού ατόμων για εργατικό δυναμικό, ασθενείς και επισκέπτες. Παράλληλα οι φορητές ετικέτες (tags) δίνουν την δυνατότητα ελέγχου πρόσθασης για την προστασία συγκεκριμένων περιοχών ή την ασφάλεια των ατόμων. Η πλατφόρμα infsoft People Tracking έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αξιόπιστα για οποιαδήποτε διάταξη κτιρίου. Σημειώνεται ότι η infsoft παρέχει ένα σημαντικό σύνολο λύσεων προβλημάτων localization σε εσωτερικούς χώρους⁴, ενώ χαρακτηριστικοί πελάτες της που χρησιμοποιούν τα προϊόντα της είναι η Siemens Healthineers⁵ και η Frankfurt Airport⁶.

- **Sewio⁷**: Η Sewio είναι κατασκευαστής συστημάτων εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (Real Time Locating Systems, RTLS) που οδηγούν σε εταιρικά αποτελέσματα για κατασκευαστές, αποθήκες, κέντρα διανομής, OEM (Original Equipment Manufacturer) και άλλους. Παρέχει στους πελάτες και τους συνεργάτες της μια αξιόπιστη, πλήρως κλιμακούμενη και πελατοκεντρική λύση IoT (Internet of Things) για εντοπισμό θέσης σε εσωτερικούς χώρους που επιτρέπει στις εταιρείες να επιτύχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα, κερδοφορία και ασφάλεια. Μια από τις εφαρμογές που σκοπεύει την επίτευξη όλων των παραπάνω είναι η εύρεση θέσης και η παρακολούθηση ανυψωτικών οχημάτων (forklift). Κάθε όχημα είναι εξοπλισμένο με μία φορητή ετικέτα η οποία εκπέμπει σήμα σε ειδικές συσκευές, τις άγκυρες (anchors), οι οποίες είναι εγκατεστημένες στην οροφή της αποθήκης παρέχοντας ανά πάσα στιγμή πληροφορία θέσης. Παράλληλα, η πληροφορία της θέσης μπορεί να αξιοποιηθεί για την εξαγωγή επιπλέον πληροφοριών όπως την εύρεση βέλτιστης διαδρομής για την παραλαβή / τοποθέτηση φορτίου, βελτιστοποιώντας την διαχείριση του στόλου. Παράδειγμα εγκατάστασης και εφαρμογής του συγκεκριμένου συστήματος είναι στην περίπτωση της τσέχικης ζυθοποιίας Budweiser Budvar⁸.
- **Esri⁹**: Η Esri⁹ (Environmental Systems Research Institute) είναι μια πολυεθνική εταιρεία λογισμικού συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών με έδρα την Καλιφόρνια και είναι περισσότερο γνωστή για τα προϊόντα ArcGIS. Γενικότερα τα συστήματα GIS (Geographic Information Systems) ανήκουν στην κατηγορία συστημάτων τα οποία αποθηκεύουν, διαχειρίζονται, αναλύουν, επεξεργάζονται, εξάγουν και απεικονίζουν γεωγραφικά δεδομένα. Η Esri στην δράση της, προτείνει και λύσεις που στοχεύουν στην ανάπτυξη GIS εσωτερικού χώρου. Για τη διαχείριση των περιουσιακών στοιχείων μιας εγκατάστασης, μια ενοποιημένη εικόνα συγκεντρωμένη γύρω από την τοποθεσία είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την παροχή αξιοποίησιμων πληροφοριών. Η κατανόηση της θέσης κάθε περιουσιακού στοιχείου, σε μια ψηφιακή πλατφόρμα που συνδέει πολλαπλές πηγές δεδομένων, επιτρέπει την έξυπνη διαχείριση κτιρίων. Το ArcGIS IPS¹⁰ αποτελεί προτεινόμενη λύση σε εφαρμογές εύρεσης θέσης και παρακολούθησης χρήστη. Το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επέκταση άλλων πακέτων λογισμικών της ίδιας εταιρίας. Το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Ζυρίχης (ETH

⁴[infsoft Products](#)

⁵[Siemens Healthineers Home Page](#)

⁶[Airport Map, powered by infsoft](#)

⁷[Sewio RTLS](#)

⁸[Budweiser Budvar forklift and tracking use case](#)

⁹[Esri's homepage](#)

¹⁰[Indoor Positioning and Position Tracking](#)

Zurich) αποτελεί περίπτωση χρήσης του λογισμικού¹¹.

3.2 Μέθοδοι και τεχνικές pedestrian dead reckoning

Η τεχνολογία PDR έχει αποτελέσει αντικείμενο έντονης έρευνας και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της ανάγκης για αξιόπιστες λύσεις εσωτερικής πλοήγησης. Στην παρούσα επισκόπηση θα αναφερθούμε σε σημαντικές ερευνητικές εργασίες που έχουν συνεισφέρει στην κατανόηση και βελτίωση του.

Οι μέθοδοι PDR χρησιμοποιούν αισθητήρες που τοποθετούνται πάνω στον χρήστη για να εκτιμήσουν την σχετική θέση του παρά την απόλυτη θέση [5], δηλαδή την μεταβολή της θέσης από την τελευταία καταγραφή. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του σώματος όπως στο στήθος [6], στα πόδια [7-9] ακόμα και στη μέση [10, 11] στοχεύοντας στην εξαγωγή πληροφοριών κίνησης του χρήστη. Πλέον τα τελευταία χρόνια, χάρη στην ανάπτυξη των κινητών τηλεφώνων, παρατηρείται η εκτενής αξιοποίηση των αισθητήρων που προσφέρουν για την προσέγγιση τέτοιων εφαρμογών [3, 12, 13].

Οι δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να διαχωριστούν οι μέθοδοι PDR είναι η χρήση συστημάτων αδρανειακής πλοήγησης (INS), η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη μέθοδος, και σε μεθόδους εύρεσης γεγονότων βηματισμού και εκτίμησης κατεύθυνσης. Τα συστήματα INS παρακολουθούν την θέση του χρήστη εκτιμώντας την τρισδιάστατη τροχιά του χρήστη κάθε δεδομένη στιγμή ενώ τα αντίστοιχα συστήματα αναγνώρισης βημάτων, ανανεώνουν την θέση του χρήστη όταν παρατηρούνται νέα βήματα.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που δύναται να αντιμετωπιστεί κατά την υλοποίηση εφαρμογών PDR είναι η συσσώρευση σφάλματος από τους αισθητήρες. Καθώς το σφάλμα αθροίζεται με την πάροδο του χρόνου η ακρίβεια της θέσης μειώνεται σημαντικά. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, συναντάμε πολλές εφαρμογές που αξιοποιούν τους αισθητήρες του INS σε συνδυασμό με προσαρμοστικά φίλτρα Kalman [14-16] με σκοπό την βελτίωση των εκτιμήσεων τόσο της κατεύθυνσης του χρήστη όσο και της ακριβούς θέσης του. Αντίστοιχες εφαρμογές που βασίζονται στην αναγνώριση βημάτων προσεγγίζουν το πρόβλημα της συσσώρευσης με τον επιπλέον συνδυασμό δεδομένων γυροσκοπίου και μαγνητόμετρου [17] για την βελτίωση εύρεσης της κατεύθυνσης του χρήστη.

Εξίσου μεγάλης σημασίας πρόβλημα που δύνανται να λύσουν τα συστήματα PDR που αξιοποιούν τις συσκευές κινητού τηλεφώνου, πραγματεύεται την αναγνώριση της κίνησης του χρήστη και την επιτυχή μετάφραση των δεδομένων από τους αισθητήρες, είτε λόγω της ποικιλομορφίας του βαδίσματος [18], καθώς ο τρόπος, η ταχύτητα ή η συχνότητα της βάδισης δεν διατηρούνται σταθερά και επομένως επηρεάζεται η ακρίβεια των μετρήσεων, είτε λόγω του χειρισμού της κινητής συσκευής από τον χρήστη. Η τελευταία περίπτωση απαιτεί την αναγνώριση κατάστασης χρήσης του κινητού τηλεφώνου, δηλαδή εάν ο χρήστης κρατάει την συσκευή στο αυτί του ενώ μετακινείται, εάν κουνάει τα χέρια του κρατώντας την συσκευή κ.α. [19]

Παράλληλα, ο εντοπισμός των βημάτων είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της τεχνολογίας PDR, καθώς κάθε βήμα αντιπροσωπεύει μια μετατόπιση στη θέση του πεζού. Υπάρ-

¹¹ETH Zurich Creates a Smart Campus with Indoor GIS

χουν διάφορες τεχνικές για την ανίχνευση των βημάτων όπως η αναζήτηση κορυφών (peak detection), που εντοπίζει κορυφές επιτάχυνσης που αντιστοιχούν σε βήματα [20], και ο εντοπισμός αλλαγής προσήμου (Zero Crossing) όπου εντοπίζει τα σημεία όπου η επιτάχυνση διασχίζει το μηδέν υποδεικνύοντας την έναρξη ή την λήξη ενός βήματος [21]. Επίσης υπάρχουν τεχνικές που συνδυάζουν αυτές τις δύο [22], ενώ η εκτίμηση του μήκους του βήματος βασίζεται σε προσεγγιστικά εμβιομηχανικά μοντέλα [23]. Πλέον όμως έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που πραγματεύονται την δυναμική εκτίμηση του μήκους του βήματος αναλόγως την κίνηση του χρήστη και την κατηγοριοποίηση των βημάτων [24, 25].

3.3 Εντοπισμός θέσης

Η τεχνολογία εσωτερικού εντοπισμού θέσης (Indoor Localization) έχει αναδειχθεί ως μια κρίσιμη τεχνολογία για πολλές εφαρμογές, όπως η πλοήγηση εντός κτιρίων, η παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων, η διαχείριση εκτάκτων αναγκών και η λιανική πώληση. Λόγω των περιορισμών του GPS σε εσωτερικούς χώρους, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες και μέθοδοι για την παροχή ακριβούς εντοπισμού σε τέτοια περιβάλλοντα [26]. Πιο συνηθισμένες τεχνικές αξιοποιούν τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequencies, RF) όπως Wi-Fi [27], Bluetooth Low Energy (BLE) [28] και Ultra-Wideband (UWB) [29] καθώς επίσης και οπτικές [30] και ακουστικές τεχνολογίες [31]. Το κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω μεθόδων είναι η προϋπόθεση ύπαρξης εξωτερικών υποδομών για την ορθή λειτουργία τους. Πολλές φορές οι υποδομές αυτές περιλαμβάνουν περίπλοκο ή εξειδικευμένο εξοπλισμό με υψηλό κόστος εγκατάστασης, ενώ η λειτουργία τους μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες του χώρου μελέτης όπως π.χ. η φωτεινότητα.

Σε πλήρη αντίθεση με τις παραπάνω εφαρμογές, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που αξιοποιούν αδρανειακά συστήματα πλοήγησης και μεθόδους PDR, και χρησιμοποιούν αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια για την εκτίμηση της θέσης ενός χρήστη μέσω της ανίχνευσης βημάτων και του υπολογισμού προσανατολισμού, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εξωτερικής υποδομής. Τέτοιες λύσεις είναι φθηνότερες σε κόστος υλοποίησης αλλά υστερούν σε ακρίβεια μετρήσεων λόγω των σφαλμάτων των αισθητήρων.

Δεδομένης της συσχέτισης των τεχνικών PDR με την εύρεση θέσης, οι αντίστοιχες μέθοδοι localization έχουν ευνοηθεί εξίσου από την ανάπτυξη των κινητών συσκευών και εγγενώς έχουν κληρονομήσει και τα μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν με βασικότερο τον θόρυβο των αισθητήρων. Για την αντιμετώπιση των ανακριβών μετρήσεων, οι τεχνικές PDR συνδυάζονται με την υλοποίηση φίλτρων όπως σύνηθες παράδειγμα είναι τα φίλτρα σωματιδίων (particle filters) [32]. Τα φίλτρα αυτά, σε αντίθεση με τα Kalman, μπορούν και διαχειρίζονται μη γραμμικούς θορύβους. Έτσι για ένα πολυπαραγοντικό και περίπλοκο σύστημα εντοπισμού θέσης εσωτερικού χώρου το οποίο αξιοποιεί τεχνικές PDR, είτε αυτούσιες είτε σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές [18, 33], μπορεί να υλοποιηθεί με μια σχετική ευκολία, καθώς επίσης δίνεται η δυνατότητα στην προσαρμοσμένη μοντελοποίηση του θορύβου [34].

3.3.1 Συνεισφορά εργασίας

Όπως προαναφέρθηκε τα περισσότερα συστήματα localization είτε απαιτούν την αξιοποίηση εξωτερικών διατάξεων είτε την χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, αυξάνοντας έτσι το κόστος και την πολυπλοκότητα των υλοποιήσεων τους. Η παρούσα εργασία προτείνει μια πιο απλή και πιο οικονομική μέθοδο εύρεσης θέσης χρήστη σε εσωτερικό χώρο, αξιοποιώντας την μέθοδο step-based PDR, χρησιμοποιώντας μόλις δύο αισθητήρες από μία κινητή συσκευή (επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο), σε συνδυασμό με ένα φίλτρο σωματιδίων με σκοπό την εξαγωγή νέας πληροφορίας επισκεψιμότητας. Η πληροφορία αυτή γενικεύει τον όρο της θέσης χρήστη περιγράφοντας την τοποθεσία του σε επίπεδο υποσυνόλου του χώρου (τόπος) παρά ακριβής τοποθεσία σε ένα σύστημα συντεταγμένων. Η μέθοδος που προτείνεται αξιοποιείται από μια εφαρμογή χρήστη με το όνομα Inside-mApp¹² η οποία έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Android στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

¹²[Inside-mApp git repository](#)

Κεφάλαιο 4

Υλοποίηση

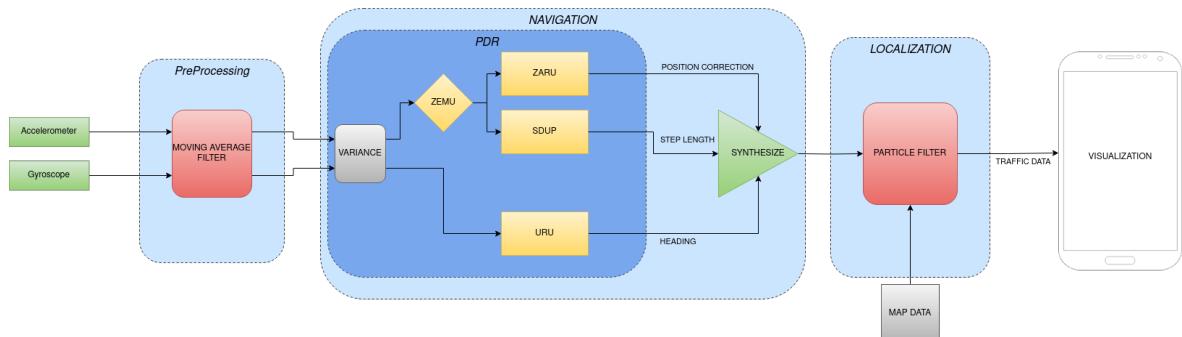
Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την περιγραφή υλοποίησης εφαρμογής κινητού τηλεφώνου Android, η οποία καταγράφει μετρήσεις από τους αισθητήρες κίνησης της συσκευής, τις επεξεργάζεται και έπειτα αναγνωρίζει events βηματισμού και περιστροφής του χρήστη με την υλοποίηση μεθόδου PDR. Τα μεγέθη αυτά στη συνέχεια τροφοδοτούνται στην διαδικασία εύρεσης θέσης, μαζί με τον δεδομένο χάρτη του χώρου ενδιαφέροντος, και χάρη σε ένα PF γίνεται η εξαγωγή της πληροφορίας της θέσης του χρήστη καθώς και η πληροφορία επισκεψιμότητας.

Αρχικά γίνεται η παρουσίαση της αρχιτεκτονικής λογισμικού της εφαρμογής αναδεικνύοντας τα επί μέρους λειτουργικά τμήματα που την απαρτίζουν. Στην συνέχεια γίνεται η περιγραφή των επιμέρους αλγορίθμων και της υλοποίησης αυτών, με την σειρά κατά την οποία διαδίδονται τα δεδομένα. Τέλος, παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη εφαρμογή από μεριάς διεπαφής χρήστη (User Interface (UI)).

4.1 Αρχιτεκτονική Λογισμικού

Όπως φαίνεται στο [Σχήμα 4.1](#), η υλοποίηση του λογισμικού της εφαρμογής χωρίζεται σε τρία βασικά τμήματα:

- Προ-επεξεργασία δεδομένων: Κατά την προ-επεξεργασία δεδομένων γίνονται οι απαραίτητες επεξεργασίες ούτως ώστε τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στα υπόλοιπα τμήματα να είναι εύκολα διαχειρίσιμα και στην κατάλληλη μορφή.



Σχήμα 4.1: Αρχιτεκτονική Συστήματος

- **Πλοίγηση:** Η διαδικασία πλοίγησης είναι υπεύθυνη για την εξαγωγή πληροφορίας βημάτων και περιστροφών του χρήστη. Πρόκειται για την λειτουργική βάση της εφαρμογής καθώς επίσης αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι της υλοποίησης. Αποτελείται από επιμέρους προσαρμοσμένα λειτουργικά τμήματα τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς στην συνέχεια.
- **Εντοπισμός θέσης:** Ουσιαστικά πρόκειται για την υλοποίηση ενός Particle Filter όπου δέχεται ως είσοδο τις αντίστοιχες τιμές μήκους βήματος και αλλαγής κατεύθυνσης από το τμήμα της πλοίγησης. Ως τελικό αποτέλεσμα, παράγει την εκτίμηση θέσης του χρήστη εντός του χώρου ενδιαφέροντος, για τον οποίο παρέχεται ο χάρτης. Παράλληλα με την πληροφορία θέσης, είναι δυνατή η εξαγωγή δεδομένων επισκεψιμότητας του χρήστη για τα διάφορα υποσύνολα του χώρου.

4.1.1 Μετρήσεις αισθητήρων

Οι αισθητήρες λαμβάνουν μετρήσεις ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, που σημαίνει ότι τα δεδομένα που παρέχουν είναι διαθέσιμα ασύγχρονα μεταξύ τους, ακόμα κι αν έχουν ρυθμιστεί στην ίδια συχνότητα λειτουργίας. Όμως η μέθοδος του PDR απαιτεί την ταυτόχρονη διάθεση των μετρήσεων που αντιστοιχούν στην ίδια χρονική στιγμή. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ετεροχρονισμού των δεδομένων αυτό που προτείνεται είναι η παρατήρηση ενός πίνακα, του οποίου κάθε κελί αντιστοιχεί στις μετρήσεις συγκεκριμένου αισθητήρα. Κάθε φορά που καταγράφεται μια καινούργια μέτρηση, αυτή αποθηκεύεται στο αντίστοιχο κελί και ύστερα ελέγχεται εάν ο πίνακας είναι γεμάτος. Όσο ο πίνακας δεν είναι πλήρης, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, με τις νέες μετρήσεις αισθητήρων να αντικαθιστούν τις παλιές στα αντίστοιχα κελιά μέχρις ότου να καταγραφούν μετρήσεις από όλους τους αισθητήρες και να ξεκινήσει η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων.

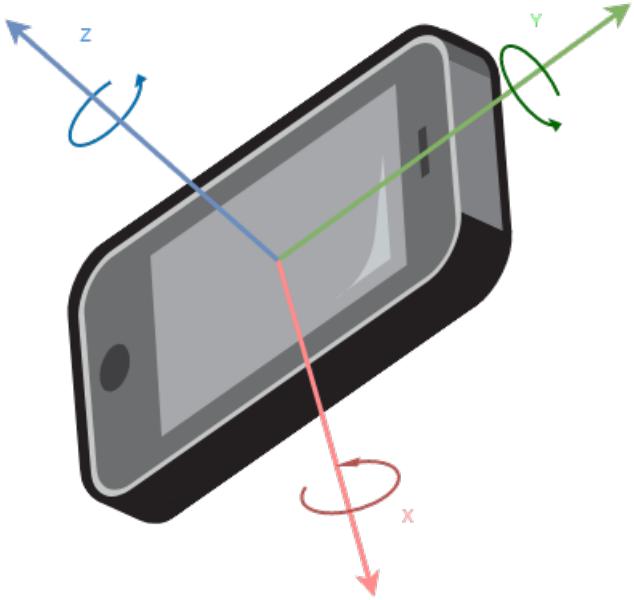
Οι μετρήσεις που παρέχουν οι αισθητήρες που χρησιμοποιεί η εφαρμογή φαίνονται στον [Πίνακα 4.1](#) ενώ το σύστημα συντεταγμένων του κινητού τηλεφώνου ορίζεται σύμφωνα με το [Σχήμα 4.2](#). Στις συσκευές κινητών τηλεφώνων ακολουθείται ο κανόνας δεξιού χεριού για τον ορισμό των θετικών περιστροφών γύρω από τους άξονες. Σημειώνεται πως τα δεδομένα `DeviceMotion.data.acceleration` περιγράφουν την επιτάχυνση της συσκευής δίχως την συμβολή της βαρύτητας.

SensorsClass	members	data	datatype
DeviceMotion	data.acceleration	{x, y, z}	m/s^2
Gyroscope	data	{x, y, z}	rad/s

Πίνακας 4.1: Μορφή δεδομένων αισθητήρων

4.2 Πλοίγηση με χρήση μεθόδου PDR

Η εφαρμογή βασίζεται στην μέθοδο PDR για την αναγνώριση events βημάτων και περιστροφών του χρήστη, και για τον υπολογισμό μήκους του κάθε βήματος καθώς και της γωνίας των περιστροφών που πραγματοποιεί. Αρχικά γίνεται μια προετοιμασία των δεδομένων η οποία είναι απαραίτητη για την λειτουργία των επιμέρους τμημάτων της διαδικασίας πλοίγησης. Τοποθετούνται σε παράθυρα μικρού μήκους W και ταυτόχρονα εισάγονται σε ένα απλό χαμηλοπερατό φίλτρο Κινητού Μέσου Όρου.



Σχήμα 4.2: Σύστημα συντεταγμένων κινητού τηλεφόνου. Για τις περιστροφές λαμβάνεται υπόψιν ο κανόνας του δεξιού χεριού.

Σε επόμενη φάση τα δεδομένα ελέγχονται και αξιοποιούνται από τα επιμέρους προσαρμοσμένα τμήματα (modules) του PDR. Τα modules αυτά ελέγχουν συγκεκριμένες συμπεριφορές του χρήστη, όπως είναι η αναγνώριση βήματος, η αναγνώριση στροφής και η αναγνώριση στασιμότητας, ρυθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εκτίμηση της θέσης και της κατεύθυνσης του χρήστη, ενισχύοντας την μέθοδο του PDR.

Στο σύστημα έχουν εισαχθεί μερικές παραδοχές για την υλοποίηση των αλγορίθμων και την δημιουργία αποτελεσμάτων. Μια από αυτές είναι η παραδοχή ότι ο χρήστης δεν θα περπατάει με ανάποδο βάδισμα. Επίσης μια άλλη παραδοχή είναι ότι οι κινήσεις και οι περιστροφές που κάνει γύρω από τον εαυτό του δεν θα είναι απότομες και πολύ μεγάλες (γωνίες μεγαλύτερες των 120 deg). Οι παραδοχές αυτές γίνονται με σκοπό την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας της εφαρμογής για την παραγωγή των αποτελεσμάτων που επιθυμούμε χωρίς αυτό να σημαίνει την εμφάνιση βλάβης της γενικότητας.

4.2.1 Προ-επεξεργασία Δεδομένων

Εξαιτίας της απαίτησης της λειτουργίας της εφαρμογής σε πραγματικό χρόνο, κάθε νέα μέτρηση δεδομένων από τους αισθητήρες, αποθηκεύεται σε αντίστοιχα παράθυρα τιμών το οποίο διατηρεί τις τελευταίες W τιμές. Αυτό γίνεται για την αποφυγή αποθήκευσης μεγάλου όγκου δεδομένων καθώς αυτό θα προκαλούσε την εμφάνιση καθυστερήσεων στην εφαρμογή. Επομένως, για κάθε στιγμή k από την εκκίνηση της εφαρμογής (4.1α'), (4.1β'):

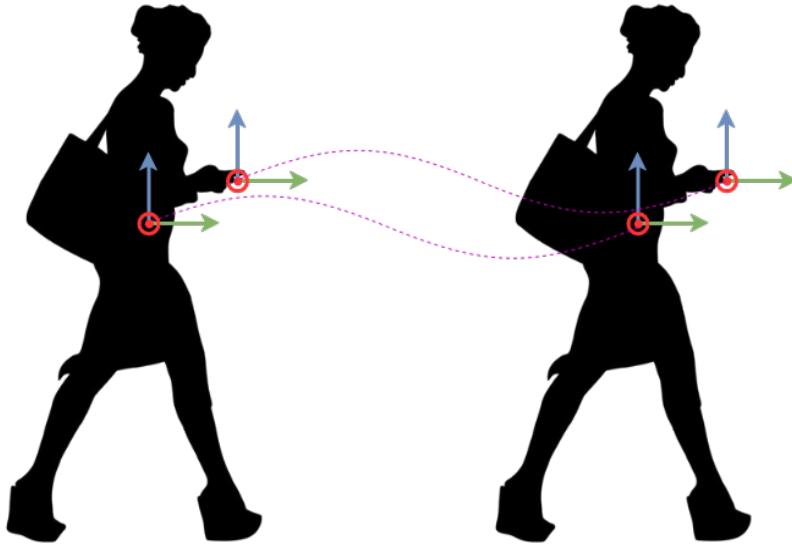
$$DataW = [sensorData_{k-W+1} \quad sensorData_{k-W+2} \quad \dots \quad sensorData_k] \quad (4.1\alpha')$$

όπου,

$$sensorData_i = \{x^i \quad y^i \quad z^i\}, \quad i \in [k - W + 1, k] \quad (4.1\beta')$$

Στην περίπτωση όπου $k \leq W - 1$ τότε τα παράθυρα μετρήσεων έχουν μέγεθος μικρότερο από W και περιέχουν όλες τις μέχρι στιγμής μετρήσεις των αισθητήρων.

Η ανθρώπινη βάδιση μπορεί πολύ εύκολα να γίνει αντιληπτή από επιταχυνσιόμετρα μέσω της ημιτονοειδούς κίνησης του κέντρου βάρος του ατόμου [35] η οποία είναι κατακόρυφη σε σχέση με την κατεύθυνση της κίνησης. Ακολουθώντας την παραδοχή ότι κατά την χρήση της εφαρμογής, ο χρήστης θα κρατάει το κινητό σταθερά μπροστά του με την οθόνη προσανατολισμένη προς τα πάνω, με μεγάλη ασφάλεια μπορεί να γίνει η υπόθεση πως ο άξονας κίνησης του κέντρου βάρους του ατόμου με τον άξονα z της συσκευής είναι παράλληλοι. Συνεπώς η ημιτονοειδής συμπεριφορά του κέντρου βάρους κατά την κίνηση, μεταφέρεται με μεγάλη αξιοπιστία και στον άξονα z της κινητής συσκευής ([Σχήμα 4.3](#)).



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση παραλληλότητας μεταξύ συστημάτων κέντρο βάρους χρήστη και smartphone κατά την κίνηση, σύμφωνα με την παραδοχή ότι ο χρήστης κρατάει σταθερά μπροστά του την συσκευή

Ακολουθώντας την ίδια λογική, εύκολα προκύπτει και το συμπέρασμα πως η μόνη δυνατή περιστροφή του χρήστη ως προς τον χώρο είναι η περιστροφή γύρω από τον άξονα z της συσκευής (yaw rotations). Συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά αποκλειστικότητα οι μετρήσεις αισθητήρων στον άξονα z για τα υποσυστήματα του PDR για την περιγραφή της κίνησης του χρήστη.

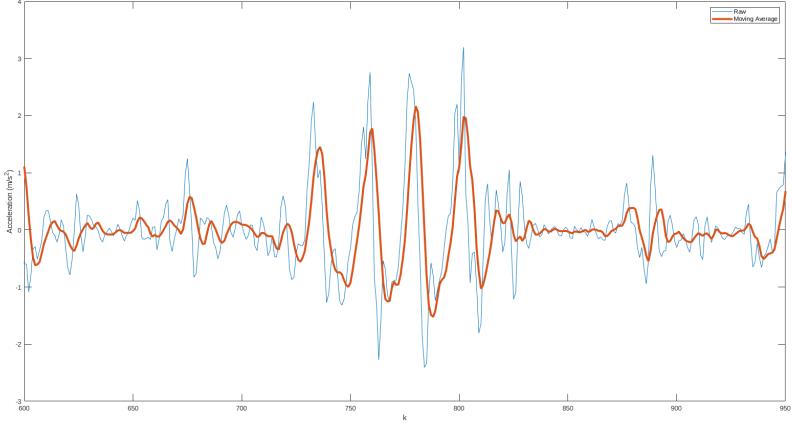
Επειδή όμως τα ακατέργαστα δεδομένα αισθητήρων συμπεριλαμβάνουν και υψηλούς θόρυβο που παράγουν οι αισθητήρες, γίνεται μια προσπάθεια αφαίρεσης αυτού μέσω της εξομάλυνσης των δεδομένων αξιοποιώντας την συμπεριφορά ενός φίλτρου KMO (βλ. [υποενότητα 2.3.1](#)). Έπειτα τα δεδομένα αποθηκέυονται σε αντίστοιχους πίνακες όπως περιγράφεται στις ([4.2α](#)), ([4.2β](#)):

$$DataLowPass_z = \begin{bmatrix} z_{lp}^0 & z_{lp}^1 & \dots & z_{lp}^{k-1} & z_{lp}^k \end{bmatrix} \quad (4.2\alpha')$$

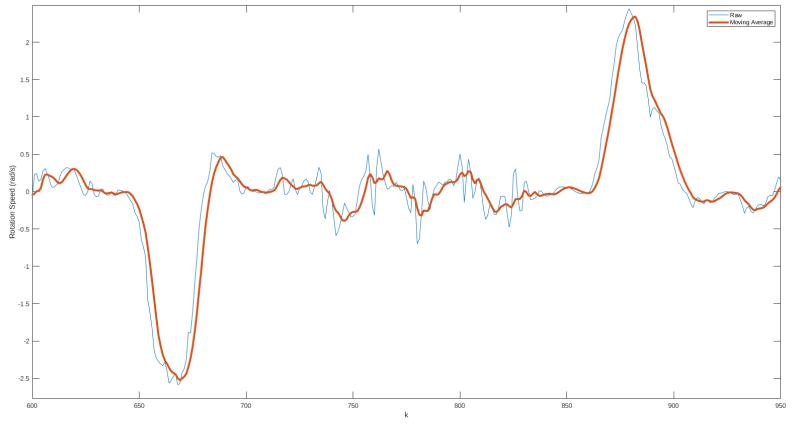
όπου,

$$z_{lp}^i = \frac{1}{N} \sum_{m=i-N+1}^i z^m \quad W \leq i \leq k, N = 6 \quad (4.2\beta')$$

Στο [Σχήμα 4.4](#) με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι ακατέργαστες μετρήσεις των αισθητήρων ενώ με κόκκινο τα αντίστοιχα φιλτραρισμένα σύμφωνα με τη ([4.2β](#)). Πιο συγκε-



(α') Επιτάχυνση



(β') Γωνιακή ταχύτητα

Σχήμα 4.4: Στο σχήμα, με μπλε απεικονίζονται τα ακατέργαστα δεδομένα και με κόκκινο τα δεδομένα KMO

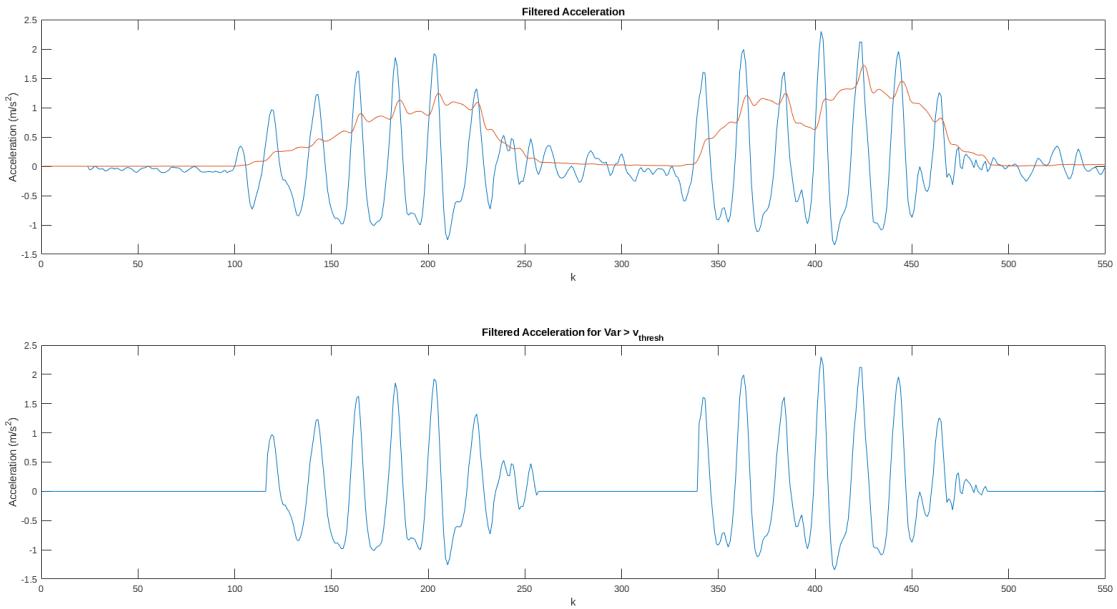
κριμένα στο [Σχήμα 4.4α'](#) αναπαριστώνται δεδομένα επιτάχυνσης, και στο [Σχήμα 4.4β'](#), δεδομένα γωνιακής ταχύτητας. Τα δεδομένα του Σχήματος αντιστοιχούν στο ίδιο χρονικό παράθυρο και περιγράφουν την διαδοχή μιας επιτόπιας δεξιάς περιστροφής, μετακίνησης τεσσάρων βημάτων και παύσης, και μιας επιτόπιας αριστερής περιστροφής.

4.2.2 ZErO Movement Update (ZEMU)

Η Ενημέρωση Μηδενικής Κίνησης είναι εμπνευσμένη από την αντίστοιχη μέθοδο Zero Velocity Update [14]. Αποτελεί το προσαρμοσμένο τμήμα της μεθόδου PDR που είναι υπεύθυνο για την αναγνώριση στασιμότητας του χρήστη όσον αφορά την θέση του. Στην ουσία πρόκειται για τον πρώτο έλεγχο που πραγματοποιείται μετά την επεξεργασία των μετρήσεων των αισθητήρων, ο οποίος όταν ικανοποιηθεί θέτει τις αντίστοιχες τιμές στα μεγέθη αλλαγής ταχύτητας και διατηρεί την προηγούμενη θέση του χρήστη ως έχει.

Η μέθοδος αυτή δέχεται σαν είσοδο τα φιλτραρισμένα δεδομένα, υπολογίζει τη διακύμανσή της επιτάχυνσης και τελικά συγκρίνει το αποτέλεσμα με ένα κατώτατο όριο αναγνώρισης κίνησης χρήστη. Στην περίπτωση που η διακύμανση δεν ξεπερνάει αυτό

το όριο, τότε υποθέτουμε ότι ο χρήστης δεν μετακινείται στον χώρο. Ειδάλλως καταγράφεται ότι ο χρήστης είναι εν κινήσει και συνεχίζεται η ροή της μεθόδου PDR στις επόμενες υποδιαδικασίες. Στο πάνω μέρος στο [Σχήμα 4.5](#) εμφανίζονται τα δεδομένα επιτάχυνσης μαζί με την διακύμανση συγκεκριμένου μεγέθους μετρήσεων για κάθε χρονική στιγμή k . Παρατηρούμε πως κατά την βάδιση του χρήστη, η διακύμανση της επιτάχυνσης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τις περιόδους στάσης.



Σχήμα 4.5: Φίλτραρισμένα δεδομένα επιτάχυνσης με την διακύμανση αυτών (πάνω) και δεδομένα επιτάχυνσης εντός πεδίων κατάστασης κίνησης (κάτω)

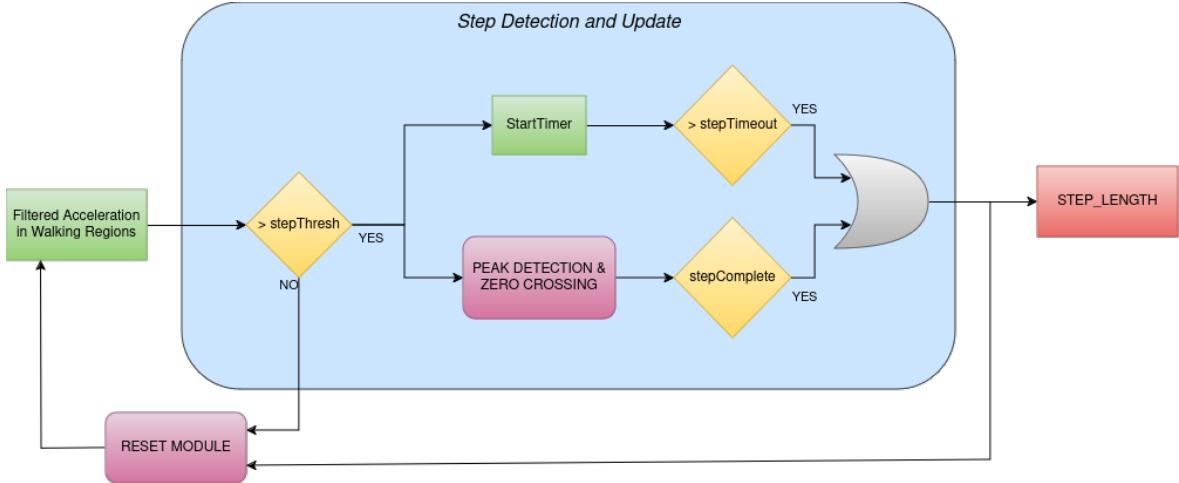
4.2.3 Zero Angular Rotation Update (ZARU)

Κατά το περιπάτημα, δεν συνηθίζεται ένας άνθρωπος να πραγματοποιεί απότομες περιστροφές γύρω από τον εαυτό του όταν επιθυμεί να αλλάξει κατεύθυνση. Κυρίως τείνει να διατηρεί την κατεύθυνση της βάδισής του, δεδομένου ότι περπατάει σε ελεύθερο χώρο. Με βάση αυτή την παρατήρηση, λαμβάνεται η παραδοχή ότι κατά την διάρκεια μετακίνησης του χρήστη στον χώρο, δεν θα αποκλίνει σε μεγάλο βαθμό από μια ευθεία διαδρομή. Συνεπώς δεν λαμβάνονται υπόψιν περιπτώσεις αταξικού βαδίσματος για την ορθή λειτουργία της εφαρμογής.

Για αυτόν τον λόγο, στην περίπτωση που παρατηρείται μετακίνηση του χρήστη μέσω του ZEMU, ενεργοποιείται η μέθοδος Ενημέρωσης Μηδενικής Κίνησης η οποία προσπαθεί να διατηρήσει την κατεύθυνση του χρήστη, που παρατηρήθηκε στην αρχή της κίνησης, σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν σκοπεύει σε κάποιον έλεγχο παρά μόνο στην αναγνώριση και διόρθωση της απόκλισης των μετρήσεων σε σχέση με την κατεύθυνση του χρήστη κατά την έναρξη της κίνησής του. Ως απόκλιση θεωρείται η γωνία μεταξύ της σταθερής κατεύθυνσης του χρήστη και του ευθύγραμμου τμήματος των τελευταίων δύο θέσεων βημάτων.

4.2.4 Step Detection and UPdate (SDUP)

Το σύστημα Εντοπισμού βήματος και Ενημέρωσης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υποσυστήματα που αναπτύχθηκαν για την υλοποίηση της εφαρμογής. Πρόκειται για την βάση της διαδικασίας PDR καθώς, όπως προδίδει και η ονομασία του, είναι το λειτουργικό τμήμα που εντοπίζει τα events βημάτων την στιγμή που γίνονται, ενώ παράλληλα υπολογίζει το μήκος του κάθε βήματος. Η αποτυχία ή η εσφαλμένη αναγνώριση βήματος μπορεί να οδηγήσει σε πολύ σημαντικά σφάλματα εντοπισμού της θέσης ενός χρήστη. Η ορθή λειτουργία της εν λόγω διαδικασίας είναι αδιαμφισβήτητα υψίστης σημασίας.



Σχήμα 4.6: Αρχιτεκτονική λειτουργίας SDUP

Όποτε η διαδικασία ZEMU εντοπίζει την ύπαρξη κίνησης του χρήστη, τότε ενεργοποιείται η διαδικασία SDUP. Ως είσοδο δέχεται μία ακολουθία των δεδομένων της χαμηλοπερατής επιτάχυνσης και μια σειρά από διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω, παρέχει ως έξοδο μια λογική τιμή που ενεργοποιείται την στιγμή που αναγνωρίζεται το βήμα, ενώ παράλληλα ενημερώνονται οι τιμές της θέσης και ταχύτητας του χρήστη. Στο [Σχήμα 4.6](#) απεικονίζεται ένα περιεκτικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής της διαδικασίας SDUP.

Εντοπισμός βήματος

Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους εντοπισμού βήματος σε εφαρμογές PDR αποτελεί η μέθοδος αναγνώρισης κορυφών peak detection του σήματος επιτάχυνσης κατά την διάρκεια της κίνησης [13, 17, 19, 35, 36] καθώς επίσης και η μέθοδος zero-crossing [21, 25]. Η διαδικασία που αναπτύχθηκε για την αναγνώριση γεγονότων βήματος, χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό των δύο μεθόδων έτσι ώστε να επιτευχθεί η ευρωστία της διαδικασίας και να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα που εμφανίζονται στους αλγορίθμους εντοπισμού βήματος (π.χ. εσφαλμένες κορυφές, εξάλειψη βήματος κ.α.).

Αρχικά η λογική μεταβλητή, STEP_DETECTED, λαμβάνει την λογική τιμή 1 όταν κατά την ανάγνωση των δεδομένων της επιτάχυνσης, παρατηρηθεί η πρώτη προσπέραση του κατωφλίου βηματισμού step detection threshold και την διατηρεί καθ' όλη την διάρκεια της κατάστασης αιώρησης (Swing Phase) του κύκλου βάδισης (βλ. [ενότητα 2.2](#)). Ταυτόχρονα ξεκινάει και η καταγραφή του χρόνου διάρκειας αιώρησης. Παράλληλα γίνεται ο έλεγχος zero-crossing με την βοήθεια της λογικής μεταβλητής ZERO_CROSS

η οποία παίρνει την λογική τιμή 1 όταν το σήμα της επιτάχυνσης αλλάζει πρόσημο για πρώτη φορά (από + σε -) κατά την διάρκεια της κατάστασης αιώρησης. Ο εντοπισμός του βήματος και η επιτυχής καταγραφή του ολοκληρώνεται είτε κατά την δεύτερη αλλαγή πρόσημου της επιτάχυνσης είτε όταν η αιώρηση ξεπεράσει ένα μέγιστο χρονικό όριο STEP_TIMEOUT.

Εκτίμηση μήκους βήματος

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι υπολογισμού του μήκους του βήματος με επικρατέστερη την πρόταση του Weinberg [23] όπου ορίζει το μήκος του βήματος που ορίζεται μεταξύ δύο ετερόσημων κορυφών ως:

$$stepLength \approx K \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}} \quad (4.3)$$

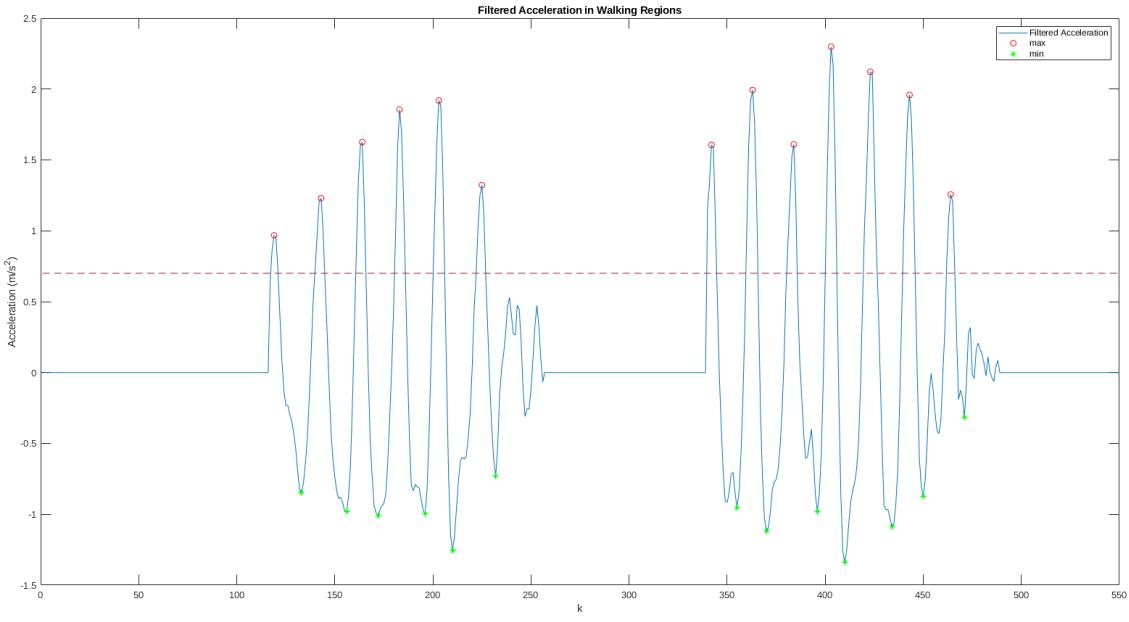
όπου K είναι σταθερά για την μετατροπή μονάδων μέτρησης, και a_{max} , a_{min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της επιτάχυνσης αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, για την εκτίμηση του μήκους βήματος απαιτείται η εύρεση της σταθεράς K . Επομένως από την (4.3) έχουμε

$$K = \frac{\sqrt[4]{a_{max} - a_{min}}}{stepLength} \quad (4.4)$$

, όμως επειδή δεν είναι πρακτικό, πειραματικά να καταγράφουμε το μήκος του κάθε βήματος, προσεγγίζουμε την εύρεση του K για το μήκος ολόκληρης της απόστασης των καταγραφών σύμφωνα με τ (4.5):

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}}}{\sum_{i=1}^n stepLength} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}}}{distanceTraveled} \quad (4.5)$$

Κατά την διάρκεια του βηματισμού γίνεται η ταυτόχρονη αναζήτηση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της επιτάχυνσης οι οποίες αποθηκεύονται σε αντίστοιχες μεταβλητές SDUP_MAX και SDUP_MIN. Στο Σχήμα 4.7 με κόκκινους κύκλους απεικονίζονται τα μέγιστα του κάθε ξεχωριστού βήματος ενώ με πράσινους αστερίσκους τα ελάχιστα. Κάθε βήμα ορίζεται από ένα ζευγάρι μέγιστου-ελάχιστου. Η διακεκομμένη ευθεία παρουσιάζει το όριο επιτάχυνσης που χρειάζεται να ξεπεραστεί ώστε να εντοπιστεί ένα νέο βήμα. Με το πέρας της αιώρησης, και της επιτυχούς καταγραφής νέου βήματος, τα δεδομένα επιτάχυνσης όλων των προηγούμενων στιγμών αποδεσμεύονται από την μνήμη, ενώ οι μεταβλητές ελέγχου και αναζήτησης μεγίστων/ελαχίστων της μεθόδου επαναφέρονται στις αρχικές τους τιμές και πλέον το module περιμένει μέχρι την επόμενη καταγραφή βήματος.



Σχήμα 4.7: Εύρεση μέγιστων/ ελαχίστων για κάθε βήμα

Στον [Πίνακα 4.2](#) παρουσιάζονται οι μεταβλητές του υποσυστήματος ενώ περιγράφονται συνοπτικά οι λειτουργίες τους.

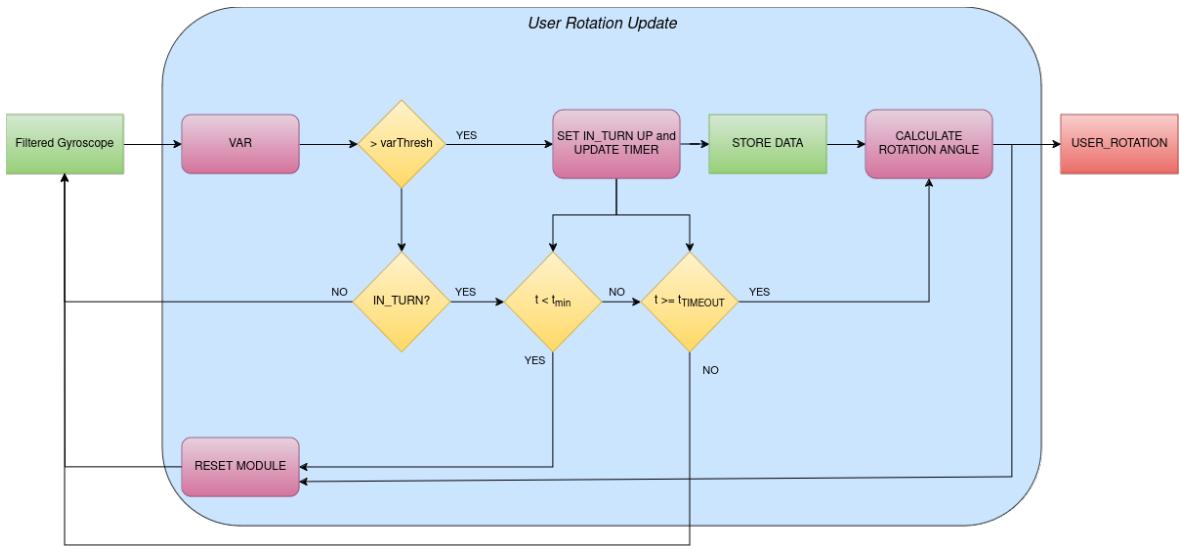
Όνομα μεταβλητής	Τύπος μεταβλητής	Περιγραφή
STEP_DETECTED	boolean	Μεταβλητή κατάστασης εντοπισμού βήματος.
ZERO_CROSS	boolean	Μεταβλητή ένδειξης zero-crossing.
STEP_TIMEOUT	number	Μέγιστο χρονικό όριο πραγματοποίησης βήματος.
SDUP_MAX	number	Μέγιστη τιμή επιτάχυνσης εντός βήματος
SDUP_MIN	number	Ελάχιστη τιμή επιτάχυνσης εντός βήματος

Πίνακας 4.2: Πίνακας σημαιών/παραμέτρων διαδικασίας SDUP

4.2.5 User Rotation Update (URU)

Η δεύτερη βασική διαδικασία που απαιτεί ένα PDR module για την ορθή λειτουργία του, είναι η εύρεση της κατεύθυνσης του χρήστη. Μέσω της ποσοτικοποίησης του μεγέθους των στροφών του χρήστη σε συνδυασμό με τον εντοπισμό των βημάτων και του μήκους αυτών, γίνεται διαθέσιμος ο προσανατολισμός του χρήστη στον χώρο. Η εύρεση και η εκτίμηση του προσανατολισμού έχει αποτελέσει κύριο αντικείμενο μελέτης

για την ανάπτυξη εφαρμογών PDR [15, 37–39]. Η πεπατημένη στην επίλυση του προβλήματος εκτίμησης της κατεύθυνσης είναι ο συνδυασμός των αισθητήρων INS μαζί με την υλοποίηση ενός Error State-based Kalman φίλτρου [5] καθώς οι αισθητήρες όπως τα γυροσκόπια και τα μαγνητόμετρα χαρακτηρίζονται από την εισαγωγή σημαντικών μεγεθών σφαλμάτων στις μετρήσεις τους. Επομένως υπάρχει ο κίνδυνος συσσώρευσης σφαλμάτων (Drift Error) έχοντας σαν αποτέλεσμα την ανάλογη στον χρόνο αύξηση αποκλίσεων από την πραγματική κατάσταση του χρήστη. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται ένα συνοπτικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής της μεθόδου που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.8: Αρχιτεκτονική λειτουργίας URU

Εντοπισμός Περιστροφών

Ακολουθώντας την ίδια λογική της μεθόδου SDUP, η μέθοδος Ενημέρωσης Περιστροφής Χρήστη αναγνωρίζει μέσω της διακύμανσης των δεδομένων του γυροσκοπίου, το πότε ο χρήστης πραγματοποιεί κάποια περιστροφή γύρω από τον εαυτό του ή όχι. Καθώς ικανοποιείται η συνθήκη περιστροφής για πρώτη φορά, το σύστημα ορίζει τον χρήστη σε κατάσταση περιστροφής και ταυτόχρονα εκκινείται η καταγραφή της χρονικής διάρκειας της στροφής. Στο εντωμεταξύ τα δεδομένα από το γυροσκόπιο αποθηκεύονται σε μια ουρά μετρήσεων μέχρι η κατάσταση περιστροφής να τερματιστεί. Η περιστροφή τερματίζεται όταν η διακύμανση των δεδομένων δεν ξεπεράσει το όριο αναγνώρισης περιστροφής και ο χρόνος της στροφής είναι είτε μικρότερος από ένα ελάχιστο είτε μεγαλύτερος από ένα μέγιστο χρονικό όριο. Στην περίπτωση που ο χρόνος είναι μικρότερος από το κάτω όριο, τότε η στροφή απορρίπτεται εξ αιτίας της παραδοχής ότι δεν πραγματοποιούνται απότομες στροφές κατά την βάσιση ενός ατόμου. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν ο χρόνος είναι επαρκώς μεγάλος τότε η διαδικασία URU συνεχίζει επιτυχώς στην διαδικασία υπολογισμού της γωνίας της περιστροφής.

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται συνοπτικά σύμφωνα με τον αλγόριθμο 1:

Algorithm 1 Εντοπισμός περιστροφών

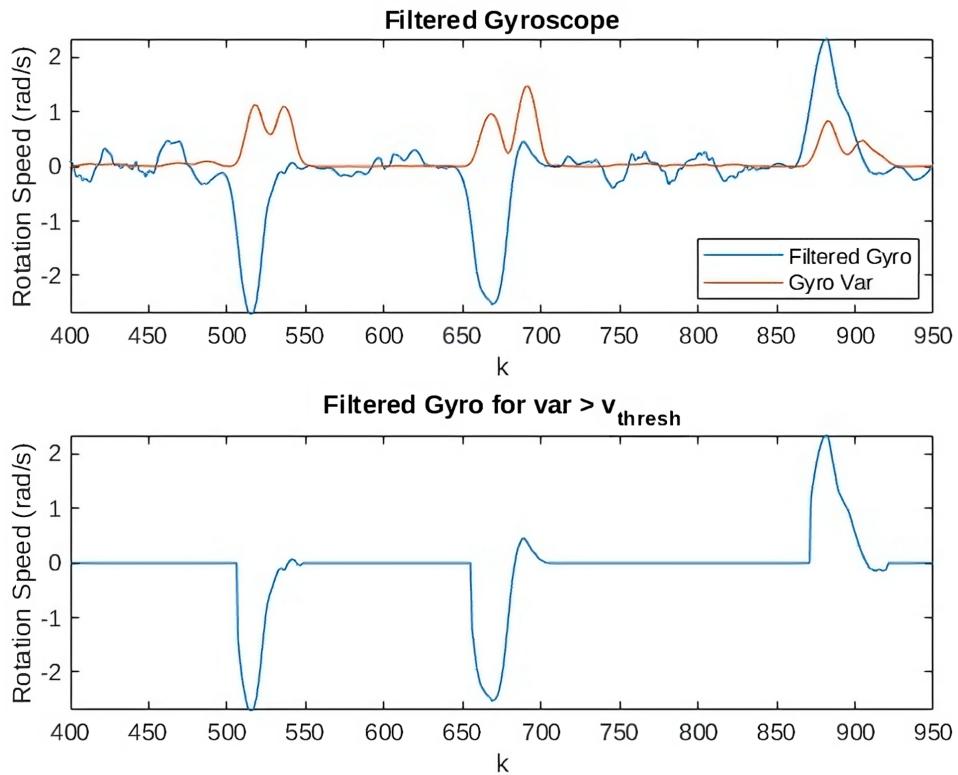
Require: $g_{var} = \text{VAR}(gyroscopeData(t - w, t))$

```

IN_TURN ← 0
URU_TIMEOUT ← 0
TURN_BUFFER ← []
if  $g_{var} > URU\_THRESH$  then
    IN_TURN ← 1
    URU_TIMEOUT ← URU_TIMEOUT +  $\delta t$ 
    TURN_BUFFER ← gyroscopeData( $t$ )
end if
if  $g_{var} < URU\_THRESH$  &  $URU\_TIMEOUT < MIN_t$  then
    IN_TURN ← 0
    URU_TIMEOUT ← 0
    TURN_BUFFER ← []
else if  $g_{var} < URU\_THRESH$  &  $URU\_TIMEOUT > MAX_t$  then
    CALCULATE_TURN_ANGLE
    IN_TURN ← 0
end if

```

Στο [Σχήμα 4.9](#) απεικονίζονται τα φιλτραρισμένα δεδομένα γωνιακής ταχύτητας μαζί με ακολουθία διακύμανσης σταθερού παραθύρου για κάθε στιγμή k καθώς και οι περιοχές κατάστασης περιστροφής του χρήστη.



Σχήμα 4.9: Φιλτραρισμένα μηνύματα γωνιακής ταχύτητας με την διακύμανση αυτών (πάνω) και δεδομένα γωνιακής ταχύτητας εντός πεδίων κατάστασης περιστροφής (κάτω)

Εκτίμιση Στροφής

Καθ' όλη την διάρκεια που η διαδικασία βρίσκεται σε κατάσταση περιστροφής και η αντίστοιχη σημαία ικανοποιείται, οι καινούργιες μετρήσεις από το χαμηλοπερατό σήμα του γυροσκοπίου αποθηκεύονται στην δυναμική ουρά δεδομένων. Η αποθήκευση των τιμών που ικανοποιούν τις προϋποθέσεις περιστροφής συνεχίζεται μέχρις ότου καταγραφεί με επιτυχία η περιστροφή ή να απορριφθεί. Στην περίπτωση της απόρριψης, τα δεδομένα θεωρούνται ως δεδομένα λάθος συναγερμού (false alarm) και αποδεσμεύονται από την ουρά ενώ η διαδικασία επαναφέρεται στην αρχική της κατάσταση όπου περιμένει τον εντοπισμό της επόμενης περιστροφής.

Στην περίπτωση της επιτυχούς αναγνώρισης και ολοκλήρωσης της περιστροφής, εκκινείται η διαδικασία υπολογισμού της γωνίας αυτής. Για την κάθε ξεχωριστή περιοχή περιστροφής, εφαρμόζεται η αναζήτηση του ακρότατου (μέγιστο για αριστερόστροφη κίνηση, ελάχιστο για δεξιόστροφη) και παράλληλα υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών εντός της περιοχής, με σκοπό την προσέγγιση της γωνίας σύμφωνα με τις (4.6α)-(4.6γ):

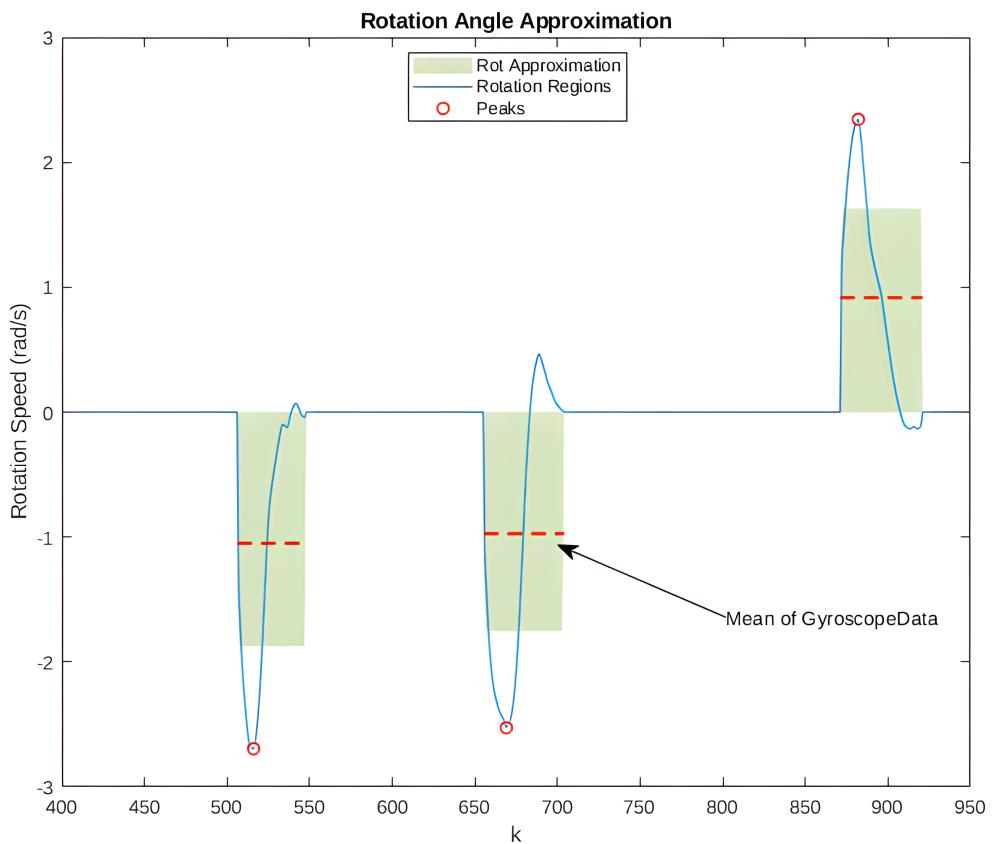
$$g_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i, \quad n = \text{length}(TurningWindow) \quad (4.6\alpha')$$

$$g_{peak} = \left\{ g_i \mid |g_i| = \max(|g_1|, |g_2|, \dots, |g_{n-1}|, |g_n|) \right\} \quad (4.6\beta')$$

$$rotationAngle = \frac{1}{2}(g_m + g_{peak})t_{turn} \quad (4.6\gamma)$$

όπου g_m ο μέσος όρος των τιμών γωνιακής ταχύτητας εντός του πεδίου της στροφής προς υπολογισμό, g_{peak} η μέγιστη τιμή μετρήσεων και t_{turn} η χρονική διάρκεια του παραθύρου. Δηλαδή υπολογίζεται ο μέσος μεταξύ της μέσης τιμής των δεδομένων παραθύρου με την κορυφή. Η γωνία μετά προσεγγίζεται πολλαπλασιάζοντας αυτήν την ταχύτητα με τον συνολικό χρόνο του παραθύρου. Στο [Σχήμα 4.10](#) απεικονίζεται με οπτικό τρόπο η μέθοδος εκτίμησης της γωνίας. Χωρίς όμως βλάβη της γενικότητας, ορίζονται ως πιθανές γωνίες χρήστη μια από τις τιμές $0 \pm 45^\circ \pm 90^\circ$, μετατρέπουμε την εκτιμώμενη γωνία σε μια από αυτές βάσει με το ποια τιμή βρίσκεται πιο κοντά της ώστε να την εισάγουμε ως είσοδο στο στάδιο του Particle Filter Localization.

Οι λειτουργικές μεταβλητές που αναφέρθηκαν παραπάνω παραθέτονται στον [Πίνακα 4.3](#) όπου περιγράφεται συνοπτικά ο ρόλος τους για την υλοποίηση της μεθόδου.



Σχήμα 4.10: Οπτικοποίηση εκτίμησης γωνίας περιστροφής

Όνομα μεταβλητής	Τύπος μεταβλητής	Περιγραφή
turn_flag	boolean	Σημαία ενεργοποίησης στροφής και αποθήκευσης δεδομένων γωνιακής ταχύτητας. Λαμβάνει την λογική τιμή 1 κάθε φορά που $var^2 \geq var_{thresh}$
IN_TURN	boolean	Ενεργοποιείται στην εκκίνηση της περιστροφής και περιμένει την επίλυση (resolve) ή την απόρριψη της
TURN_TIMEOUT	number	Μέγιστο χρονικό όριο αναμονής πραγματοποίησης βήματος.
TURN_BUFFER	Array[numbers]	Η ουρά αποθήκευσης δεδομένων γωνιακής ταχύτητας

4.3 PF Localization

Η επίλυση του προβλήματος της εντοπισμού θέσης, βασίζεται στην υλοποίηση Particle Filter, η αρχή λειτουργίας του οποίου βασίζεται στην διασπορά ενός πλήθους σωματίδιων N τα οποία προσομοιώνουν τις πιθανές καταστάσεις συστήματος. Κάθε σωματίδιο αντιστοιχίζεται μια τιμή βάρους (weight) το οποίο περιγράφει την πιθανότητα η κατάσταση που περιγράφει το σωματίδιο να είναι η πραγματική (Ground Truth). Η πιθανότητα αυτή καθορίζεται σύμφωνα με ένα σύνολο συμπερασμάτων και παρατηρήσεων, συνήθως βασιζόμενων από το περιβάλλοντα χώρο του συστήματος.

Το PF το οποίο αναπτύχθηκε για τον σκοπό της εργασίας, δέχεται ως είσοδο την έξοδο από το σύστημα PDR, δηλαδή την πληροφορία μήκους βήματος, όταν αυτό πραγματοποιείται, και πληροφορία περιστροφής χρήστη. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την νέα θέση σωματίδιων σύμφωνα μέσα στον χώρο με τις (4.7α)-(4.7β):

$$x_{new} = x_{old} + l \cos \theta \quad (4.7\alpha)$$

$$y_{new} = y_{old} + l \sin \theta \quad (4.7\beta)$$

όπου με l συμβολίζουμε το μήκος βήματος και με θ την γωνία κατεύθυνσης του χρήστη. Λαμβάνοντας όμως υπόψιν σφάλματα που μπορεί να εισαχθεί είτε από τις μετρήσεις των αισθητήρων είτε και από τους υπολογισμούς των διαδικασιών, το μήκος βήματος και η κατεύθυνση μοντελοποιούνται ως εξής:

$$l' = l + \delta l$$

$$\theta' = \theta + \delta \theta$$

όπου με δl συμβολίζουμε το σφάλμα βηματισμού και με $\delta \theta$ το σφάλμα στροφής/κατεύθυνσης του χρήστη. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, τα σφάλματα επιλέγονται μέσω μιας ομοιόμορφης πιθανότητας κατανομής με το σφάλμα του μήκους βήματος $\delta l \sim N(0, 0.2 m)$ ενώ το σφάλμα της περιστροφής επιλέγεται ως $\delta \theta \sim N(0, 5^\circ)$. Η εκτίμηση της θέσης του χρήστη αποτυπώνεται ανά πάσα στιγμή πάνω στον χάρτη του χώρου στον οποίο βρίσκεται υπολογίζοντας τον σταθμικό μέσο όρο των k -καλύτερων από N σωματίδιων σύμφωνα με την (2.1):

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i p_i}{\sum_{i=1}^k w_i}, \quad 0 < k \leq N; \quad (4.8)$$

όπου \hat{p} είναι το σωματίδιο που περιγράφει την εκτιμώμενη κατάσταση του χρήστη και p_i τα k σωματίδια με τις μεγαλύτερες τιμές βάρους w_i . Σημειώνεται πως το \hat{p} δεν ταυτίζεται απαραίτητα σε ήδη υπαρκτό σωματίδιο, και μπορεί να πάρει τιμές εκτός του συνόλου των p_i .

4.3.1 Χάρτες και δεδομένα

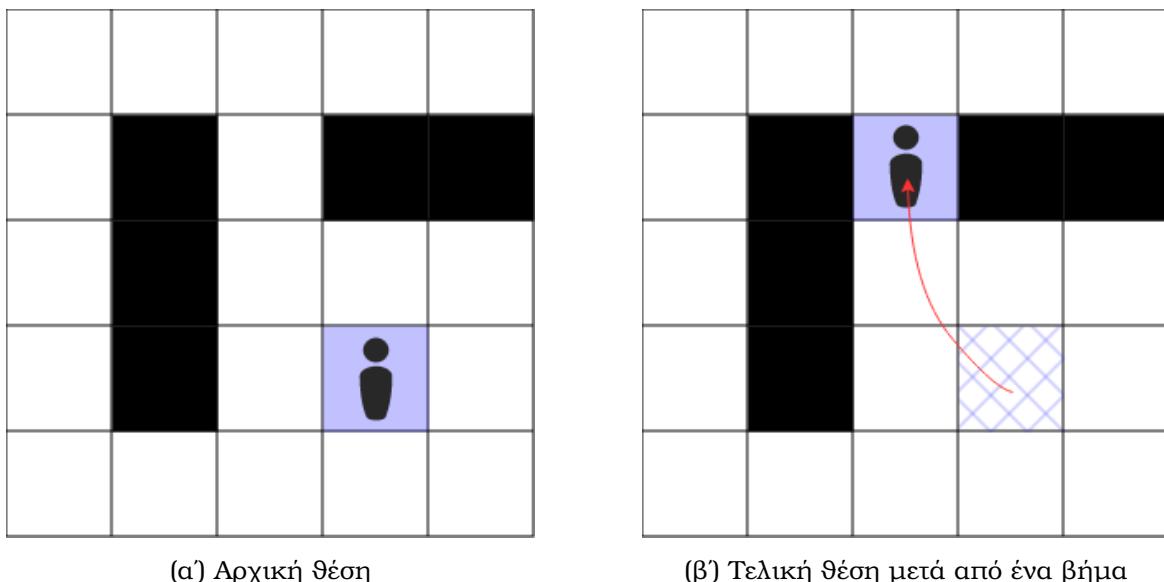
Στις περισσότερες εφαρμογές που πραγματεύονται εντοπισμό θέσης ενός συστήματος σε εσωτερικό χώρο, για την απεικόνιση αυτού χρησιμοποιούνται χάρτες πληρότητας (occupancy maps) (βλ. [ενότητα 2.4](#)). Συνηθίζεται οι χάρτες αυτοί να είναι δυαδικοί, δηλαδή κάθε κελί (pixel) του χάρτη, να λαμβάνει λογικές τιμές 1 και 0 οι οποίες δηλώνουν εάν το κελί είναι κατειλημμένο ή όχι αντίστοιχα. Συνήθως, η αιτία κατάληψης ενός κελιού σε χάρτη εσωτερικού χώρου οφείλεται στην ύπαρξη τοίχου, πόρτας, επίπλου

ή κάποιου άλλου εμποδίου. Η τοποθεσία του χρήστη, ανά πάσα στιγμή, καθορίζεται από ένα αντίστοιχο κελί του δυαδικού χάρτη ([Σχήμα 4.11α](#)).

Βασικά χαρακτηριστικά ενός χάρτη είναι το μέγεθος του πίνακα occupancy matrix από τον οποίο περιγράφεται, και το μέγεθος του resolution. Η ανάλυση μεταφράζει την σχέση των μεγεθών του δυαδικού πίνακα με τις διαστάσεις του πραγματικού χώρου και μετριέται είτε σε $m/cells$ όπως χρησιμοποιείται στο λογισμικό ROS¹ (Robot Operating System), ή σε $cells/m$ όπως χρησιμοποιείται στο περιβάλλον της Matlab².

Επομένως η αντίστοιχη θέσης του χρήστη ακολουθεί την διακριτοποίηση της μέτρησης της πραγματικής του θέσης μέσα στον χώρο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χάρτη. Συνεπώς η μετακίνηση της θέσης στον χάρτη δεν σημαίνει απαραίτητα την μετακίνηση μεταξύ διαδοχικών κελιών, όπως φαίνεται και στο [Σχήμα 4.11](#). Παρόλο που πολλές φορές ένας άνθρωπος στην πραγματικότητα μπορεί να περιτυγηθεί ανάμεσα σε έπιπλα και άλλα μικρά εμπόδια, στα πλαίσια της εργασίας όλα τα κατειλημμένα κελιά θεωρούνται απροσπέλαστα ανεξαρτήτως τι είδους εμπόδιο είναι.

Στην παρούσα εργασία ακολουθείται το πρότυπο $m/cells$ μιας και η χειροκίνητη σχεδίαση των αντίστοιχων χώρων έγινε στο περιβάλλον Matlab.



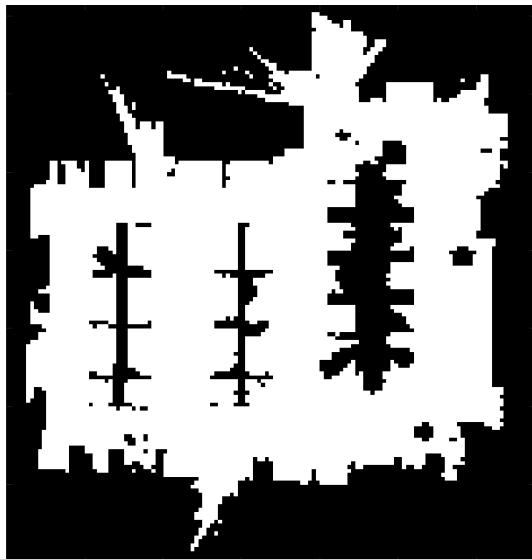
Σχήμα 4.11: Ενδεικτικό παράδειγμα μετακίνησης του χρήστη εντός περιβάλλοντός χάρτη

Η διαθεσιμότητα ενός τέτοιου χάρτη ικανοποιείται είτε μέσω της δημιουργίας αυτού από εξειδικευμένα συστήματα που διαθέτουν αισθητήρες μεγάλης ακρίβειας όπως φαίνεται στο [Σχήμα 4.12α](#), είτε μέσω της χειροκίνητης σχεδίασης τους από τρίτο περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού ([Σχήμα 4.12β](#)). Τα μαύρα κελιά των εικόνων αντιστοιχούν στα απροσπέλαστα μέρη του χώρου ενώ τα λευκά ορίζουν την περιοχή δυνατότητας περιήγησης του χρήστη.

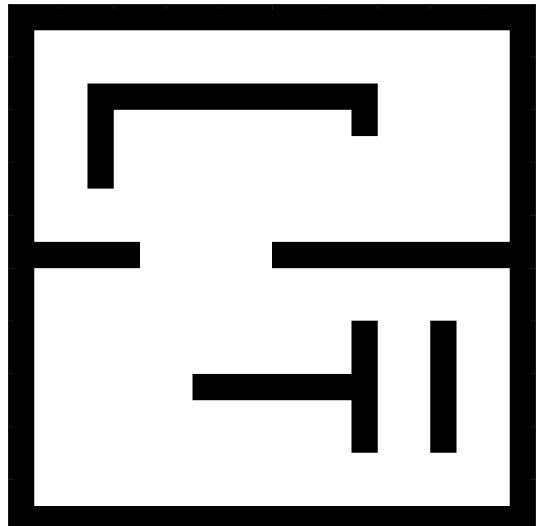
Για την παρούσα διπλωματική εργασία διατίθενται δύο χάρτες διαφορετικών χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα ο ένας χάρτης απεικονίζει το εργαστήριο αρχιτεκτονικής

¹[ROS use of resolution](#)

²[MathWork's use of resolution](#)



(α) Εξαγόμενος χάρτης από εξειδικευμένο σύστημα



(β') Χειροκίνητα σχεδιασμένος χάρτης

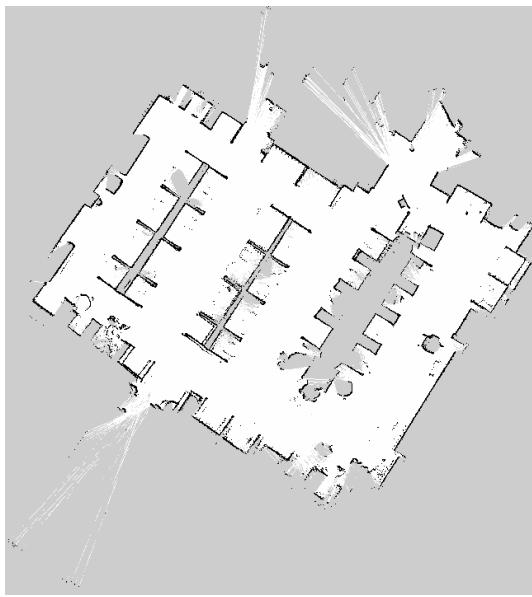
Σχήμα 4.12: Παραδείγματα δυαδικών χαρτών πληρότητας

υπολογιστών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου και ο δεύτερος την κάτοψη οικιακού χώρου.

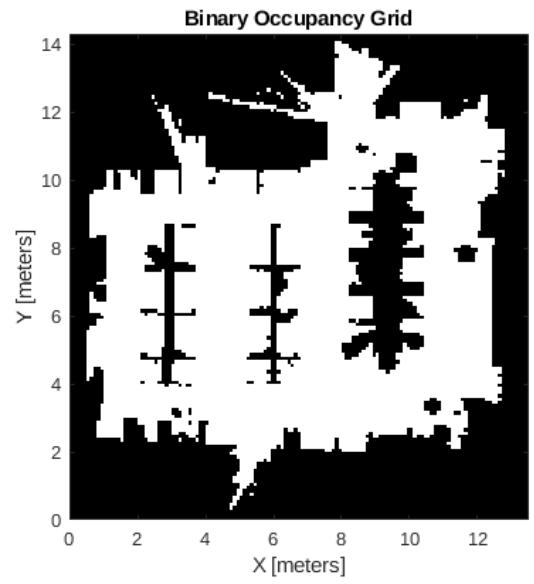
Οι δύο χάρτες διαφέρουν τόσο στο περιβάλλον που απεικονίζουν όσο και στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάστηκαν. Ο χάρτης του εργαστηρίου δημιουργήθηκε μέσω αλγορίθμου SLAM(simultaneous Localization and Mapping) με χρήση LiDAR (Light Detection and Ranging), ενώ ο χάρτης του ορόφου σπιτιού σχεδιάστηκε χειροκίνητα μέσα από το περιβάλλον της Matlab³ για τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Στον χάρτη του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες επεξεργασίες για να καταλήξει στην τελική μορφή, και πιο συγκεκριμένα η μετατροπή του χάρτη από grayscale Map σε binary Map, η περιστροφή της εικόνας του, και η μείωση του resolution, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.13. Από την άλλη, η απεικόνιση του χώρου του καθιστικού δεν είναι τόσο πιστή ή αξιόπιστη όσο του εργαστηρίου καθώς η καταγραφή των μετρήσεων των διαστάσεων, τόσο του χώρου αλλά και των εμποδίων/επίπλων που περιλαμβάνονται σε αυτόν, έγιναν χειροκίνητα, και βάσει αυτών έγινε η σχεδίαση. Επίσης, για κάθε χάρτη έχει οριστεί και ένας αντίστοιχος κατακερματισμός του χώρου για τον ορισμό περιοχών με σκοπό την δημιουργία συνθηκών μέτρησης της επισκεψιμότητας αυτών. Στο Σχήμα 4.14 διακρίνονται οι αντίστοιχοι υποχώροι του εργαστηρίου που επιλέχτηκαν, όπου με κόκκινο αντιστοιχίζεται ο χώρος γύρω από τους ηλεκτρολογικούς πάγκους, με πράσινο οι μικρότερες νησίδες και με μπλε ο διάδρομος που ενώνει τις δύο αυτές περιοχές με την είσοδο/έξοδο. Για τον χάρτη του οικιακού χώρου, σύμφωνα με το Σχήμα 4.15α', ο συνολικός χώρος αποτελείται από την κουζίνα (πράσινο), το σαλόνι (μπλε), την τραπεζαρία (μωβ) και τον χώρο-διάδρομο που ενώνει τις 3 παραπάνω τοποθεσίες.

Για την λειτουργία της εφαρμογής, τα δεδομένα των χαρτών είναι αποθηκευμένα στην κινητή συσκευή σε μορφή .json και η δομή τους περιγράφεται σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4. Έτσι ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μέσω της εφαρμογής τον χώρο στον

³Matlab Binary Occupancy Map

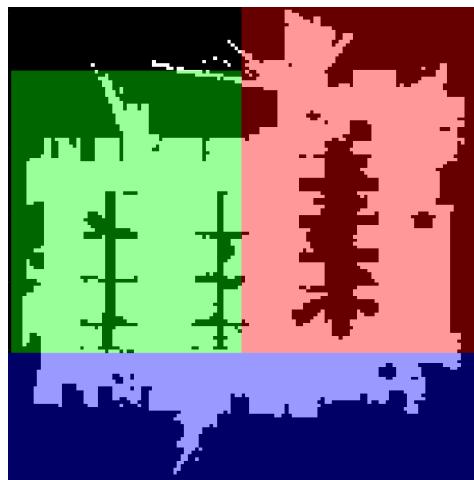


(α) Αρχικός χάρτης



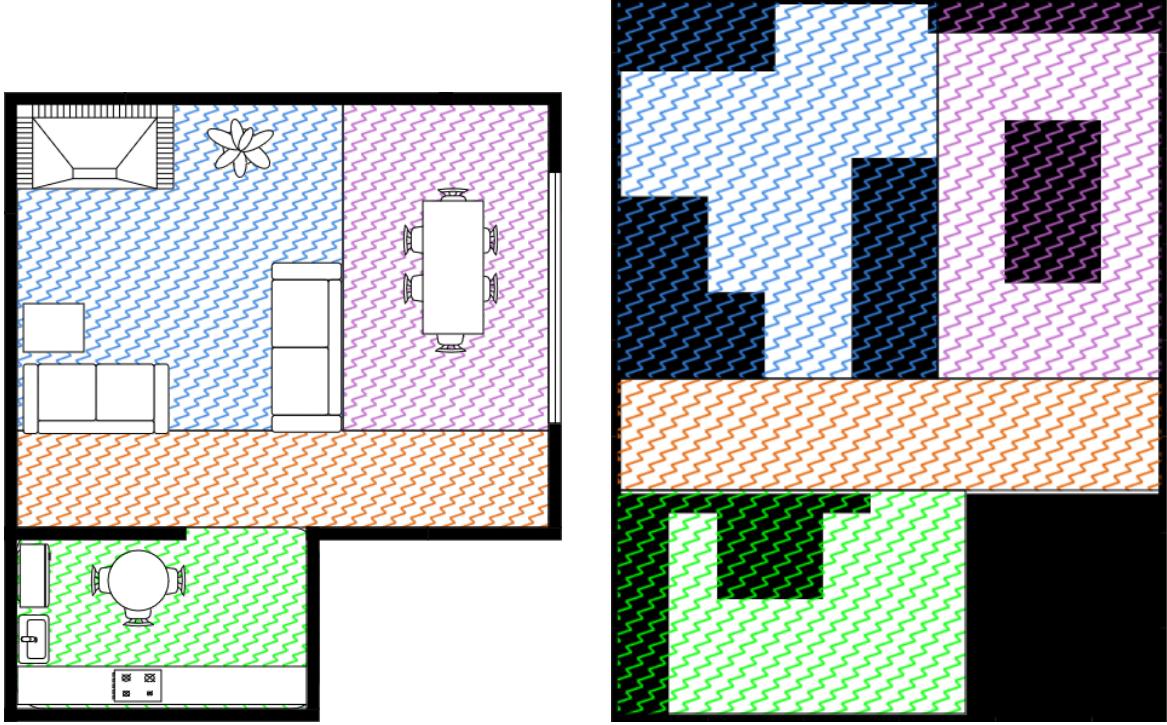
(β) Τελικός χάρτης

Σχήμα 4.13: Επεξεργασία χάρτη εργαστηρίου



Σχήμα 4.14: Κατακερματισμός τοποθεσιών του χώρου του εργαστηρίου.

οποίο επιθυμεί να περιηγηθεί και τα δεδομένα μεταφέρονται αυτόματα στην εφαρμογή όπου και επεξεργάζονται αναλόγως. Τα μεγέθη των δωματίων, εκτός του κλειδιού id, μεταφράζονται στα κελιά του αντίστοιχο δυαδικού πίνακα πληρότητας.



(α') Προσέγγιση κάτοψης ορόφου και κατακερματισμός χώρου

(β') Χάρτης πληρότητας και αντίστοιχος κατακερματισμός χώρου

Σχήμα 4.15: Προσεγγιστική απεικόνιση της κάτοψης και κατακερματισμού και αντίστοιχος πίνακας πληρότητας

binaryMap	Πίνακας πληρότητας	
size	Μέγεθος πίνακα	
resolution	Ανάλυση	
imageName	όνομα αντίστοιχης εικόνας	
extension	μορφή αρχείου εικόνας	
rooms	id	κλειδί
	x	κορυφή x δωματίου
	y	κορυφή y δωματίου
	w	πλάτος δωματίου
	h	ύψος δωματίου

Πίνακας 4.4: Μορφή δεδομένων χάρτη

4.3.2 Ενημέρωση Βαρών

Όπως αναφέρθηκε και στην [υποενότητα 2.6.2](#), κάθε σωματίδιο του φίλτρου αντιστοιχίζεται με ένα βάρος το οποίο λαμβάνεται από μια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της πραγματικής κατάστασης του συστήματος που μελετάται. Επομένως, σε κάθε αλλαγή της κατάστασης των σωματιδίων ανατίθεται μια νέα τιμή βάρους η οποία μορφοποιείται σύμφωνα με ένα σύνολο παρατηρήσεων και μετρήσεων του συστήματος και περιορισμών από το περιβάλλον. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπου το κάθε σωματίδιο περιγράφει την κατάσταση του χρήστη σε έναν εσωτερικό χώρο, η ανάθεση του βάρους βασίζεται σε κανόνες που περιγράφουν κυρίως τους περιορισμούς που ορίζονται από

τα απροσπέλαστα κελιά του χώρου. Για παράδειγμα, ένας προφανής κανόνας είναι ότι η θέση του δεν γίνεται να αντιστοιχεί σε κατειλημμένο κελί του χάρτη. Στην περίπτωση, λοιπόν, που ένα σωματίδιο παραβιάσει κάποιον κανόνα, αυτομάτως 'τιμωρείται' και το βάρος αυτού λαμβάνει μηδενική τιμή, οπότε παύει να συμβάλει στην εκτίμηση της θέσης χρήστη.

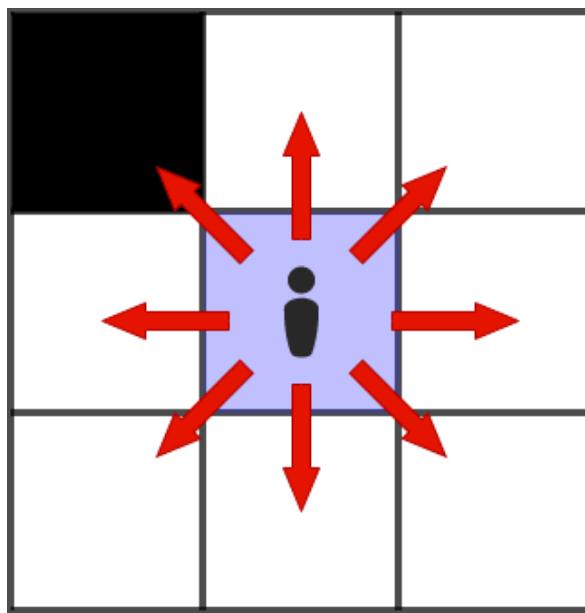
Παράλληλα είναι δυνατή η δημιουργία άλλων αντίστοιχων κανόνων που δεν σκοπεύουν στην αποφυγή παραβιάσεων και άμεσου εκμηδενισμού των σωματιδίων παρά αξιολογούν με έναν συντελεστή την κατάσταση την οποία περιγράφουν, όπως π.χ. ο κανόνας ότι δεν συνηθίζεται ένας άνθρωπος να περπατάει πολύ κοντά στους τοίχους ενός εσωτερικού χώρου. Συνεπώς μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους κανόνες είτε σε αυστηρούς (strict) είτε σε χαλαρούς (loose).

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η ανάθεση των βαρών επιτυγχάνεται με την υλοποίηση των παρακάτω κανόνων:

- Ο χρήστης δεν μπορεί να βρίσκεται εντός κατειλημμένου κελιού. (Αυστηρός)
- Ο χρήστης να απέχει μια ελάχιστη απόσταση από τα εμπόδια του χώρου (Χαλαρός)

Έλεγχος αποστάσεων από εμπόδια

Ο έλεγχος απόστασης ενός σωματιδίου υλοποιείται με την παράλληλη αναζήτηση απροσπέλαστων κελιών μέσα στον πίνακα πληρότητας, από την θέση του κάθε σωματιδίου όλων των πιθανών κατευθύνσεων ([Σχήμα 4.16](#)). Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψιν τις διαστάσεις ενός ανθρώπου, ορίζεται μια ελάχιστη απόσταση χρήστη-εμποδίου/τοίχου για την οποία θεωρούμε ότι κάτω από αυτή είναι λιγότερο πιθανή η περιήγηση ενός ατόμου. Παρά ταύτα, δεν εκμηδενίζεται το βάρος ενός σωματιδίου που παραβιάζει αυτή την συνθήκη καθώς πρόκειται για έλεγχο χαλαρού κανόνα. Αντιθέτως, ανάλογα το πόσο κοντά είναι σε εμπόδιο, καθώς επίσης και από πόσες κατευθύνσεις είναι κοντά, αντιστοιχίζεται ένας συντελεστής δυναμικής του βάρους potential. Για



Σχήμα 4.16: Κατευθύνσεις εύρεσης εμποδίων

κάθε σωματίδιο πραγματοποιείται ο παράλληλος έλεγχος σε κάθε κατεύθυνση για τον α-

ριθμό των κελιών που αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση. Στη συνέχεια καταγράφονται οι n κατευθύνσεις που παραβιάζουν τον κανόνα μαζί με τις εν λόγω αποστάσεις. Έπειτα ο συντελεστής που ανατίθεται χαρακτηρίζεται ως το γινόμενο δύο παραγόντων:

- Παράγοντας ελεύθερου χώρου
- Παράγοντας απόστασης εμποδίων

Ο παράγοντας ελεύθερου χώρου ορίζεται ο λόγος των $8 - n$ κατευθύνσεων στις οποίες ο χρήστης δεν είναι κοντά σε κάποιο εμπόδιο, προς τις 8 πιθανές κατευθύνσεις, ενώ ο παράγοντας απόστασης εμποδίων ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης παρατηρούμενης απόστασης από τις n κατευθύνσεις που είναι κοντά στον τοίχο, προς το αντίστοιχο κατώφλι απόστασης.

Έτσι ο συντελεστής δυναμικού ορίζεται σύμφωνα με την (4.9)

$$potential = \frac{8 - n}{8} \frac{\min_{i=1}^n d_i}{minWallDist} \quad (4.9)$$

όπου d_i οι αντίστοιχες καταγεγραμμένες αποστάσεις από τα εμπόδια. Για τις διαγώνιες κατευθύνσεις του πλέγματος είναι πολύ πιθανό να ισχύει $d_i \geq minWallDist$, επομένως δίνεται την δυνατότητα της διόρθωσης του συντελεστή όταν υπάρχουν εμπόδια μόνο σε διαγώνιες κατευθύνσεις. Υπενθυμίζεται πως ο αριθμός των κελιών που αντιστοιχεί στην ελάχιστη αυτή απόσταση, είναι ανάλογος με την ανάλυση *resolution* του πίνακα.

4.3.3 Επαναδειγματοληψία

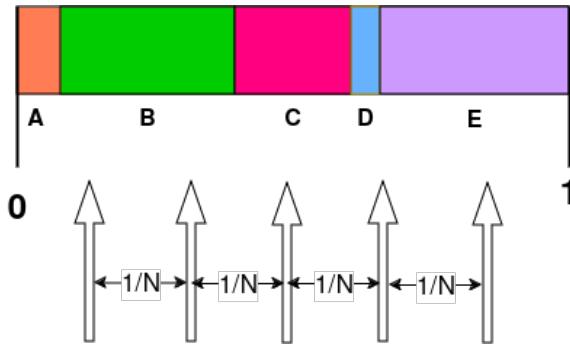
Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν για το στάδιο της επαναδειγματοληψίας του φίλτρου σωματιδίων [40]. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιείται η μέθοδος systematic resampling, της οποίας η αρχή λειτουργίας βασίζεται σε μια ψευδοτυχαία διαδικασία επιλογής καλύτερων σωματιδίων όταν αυτή απαιτείται.

Αρχικά η διαδικασία της επαναδειγματοληψίας εκτελείται όταν ο συντελεστής ενεργοποίησης της διαδικασίας N_{eff} (4.10) πέσει κάτω από ένα όριο συναρτήσει του μεγέθους του φίλτρου $N/2$, όπου N ο αριθμός σωματιδίων του φίλτρου. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται:

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i^2} \quad (4.10)$$

όπου w_i συμβολίζει το κανονικοποιημένο βάρος του i -οστού σωματιδίου, δηλαδή πρέπει $\sum_{i=1}^N w_i = 1$.

Έπειτα, αφού ενεργοποιηθεί η διαδικασία επαναδειγματοληψίας, υπολογίζεται ο πίνακας με το συγκεντρωτικό άθροισμα των κανονικοποιημένων βαρών των σωματιδίων χωρίζοντάς το διάστημα $[0, 1]$ σε υποπληθυσμούς όπως φαίνεται στο [Σχήμα 4.17](#), και ταυτόχρονα επιλέγεται τυχαία από μια ομοιόμορφη κατανομή η αρχική τυχαία τιμή επιλογής $u_0 \in (0, \frac{1}{N}]$. Για κάθε τυχαίο αριθμό $u_i = u_0 + \frac{n-1}{N}$, $n = 2, 3 \dots N$ επιλέγεται το σωματίδιο του οποίου η υποπεριοχή περιλαμβάνει το u_i



Σχήμα 4.17: Διαδικασία επιλογής σωματιδίων. Το μέγεθος των τμημάτων είναι ίσο με το βάρος του αντίστοιχου σωματιδίου

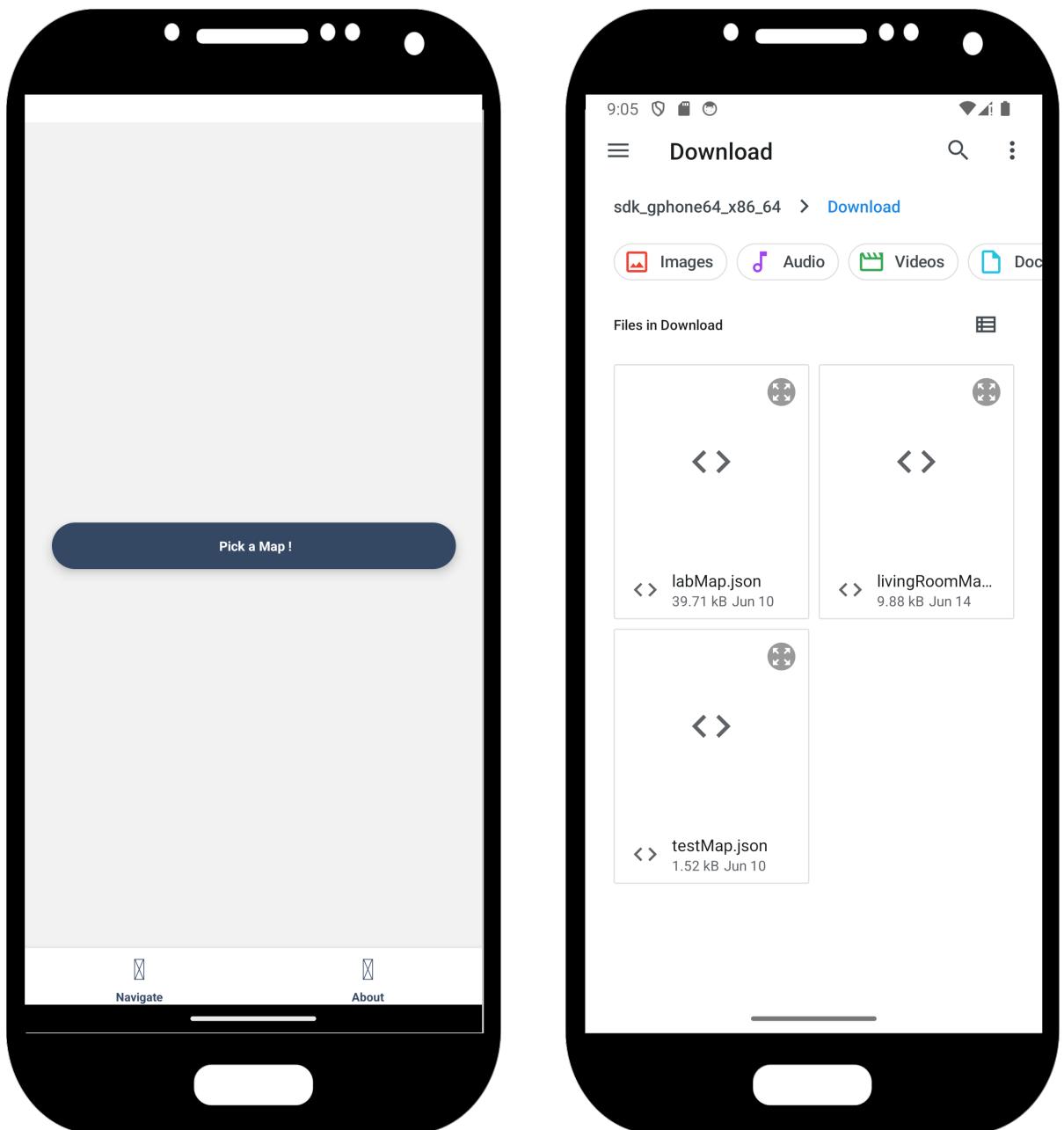
Επιλέγεται αυτή η μέθοδος διότι είναι απλή στην υλοποίηση και η χαμηλή πολυπλοκότητα ($O(n)$) δεν επιβαρύνει υπολογιστικά την κινητή συσκευή.

4.4 Εφαρμογή Χρήστη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, έχει αναπτυχθεί το περιβάλλον Inside-mApp⁴ το οποίο πρόκειται για την εφαρμογή χρήστη Android η οποία εκτελεί όλες τις προαναφερθείσες διαδικασίες, ενώ προσφέρει επιπλέον λειτουργίες στον χρήστη για την διευκόλυνση της χρήσης της. Η υλοποίησή της έγινε με την βοήθεια των γλωσσών προγραμματισμού JavaScript και ReactNative.

Αρχικά η εφαρμογή ζητάει από τον χρήστη την επιλογή αρχείου χάρτη το οποίο όπως προαναφέρθηκε είναι σε μορφή .json και η δομή του περιγράφεται στον Πίνακα 4.4. Κατά την εκκίνηση της εφαρμογής η αρχική ενέργεια που απαιτείται από τον χρήστη είναι η επιλογή του χάρτη στον οποίο θα περιηγηθεί. Αυτό το επιτυγχάνει με την βοήθεια κουμπιού που παραπέμπει τον χρήστη στο σύστημα διαχείρισης αρχείων της κινητής συσκευής (Σχήμα 4.18).

⁴[Inside-mApp git repository](#)

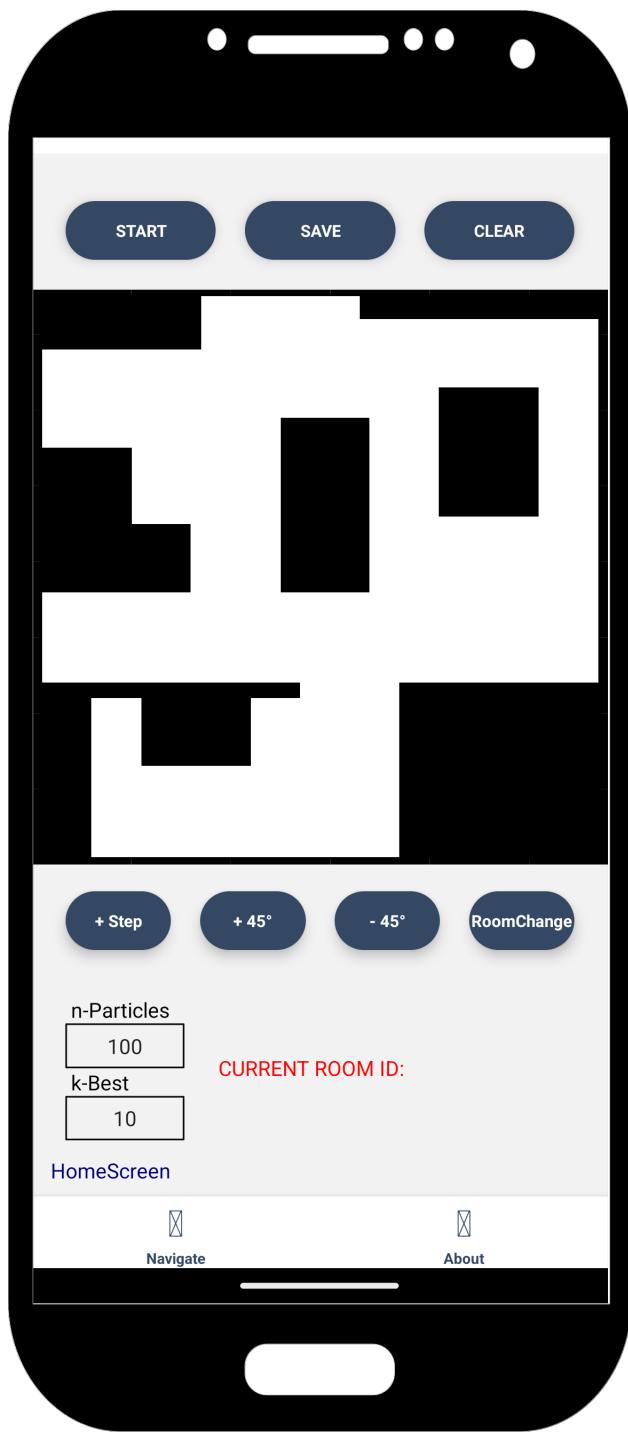


(α') Αρχική οθόνη και κουμπί επιλογής χάρτη

(β') Χειριστής αρχείων κινητού και αρχεία χαρτών

Σχήμα 4.18: Επιλογή χάρτη μέσω της εφαρμογής Inside-mApp

Έπειτα αφού επιλεχθεί επιτυχώς ένας από τους αποθηκευμένους χάρτες, αυτός εμφανίζεται στο κέντρο της οθόνης μαζί με ένα σετ κουμπιών βασικών λειτουργιών, βοηθητικών λειτουργιών καθώς και ένα ζευγάρι διαχειρίσιμων μεταβλητών συστήματος (αριθμός σωματιδίων, συμβολή σωματιδίων). Η διάταξη που περιγράφηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19: Εμφάνιση επιλεγμένου χάρτη και οθόνη λειτουργιών

Οι βασικές λειτουργίες ενεργοποιούνται από το πάνω μέρος της οθόνης και αποτελούνται από :

- Start/Stop: Λειτουργία εκκίνησης/παύσης της καταγραφής δεδομένων από τους αισθητήρες και επεξεργασίας αυτών από την εφαρμογή. Για την μετακίνηση του χρήστη και τον εντοπισμό της θέσης μέσα σε αυτόν απαιτείται το πάτημα του κουμπιού.
- Save: Η λειτουργία α αποθήκευσης δίνει την δυνατότητά στον χρήστη να απο-

Θηκεύσει τα δεδομένα των αισθητήρων καθώς και τα δεδομένα που παράχθηκαν κατά την διαδικασία της συνεδρίας, όπως την αλληλουχία των θέσεών του.

- Clear: Πρόκειται για την λειτουργία εκκαθάρισης δεδομένων και επαναφοράς της εφαρμογής στην αρχική κατάσταση. Καθαρίζει από την μνήμη οποιαδήποτε πληροφορία από αισθητήρες έχει καταγράφει, αδειάζει τον χάρτη και επαναφέρει τις μεταβλητές του συστήματος στην αρχική τους τιμή.

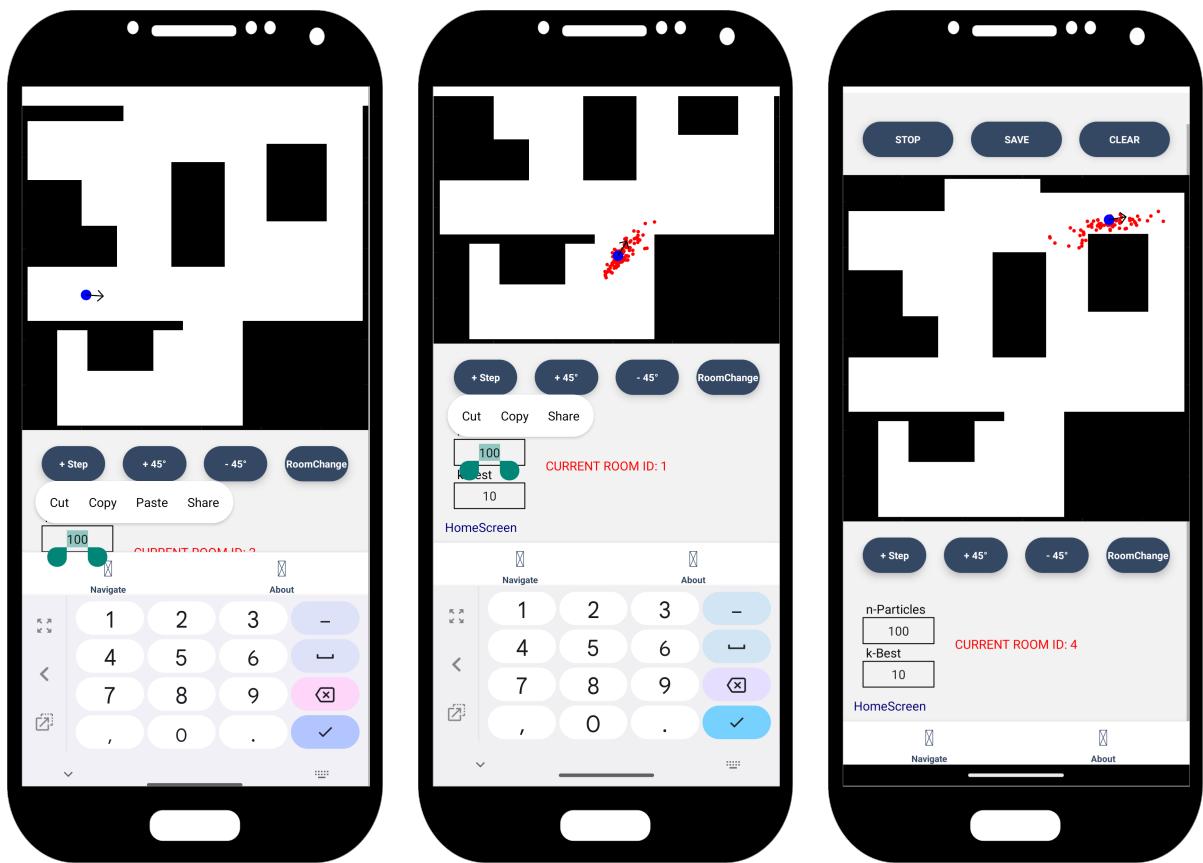
Κάτω από την εικόνα του χάρτη διακρίνονται οι βοηθητικές λειτουργίες οι οποίες αποτελούνται από:

- +Step: Πρόκειται για την βοηθητική λειτουργία πρόσθεσης ενός βήματος στην εκτίμηση της θέσης του χρήστη στην οθόνη. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κίνηση του χρήστη στα πλαίσια της δοκιμής των αλγορίθμων αλλά μπορεί και να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια της κίνησης, αν χρειαστεί, για την διόρθωση τυχών αποκλίσεων.
- $\pm 45^\circ$: Μετατοπίζει την κατεύθυνση του χρήστη εντός χάρτη κατά 45 μοίρες προς τα αριστερά. Υπενθυμίζεται πως η σύμβαση που ακολουθείται είναι αυτή του δεξιού χεριού, εξ ου και το + για την αριστερή στροφή. Αντίστοιχη λειτουργία πραγματοποιεί το κουμπί -45° και προφανώς αλλάζει την κατεύθυνση του χρήστη κατά 45 μοίρες δεξιά.
- RoomChange: Πρόκειται για βοήθημα που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της πειραματικής μελέτης της εφαρμογής. Όσο ο χρήστης περιηγείται εντός του χώρου, καθώς αλλάζει δωμάτια, καλείται να πατήσει το κουμπί έτσι ώστε να καταγράψει στα δεδομένα προς αποθήκευση το χρόνο-βήμα στο οποίο έγινε η αλλαγή, ούτως ώστε να συγκριθεί με τα αποτελέσματα που εμφανίζει εκείνη την στιγμή η οθόνη.
- HomePage: Βρίσκεται κάτω από τις υπόλοιπες βοηθητικές λειτουργίες και πρόκειται για την λειτουργία επιστροφής στην αρχική σελίδα ούτως ώστε ο χρήστης να έχει την δυνατότητα να αλλάξει χάρτη αν το επιθυμεί.

Επίσης χαμηλά στην οθόνη εμφανίζονται με κόκκινη γραμματοσειρά το αναγνωριστικό κλειδί του δωματίου που βρίσκεται ο χρήστης κάθε στιγμή και στα δεξιά δύο πλαίσια εισαγωγής για την επιτόπου αλλαγή του αριθμού των σωματιδίων N του φίλτρου που εκτελείται καθώς και τον αριθμό $k-best$ των σωματιδίων που συμβάλλουν στην εκτίμηση της θέσης.

Η εφαρμογή δίνει την επιπλέον δυνατότητα στον χρήστη να διαλέξει την αρχική του θέση μέσα στον χάρτη πατώντας διπλά πάνω στον χάρτη το σημείο που επιθυμεί να διαλέξει. Ταυτόχρονα εάν το επιθυμεί, πατώντας παρατεταμένα το σημείο εκκίνησης που διάλεξε, μπορεί να διαλέξει την αρχική του κατεύθυνση απλά σέρνοντας το δάχτυλό του προς την κατεύθυνση εκείνη.

Στο [Σχήμα 4.20](#) φαίνονται η επιλογή της αρχικής θέσης, η δυνατότητα αλλαγής των τιμών των παραμέτρων συστήματος και η πληροφορία αναγνωριστικού κλειδιού δωματίου της θέσης που εμφανίζεται. Η μπλε κουκκίδα προσομοιώνει την θέση του χρήστη στον χώρο ενώ το βέλος που εξέρχεται από αυτήν, την κατεύθυνσή του. Κάθε κόκκινη κουκκίδα στην οθόνη αντιπροσωπεύει ένα σωματίδιο του particle filter.



(α) Αρχική θέση χρήστη και επιλογή παραμέτρων από πληκτρολόγιο

(β) Κίνηση χρήστη στον χώρο και εμφάνιση σωματιδίων

(γ) Θέση χρήστη στον χώρο και αναγνωριστικό κλειδί δωματίου

Σχήμα 4.20: Παράδειγμα χρήσης εφαρμογής Inside-mApp

Κεφάλαιο 5

Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υποθέσεις, το υλικό, και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μεθόδων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τα πειραματικά αποτελέσματα αυτών. Η περιγραφή των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν χωρίζεται στα δύο βασικά τμήματα της υλοποίησης της εργασίας, δηλαδή σε πειράματα PDR και πειράματα Localization.

Καθ' όλη την πειραματική αξιολόγηση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας, η κινητή συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι η Poco M3 Pro 5G¹ ενώ από μεριας λογισμικού, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, ρυθμίστηκαν σε λειτουργία 50Hz.

5.1 Υποθέσεις και Παραδοχές

Ιδιαίτερης σημασίας είναι η αναφορά των υποθέσεων και των παραδοχών που λήφθηκαν υπόψιν κατά την υλοποίηση της εφαρμογής όπως και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων:

- Ο χρήστης κρατάει τη κινητή συσκευή μπροστά του με την οθόνη να κοιτάει προς τα πάνω.
- Η κατεύθυνση της κίνησης ταυτίζεται με τον άξονα Y της κινητής συσκευής (μεγάλη πλευρά οθόνης)
- Η κίνηση δεν περιλαμβάνει μετακίνηση και περιστροφή ταυτόχρονα (κυρτές διαδρομές).
- Ο χρήστης δεν τρέχει κατά την διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής.
- Δεν πραγματοποιούνται περιπτώσεις ακανόνιστης κίνησης, όπως πλάγιος βηματισμός, σύρσιμο των ποδιών, πίσω βήματα κλπ.
- Οι περιστροφές γίνονται γύρω από τον Z άξονα (Yaw περιστροφές) όσο πιο ομαλά γίνεται και δεν ξεπερνάνε τις 120 deg.
- Η κίνηση του χρήστη είναι δυνατή μόνο εντός του 2-D επίπεδου που ορίζει ο χάρτης

¹Poco M3 Pro 5G specifications

Τα πειράματα υλοποιήθηκαν τηρώντας τις παραπάνω υποθέσεις, οι οποίες συντελούν στην ευρωστία της εφαρμογής. Σε περίπτωση που κάποιες από αυτές δεν τηρηθούν, η εφαρμογή παρόλο που παράγει αποτελέσματα, αυτά δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως αξιόπιστα, καθώς θα περιέχουν σφάλματα εξ αιτίας της διαχείρισης περιπτώσεων που δεν έχουν ληφθεί υπόψιν κατά την σχεδίαση και υλοποίηση του συστήματος από τις επιμέρους διαδικασίες. Υπό αυτές τις συνθήκες συνιστάται η μη αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων εξ ολοκλήρου.

5.2 Πειράματα PDR

5.2.1 Εκτίμηση Μήκους Βήματος

Όπως προαναφέρθηκε στο [κεφάλαιο 4](#), για τον υπολογισμό της σταθεράς K της (4.3), η προσέγγιση που ακολουθείται στηρίζεται στην συνολική απόσταση βάδισης του χρήστη (4.5). Έτσι, σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση πραγματοποιήθηκαν μια σειρά μετρήσεων βάδισης σε ευθεία διαφορετικών αποστάσεων και αριθμών βημάτων όπως περιγράφεται στον [Πίνακα 5.1](#):

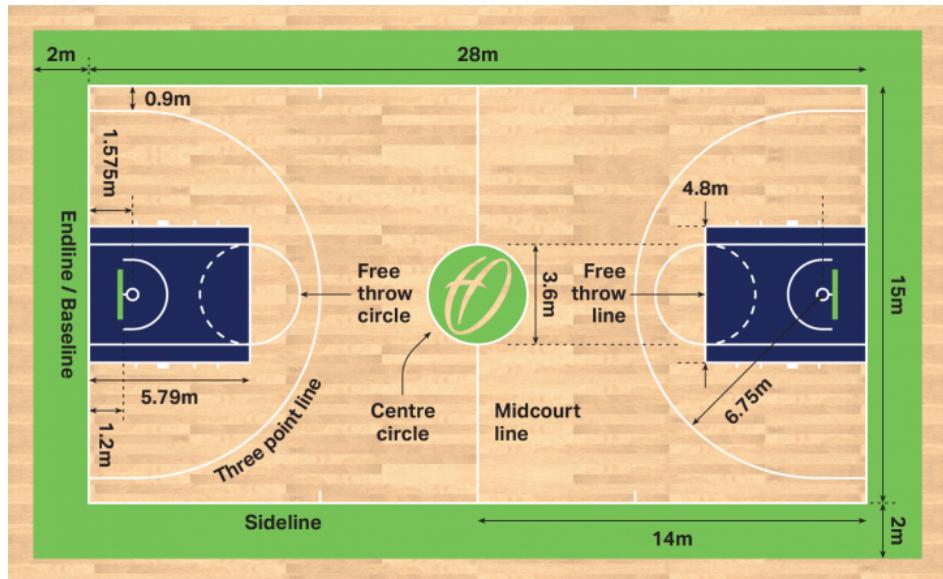
Πείραμα	Βήματα	Απόσταση (m)	PDR		
			Βήματα	Απόσταση	K
1	12	9	12	15.5292	0.5796
2	12	9	12	15.8821	0.5667
3	11	8.60	11	15.476	0.5557
4	12	9.25	12	15.5959	0.5931
5	12	9.40	12	16.0418	0.5860
Σύνολο:	59	45.25	59	78.525	0.5762

Πίνακας 5.1: Υπολογισμός K

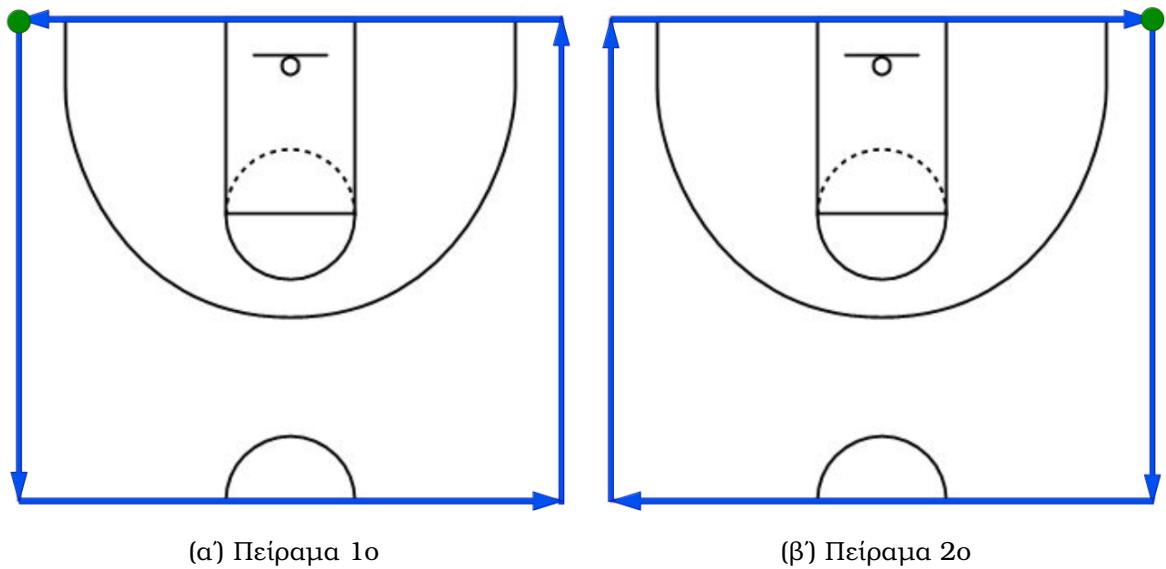
Από τον πίνακα, παρατηρούμε πως η σύνθεση των μεθόδων zero-Crossing και peak-Detection για την αναγνώριση βημάτων λειτουργεί ικανοποιητικά. Σημειώνεται πως ο συντελεστής K δύναται να αλλάζει από άνθρωπο σε άνθρωπο και χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μια αντίστοιχη διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) για τον εκ νέου υπολογισμό του σε περίπτωση χρήσης της εφαρμογής από άλλον χρήστη.

5.2.2 Αξιολόγηση εκτίμησης αποστάσεων και περιστροφών χρήστη

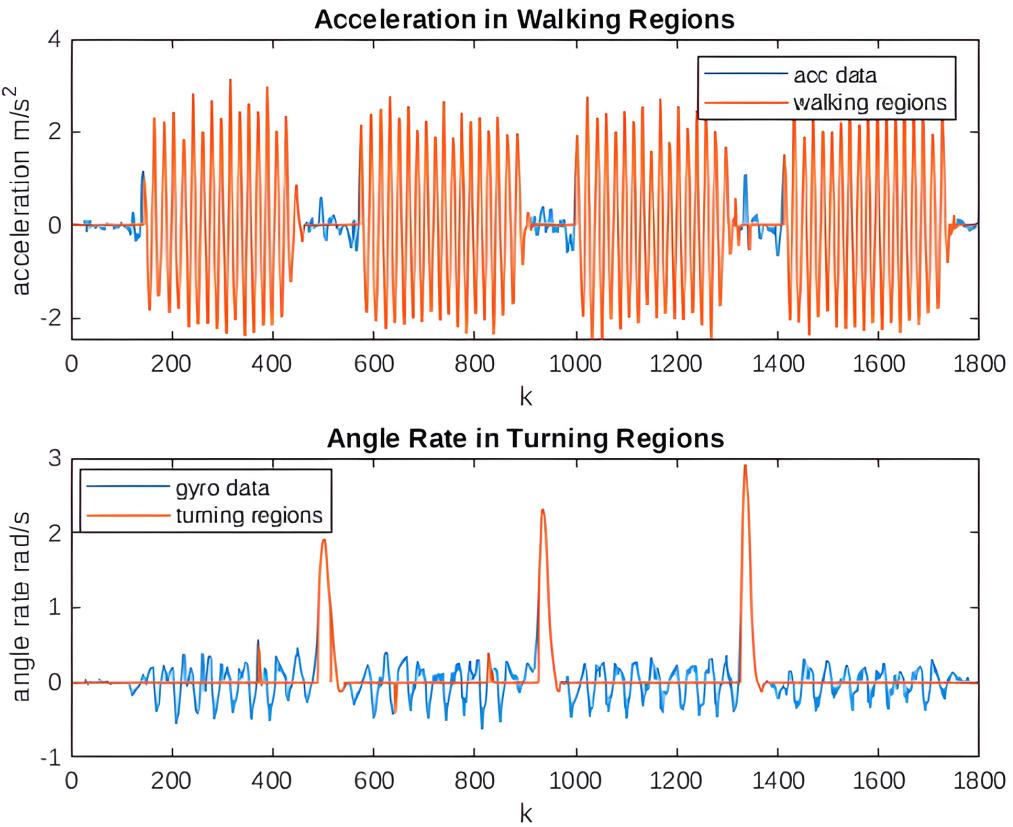
Για την αξιολόγηση των εκτιμήσεων βημάτων αλλά και των περιστροφών του χρήστη πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε χώρο εξωτερικού γηπέδου μπάσκετ όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.1](#) όπου μπορούμε με μεγαλύτερη ευκολία να μετρήσουμε τις αποστάσεις των διαδρομών καθώς και να συγκρίνουμε τις εκτιμήσεις των περιστροφών με τις περιστροφές 90 deg. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν έξι διαδρομές, όπου έγινε προσπάθεια να συμπεριληφθούν αρκετά βήματα για τις μετρήσεις των αποστάσεων αλλά και αρκετές στροφές. Σε κάθε στροφή ο χρήστης βρίσκεται σε πλήρη στάση, δηλαδή για κάθε πειράμα ισχύει η αλληλουχία μετακίνησης-στάσης-περιστροφής. Στις εικόνες [5.2α'-5.8β'](#), με μπλε βέλη απεικονίζονται οι διαδρομές ανά τμήματα ενώ με πράσινο και κόκκινο κύκλο, η εκκίνηση και ο τερματισμός αντίστοιχα. Στις διαδρομές [5.2α' - 5.2β'](#) και [5.5β' - 5.8β'](#), η εκκίνηση ταυτίζεται με τον τερματισμό.



Σχήμα 5.1: Διαστάσεις γηπέδου μπάσκετ Πηγή



Σχήμα 5.2: Διαδρομές γύρω από το μισό γήπεδο



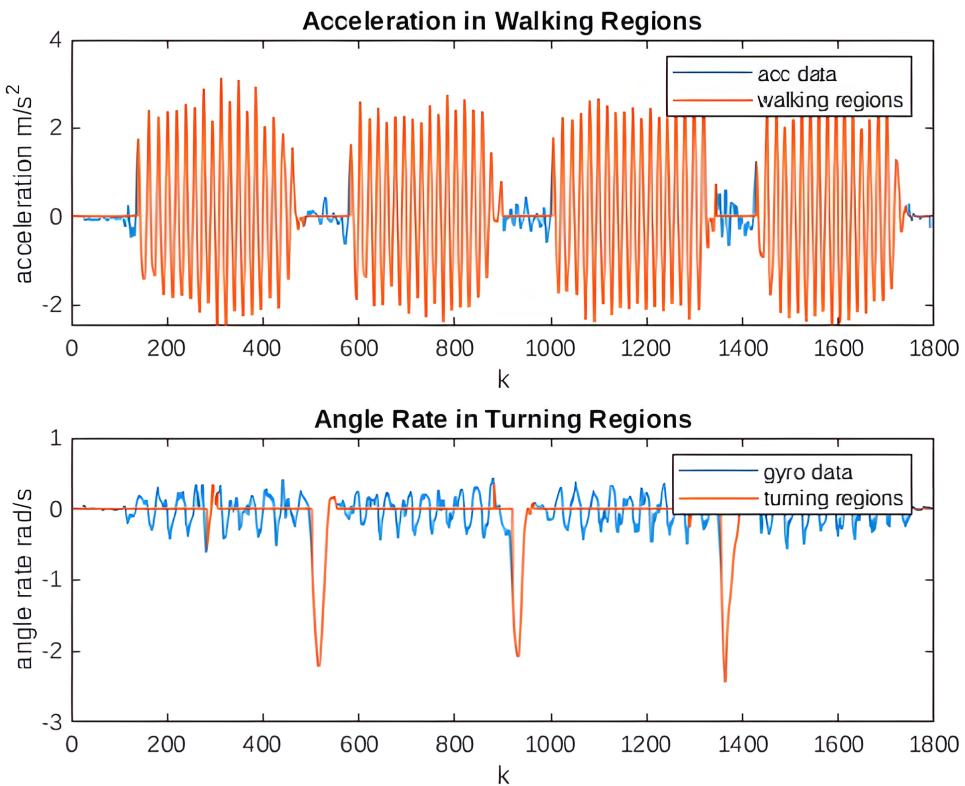
Σχήμα 5.3: Πείραμα 1ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής

Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	PDR		
			Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1	17	14	17	13.928	-0.512
2	18	15	18	14.870	-0.864
3	17	14	17	14.008	0.06
4	18	15	18	14.918	-0.54
Σύνολο:	70	58	70	57.726	0.473

Πίνακας 5.2: Πείραμα 1ο - Μήκος απόστασης

Στροφές	Γωνία (deg)	PDR	
		Γωνία (deg)	Σφάλμα (%)
1	90	79.650	11.500
2	90	84.406	6.216
3	90	103.8017	15.334
Μ.Ο:			11.0167

Πίνακας 5.3: Πείραμα 1ο - Στροφές Χρήστη



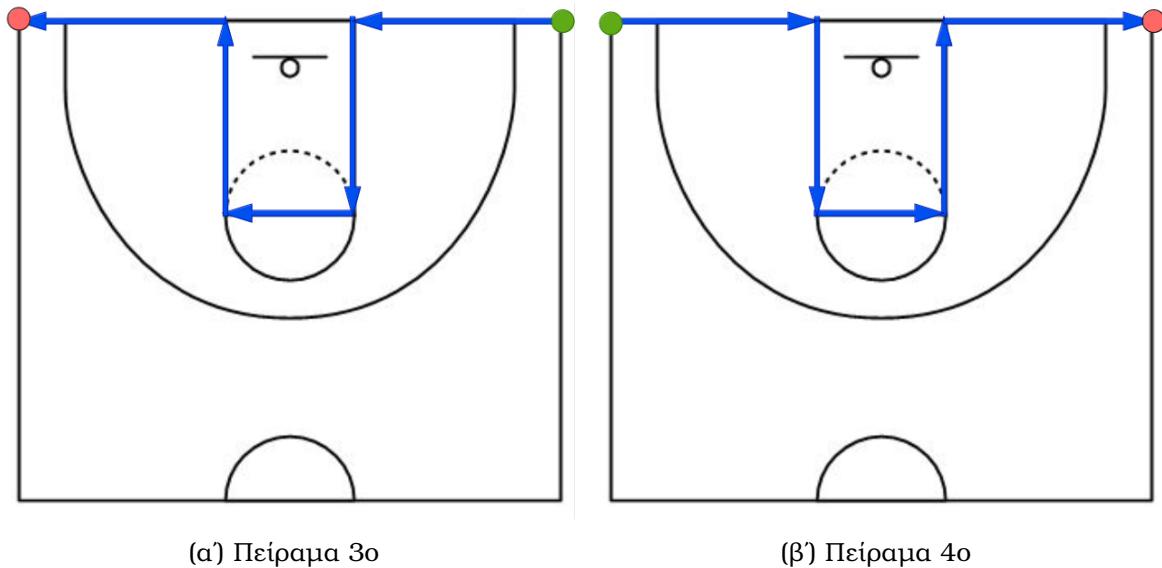
Σχήμα 5.4: Πείραμα 2o - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής

			PDR		
Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1	17	14	17	14.169	1.206
2	18	15	17	13.9059	-7.294
3	18	14	18	15.021	7.293
4	17	15	17	14.5953	-2.698
Σύνολο:	70	58	69	57.691	-0.532

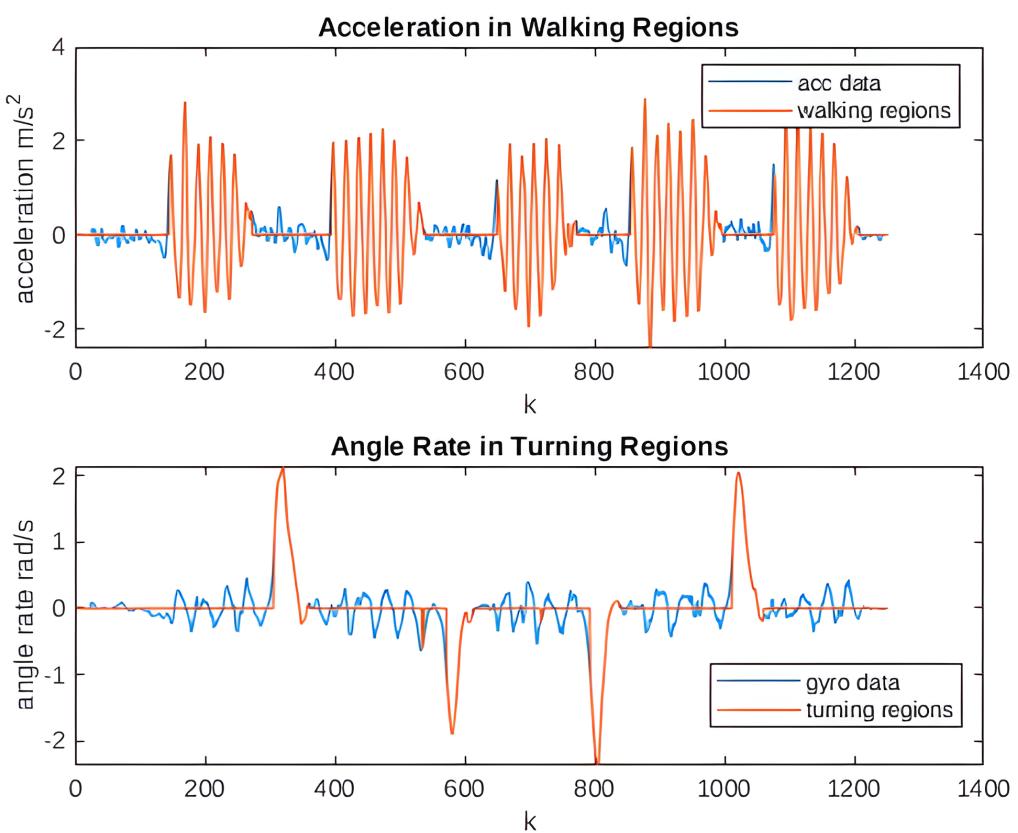
Πίνακας 5.4: Πείραμα 2o - Μήκος απόστασης

		PDR	
Στροφές	Γωνία (deg)	Γωνία (deg)	Σφάλμα (%)
1	-90	-118.9412	32.1569
2	-90	-74.6300	17.0778
3	-90	-94.2843	4.7603
Μ.Ο:			17.998

Πίνακας 5.5: Πείραμα 2o - Στροφές Χρήστη



Σχήμα 5.5: Διαδρομές πάνω στη βασική γραμμή



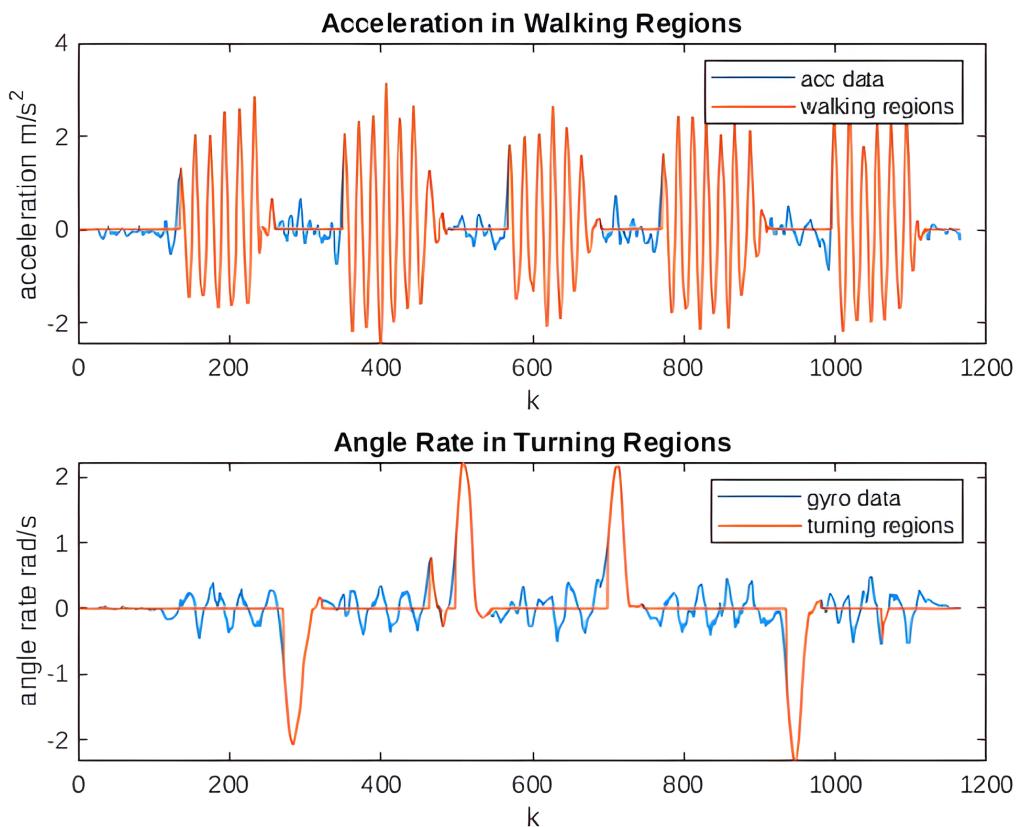
Σχήμα 5.6: Πείραμα 3ο - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής

			PDR		
Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1	7	5.10	6	4.665	-8.53
2	7	5.80	7	5.476	-5.58
3	6	4.80	6	4.593	-4.33
4	7	5.80	7	5.615	-3.20
5	7	5.10	7	5.399	5.86
Σύνολο:	34	26.60	33	25.747	-3.21

Πίνακας 5.6: Πείραμα 3o - Μήκος απόστασης

		PDR	
Στροφές	Γωνία (deg)	Γωνία (deg)	Σφάλμα (%)
1	90	92.266	2.52
2	-90	-62.547	30.50
3	-90	-84.387	6.24
4	90	80.595	10.45
Μ.Ο :			12.43

Πίνακας 5.7: Πείραμα 3o - Στροφές Χρήστη



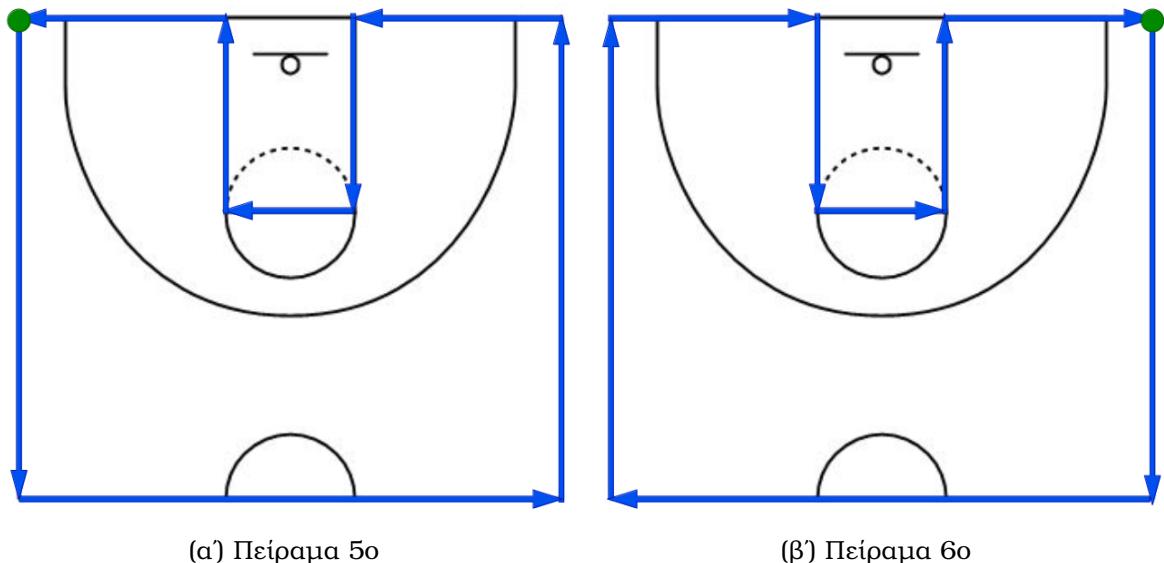
Σχήμα 5.7: Πείραμα 4o - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής

Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	PDR		
			Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1	7	5.10	6	4.761	-6.65
2	7	5.80	7	5.685	-1.98
3	6	4.80	6	4.706	-1.96
4	7	5.80	7	5.630	-2.92
5	6	5.10	6	4.907	-3.78
Σύνολο:	33	26.60	32	25.689	-3.42

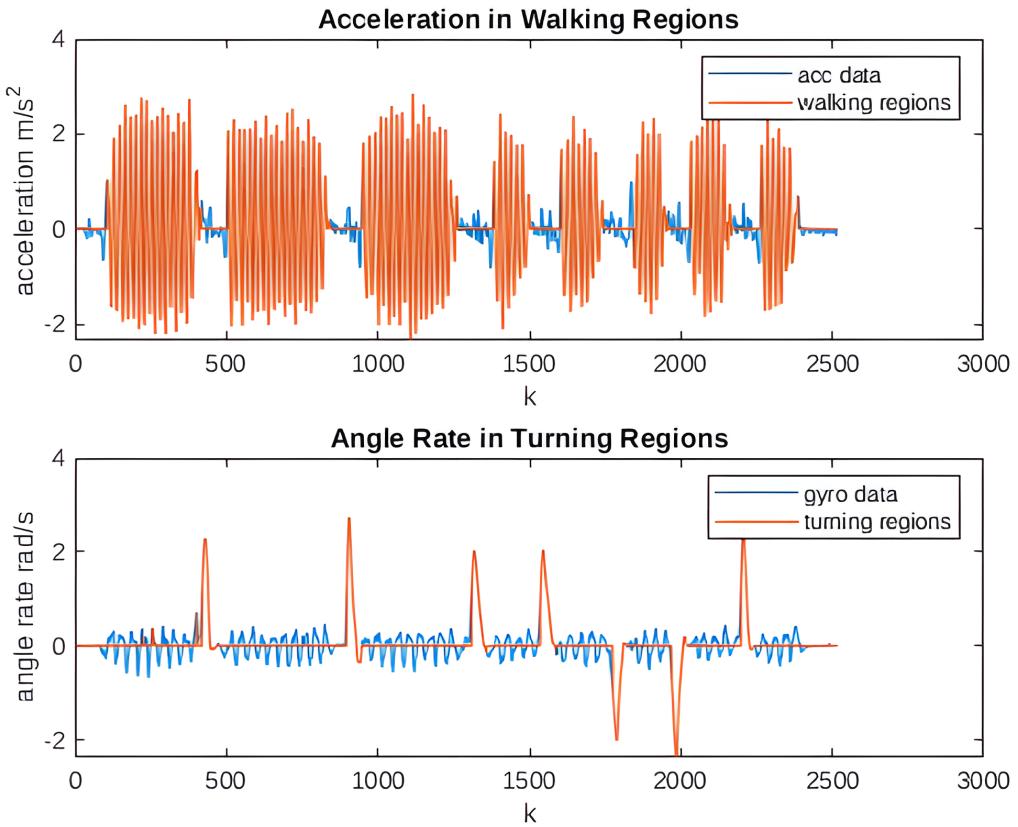
Πίνακας 5.8: Πείραμα 4o - Μήκος απόστασης

Στροφές	Γωνία (deg)	PDR	
		Γωνία (deg)	Σφάλμα (%)
1	-90	-87.748	2.50
2	90	81.999	8.89
3	90	79.853	11.28
4	-90	-85.152	5.39
Μ.Ο :			7.01

Πίνακας 5.9: Πείραμα 4o - Στροφές Χρήστη



Σχήμα 5.8: Σύνθεση προηγούμενων πειραμάτων



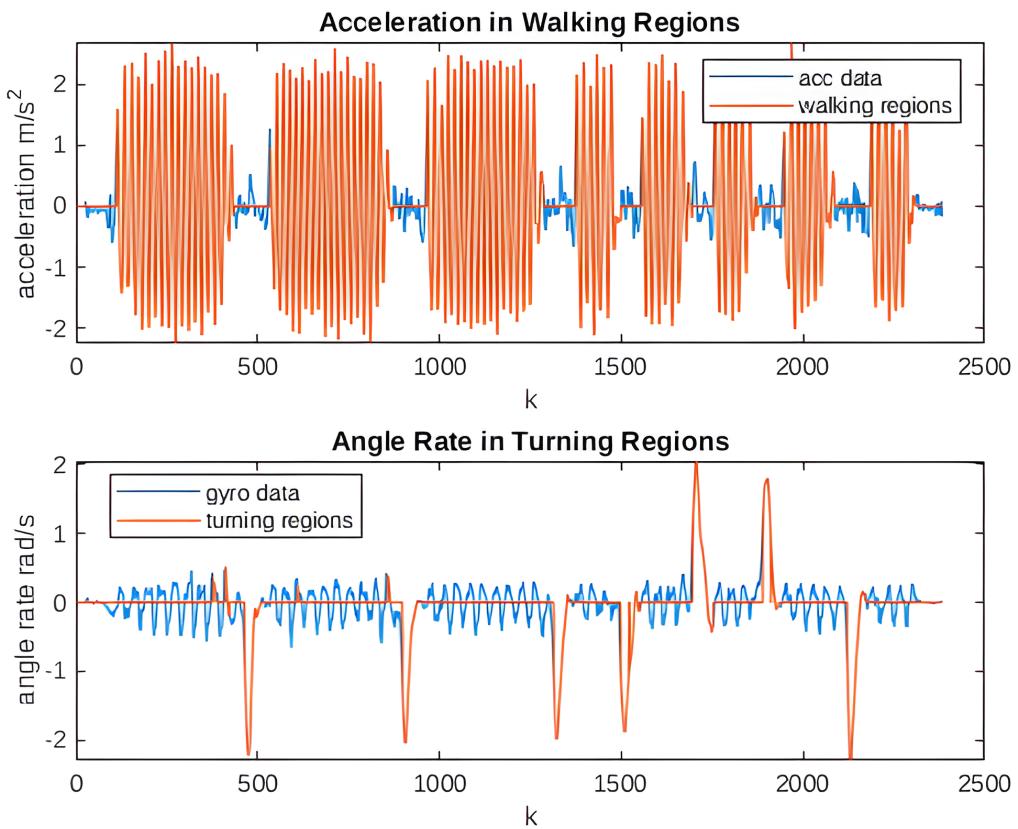
Σχήμα 5.9: Πείραμα 5o - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής

Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	PDR		
			Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1	17	14	17	13.842	-1.13
2	19	15	19	15.133	0.89
3	18	14	18	14.277	1.98
4	7	5.10	7	5.195	1.87
5	8	5.80	7	5.413	-6.67
6	6	4.80	6	4.589	-4.40
7	7	5.80	7	5.477	-5.56
8	7	5.10	6	4.649	-8.84
Σύνολο:	89	69.60	87	68.576	-1.47

Πίνακας 5.10: Πείραμα 5o - Μήκος απόστασης

Στροφές	Γωνία (deg)	PDR	
		Γωνία (deg)	Σφάλμα (%)
1	90	80.529	10.52
2	90	101.053	12.28
3	90	83.309	7.43
4	90	86.941	3.40
5	-90	-75.783	15.80
6	-90	-96.0130	6.68
7	90	82.064	8.82
M.O :		9.28	

Πίνακας 5.11: Πείραμα 5o - Στροφές Χρήστη



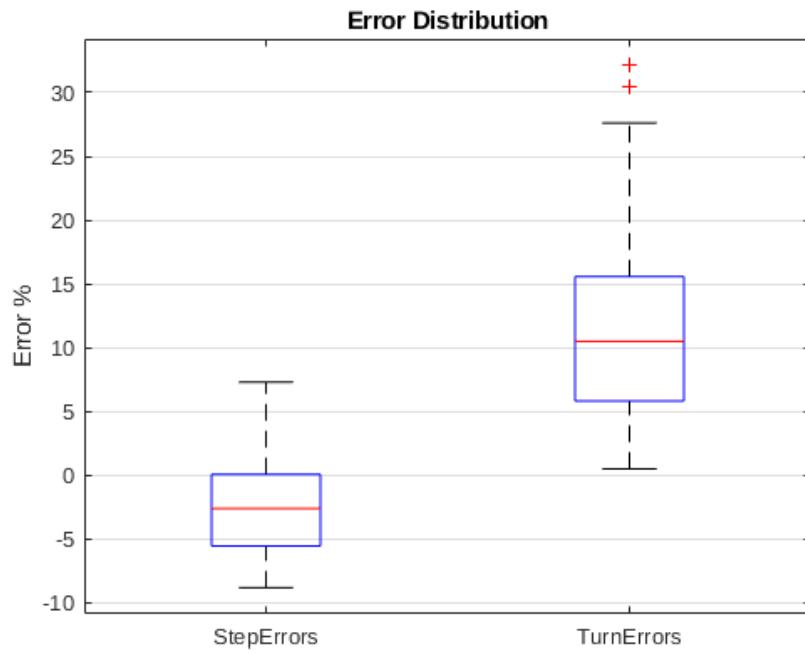
Σχήμα 5.10: Πείραμα 6o - Δεδομένα Αισθητήρων και περιοχές βαδίσματος/περιστροφής

Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	PDR		
			Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1	18	14	18	14.476	3.40
2	19	15	19	15.299	1.99
3	17	14	17	13.865	-0.96
4	6	5.10	6	4.865	-4.61
5	7	5.80	7	5.606	-3.35
6	6	4.80	6	4.678	-2.55
7	8	5.80	7	5.463	-5.81
8	7	5.10	6	4.720	-7.44
Σύνολο:	88	69.60	86	68.971	-0.90

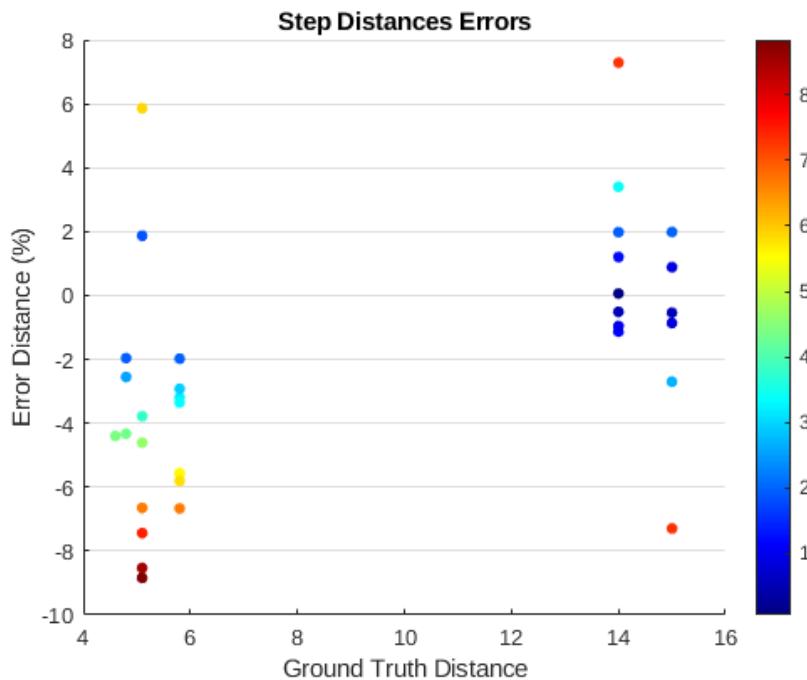
Πίνακας 5.12: Πείραμα 6ο - Μήκος απόστασης

Στροφές	Γωνία (deg)	PDR	
		Γωνία (deg)	Σφάλμα (%)
1	-90	-77.590	13.79
2	-90	-69.495	22.78
3	-90	-73.577	18.25
4	-90	-76.733	14.74
5	90	88.651	1.50
6	90	65.152	27.61
7	-90	-89.571	0.48
Μ.Ο:		14.16	

Πίνακας 5.13: Πείραμα 6ο - Στροφές Χρήστη



(α') Διάγραμμα κουτιού για τα σφάλματα αποστάσεων και περιστροφών



(β') Διάγραμμα διασποράς σφαλμάτων απόστασης

Σχήμα 5.11: Διαγράμματα σφαλμάτων

5.3 Πειράματα PF

Με τα πειράματα PF εννοείται η αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου που πραγματεύεται την εύρεση τοποθεσίας του χρήστη. Μέσα από τα πειράματα αυτά γίνεται προσπάθεια εξαγωγής δεδομένων επισκεψιμότητας για κάθε χωρικό κατακερματισμό

του χώρου. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, αρχικά, ο χρήστης διαλέγει την αρχική του θέση πάνω στον χάρτη του χώρου, και αφού επιτρέψει την ανάγνωση δεδομένων από τους αισθητήρες της συσκευής, περιηγείται μέσα σε αυτόν. Η καταγραφή ground truth της αλλαγής των δωματίων γίνεται χειροκίνητα μέσω της εφαρμογής με τη βοήθεια ενός κουμπιού. Κατά το βάδισμα, όταν γίνεται η αλλαγή του δωματίου, ο χρήστης πατάει το κουμπί και στην εφαρμογή αποθηκεύεται ο αριθμός της τελευταίας επιτυχημένης καταγραφής εκτίμησης της θέσης του. Έτσι η σύγκριση γίνεται με το πότε κατέγραψε ο χρήστης την αλλαγή των δωματίων με την αλλαγή που εμφάνιζε η εφαρμογή. Το πείραμα ολοκληρώνεται με το πέρας της περιήγησης, καθώς ο χρήστης διακόπτει την λειτουργία ανάγνωσης δεδομένων αισθητήρων, και τελικά αποθηκεύοντας τα καταγεγραμμένα δεδομένα στην συσκευή.

Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μορφή `.json` και η δομή τους περιγράφεται στον Πίνακα 5.14

acc	δεδομένα επιταχυνσιομέτρου		
gyro	δεδομένα γυροσκοπίου		
locations	x (m)	συντεταγμένες x εκτιμώμενης θέσης	
	y (m)	συντεταγμένες y εκτιμώμενης θέσης	
	r (id)	κλειδί δωματίου εκτιμώμενης θέσης	
switches	χειροκίνητες καταγραφές αλλαγής δωματίου		

Πίνακας 5.14: Μορφή καταγεγραμμένων δεδομένων

5.3.1 Πειράματα Επισκεψιμότητας

Για τα πειράματα που περιγράφονται παραπάνω έχουν επαναληφθεί για κάθε ζευγάρι συντελεστών του Πίνακα 5.15, όπου με N συμβολίζεται ο αριθμός των σωματιδίων του φίλτρου, και με $k - best$ τον μέγιστο αριθμό σωματιδίων που συμβάλλουν στην εκτίμηση θέσης του χρήστη μέσα στον χώρο. Παρατηρείται πως για $N > 200$ η απόδοση

N	20	50	100	200
k-best	5	15	25	50

Πίνακας 5.15: Συντελεστές πειραμάτων PF

της εφαρμογής φθίνει σημαντικά λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος του κινητού και καθίσταται δύσχρηστη για την πειραματική μελέτη της λειτουργίας της σε πραγματικό χρόνο.

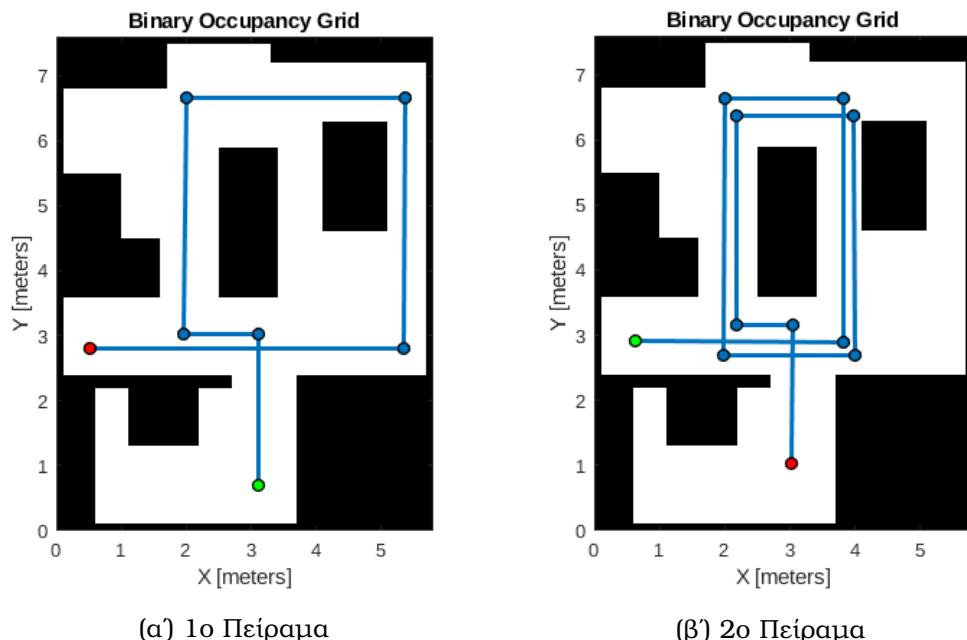
Οικιακός χώρος

Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 4.3.1, ο οικιακός χώρος καταρτίζεται από τα υπό μέρους τμήματα του Πίνακα 5.16. Τα μεγέθη του πίνακα αντιστοιχούν στο σύστημα συντεταγμένων που διακρίνεται στο Σχήμα 5.12 ύστερα από αλλαγή συντεταγμένων και μονάδων μέτρησης από τα αρχικά δεδομένα του Πίνακα 4.4. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον οικιακό χώρο αποτελούνται από διαδρομές διαφορετικών μεγεθών διαδρομών και αλλαγών δωματίου (Σχήμα 5.12). Οι διαδρομές που απεικονίζονται αποτελούν ένδειξη των πραγματικών διαδρομών που ακολουθήθηκαν καθώς σε κάθε

επανάληψη ενδέχεται ο αριθμός των βημάτων να διαφέρει χωρίς αυτό βέβαια να αλλοιώνει ή να εμποδίζει την μελέτη της επισκεψιμότητας.

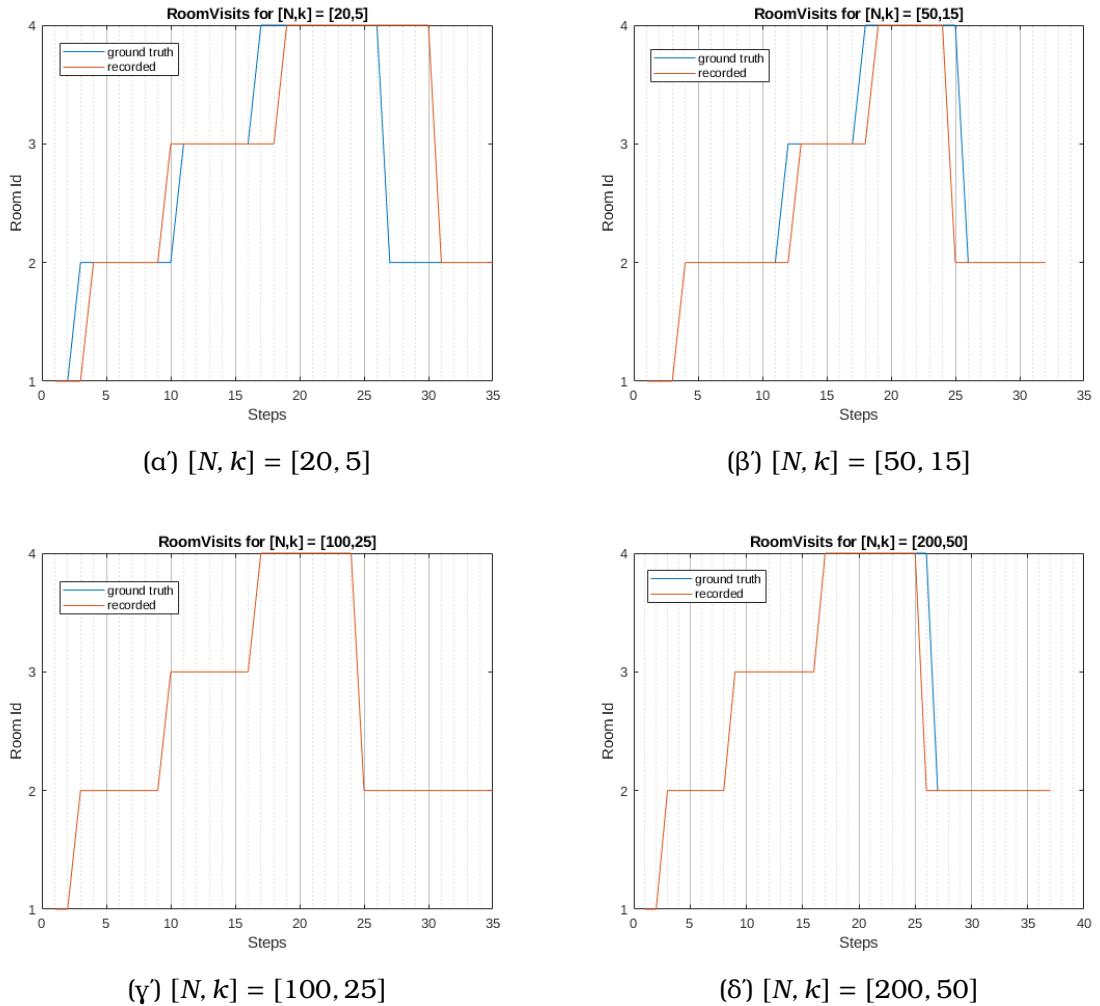
Room Id	x (m)	y (m)	w (m)	h (m)	Περιγραφή
1	0	2.4	3.1	2.3	Κουζίνα
2	0	3.6	5.8	1.2	Διάδρομος
3	0	7.6	3.4	4	Σαλόνι
4	3.4	7.6	2.4	4	Τραπεζαρία

Πίνακας 5.16: Κατακερματισμός οικιακού χώρου

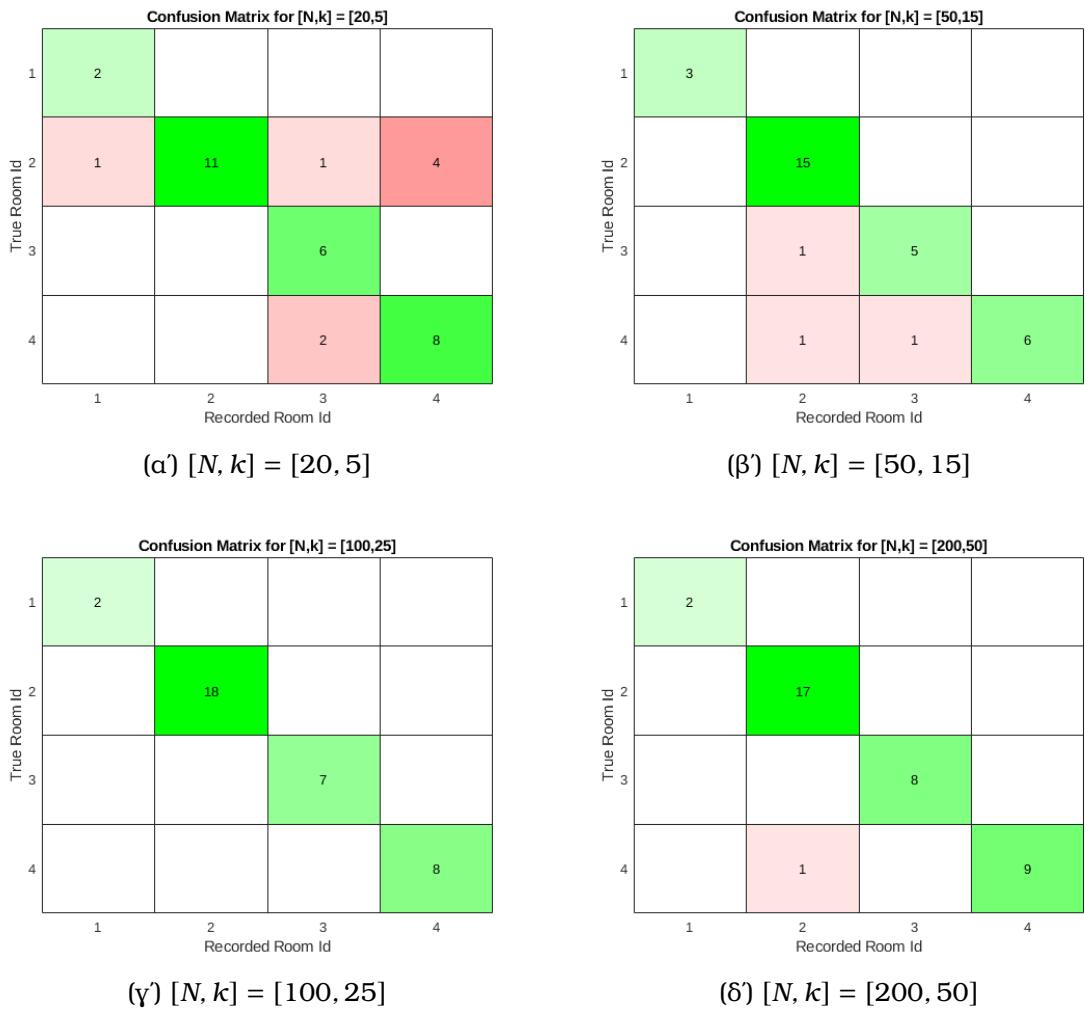


Σχήμα 5.12: Ενδεικτικές διαδρομές πειραμάτων στο οικιακό περιβάλλον. Με πράσινο ορίζεται το σημείο εκκίνησης και με κόκκινο το σημείο τερματισμού

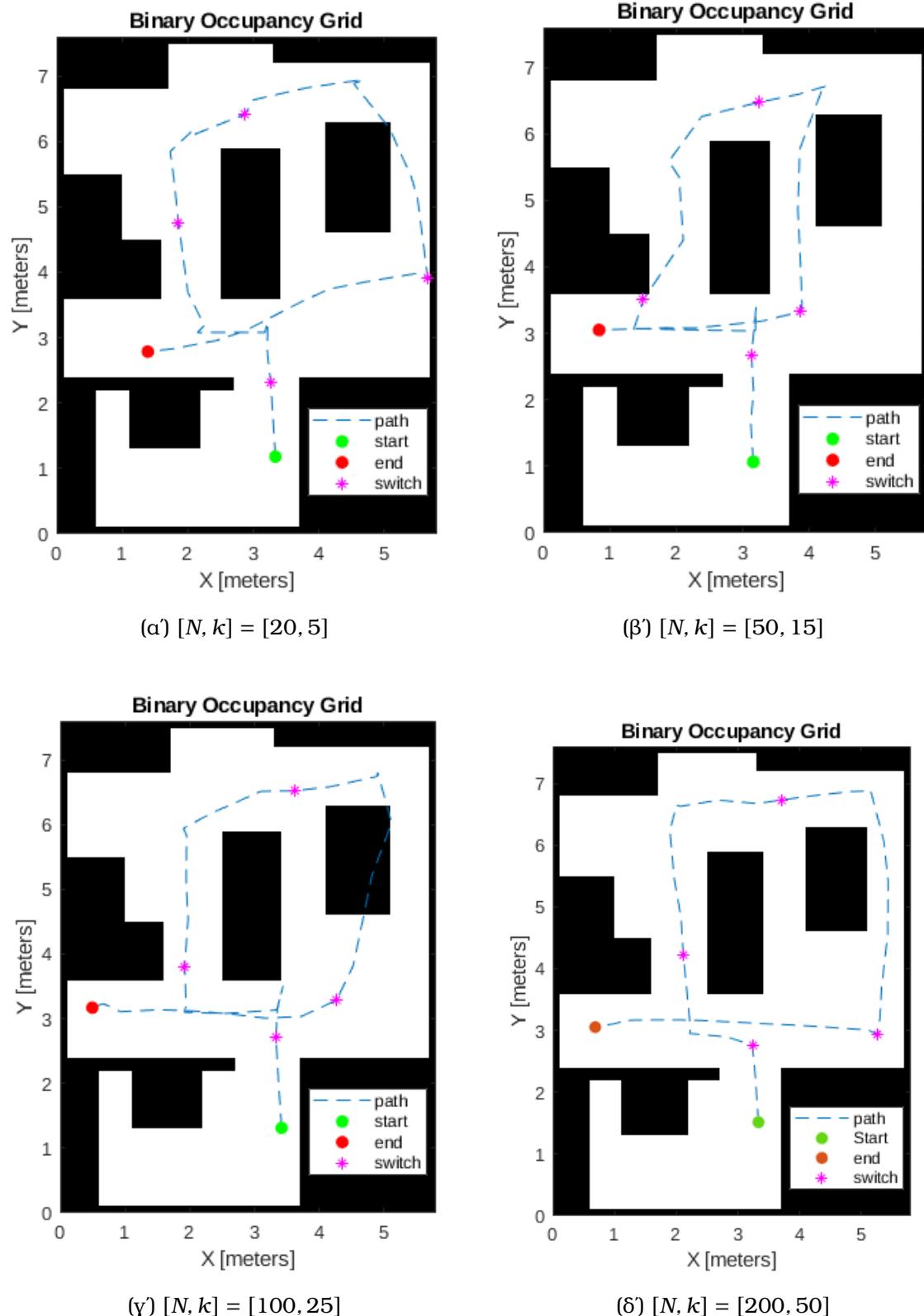
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν για τα διαφορετικά ζεύγη παραμέτρων του Πίνακα 5.15 από την διαδρομή του 5.12α' (Σχήμα 5.13 - 5.15) καθώς και από την διαδρομή του 5.12β' (Σχήμα 5.16 - 5.18)



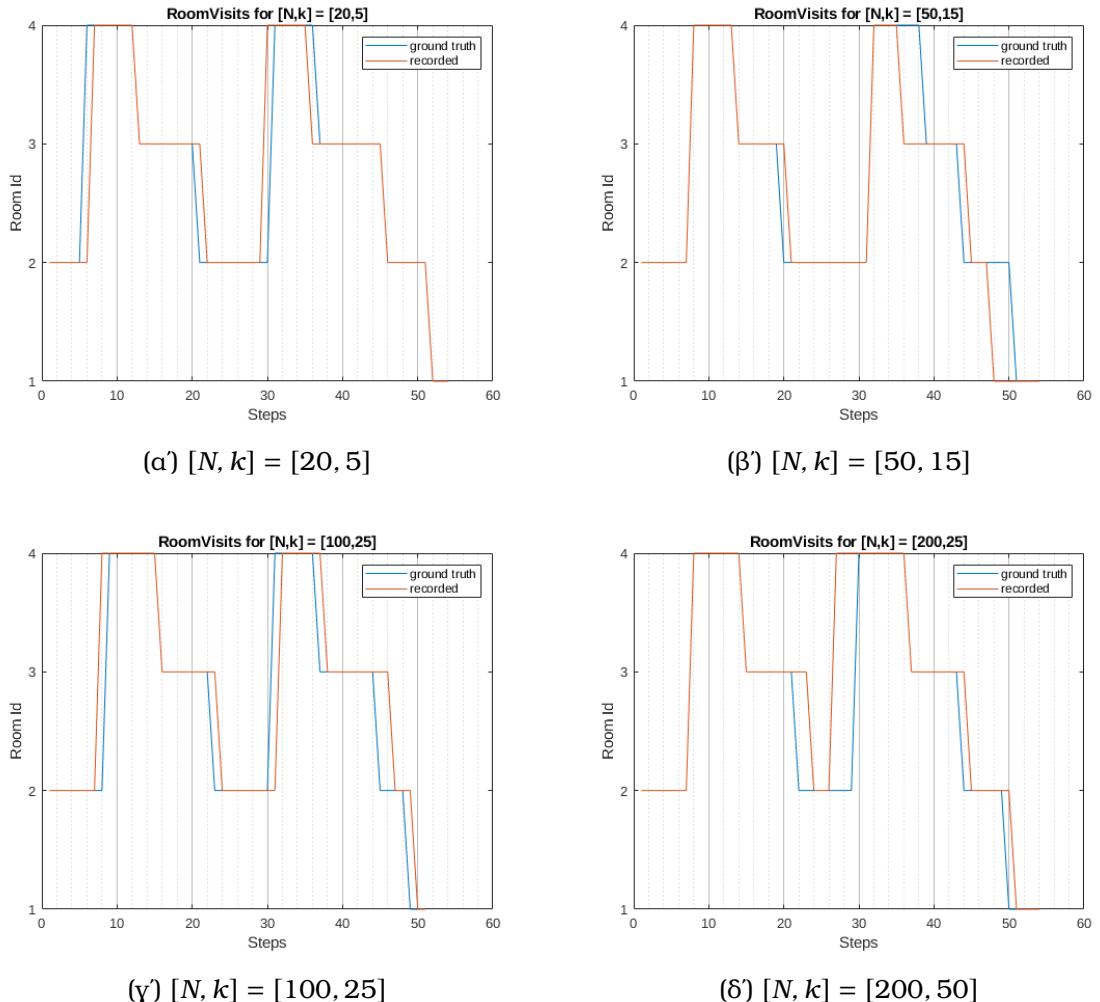
Σχήμα 5.13: Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



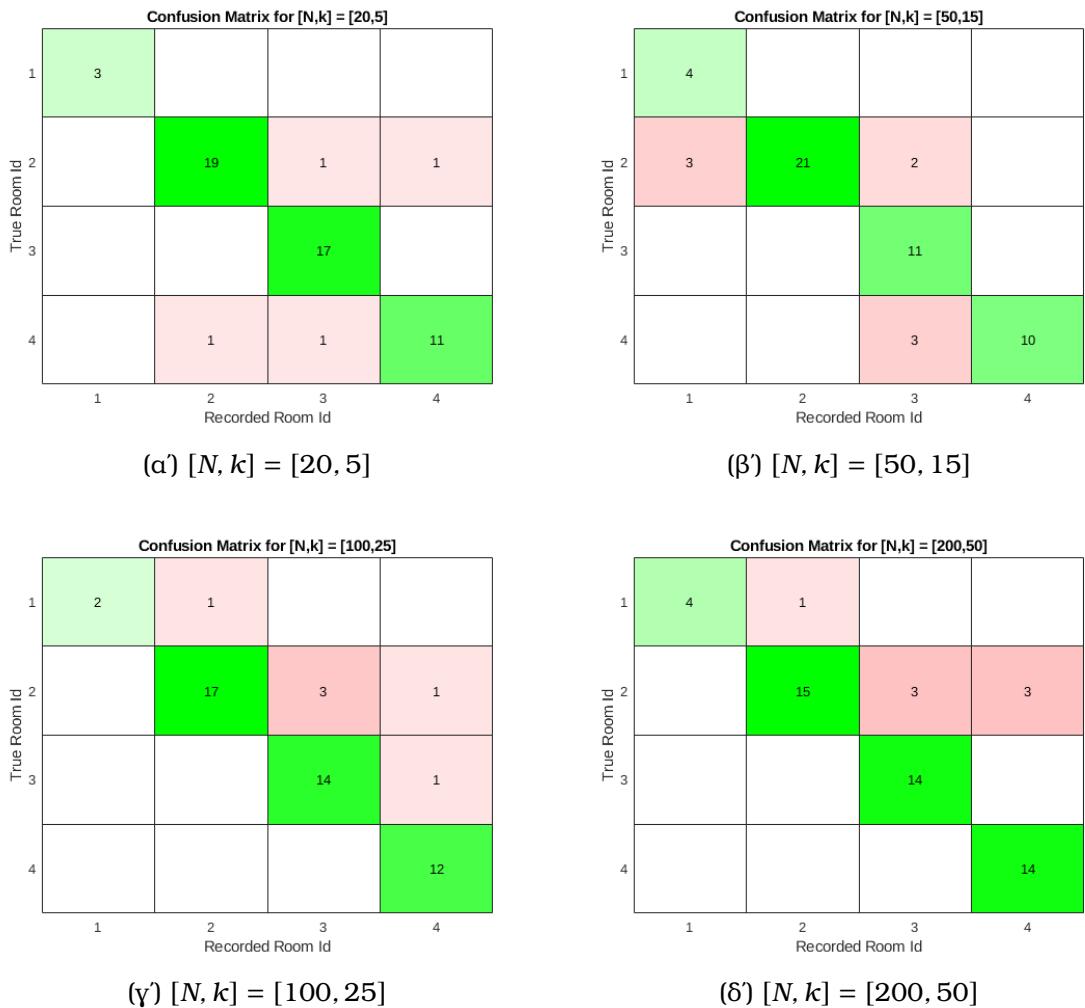
Σχήμα 5.14: Πίνακες σύγχυσης 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



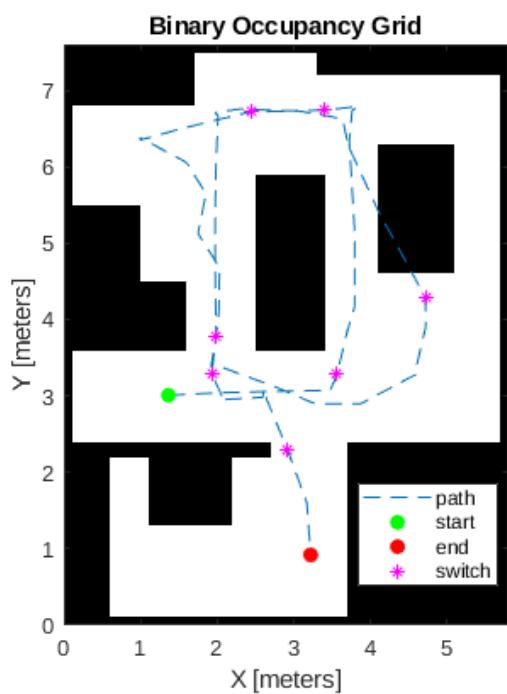
Σχήμα 5.15: Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 1ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



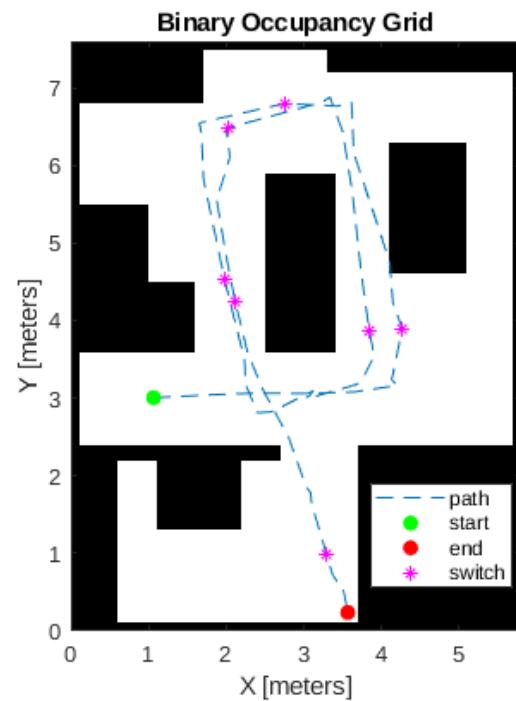
Σχήμα 5.16: Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



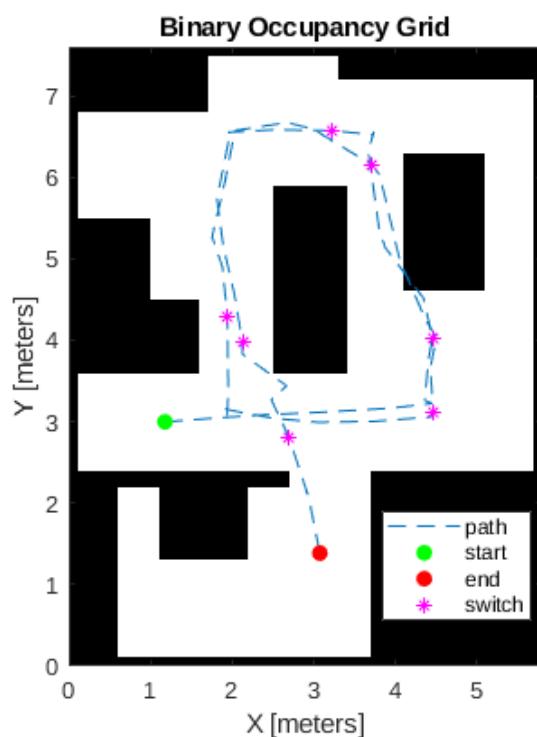
Σχήμα 5.17: Πίνακες σύγχυσης 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



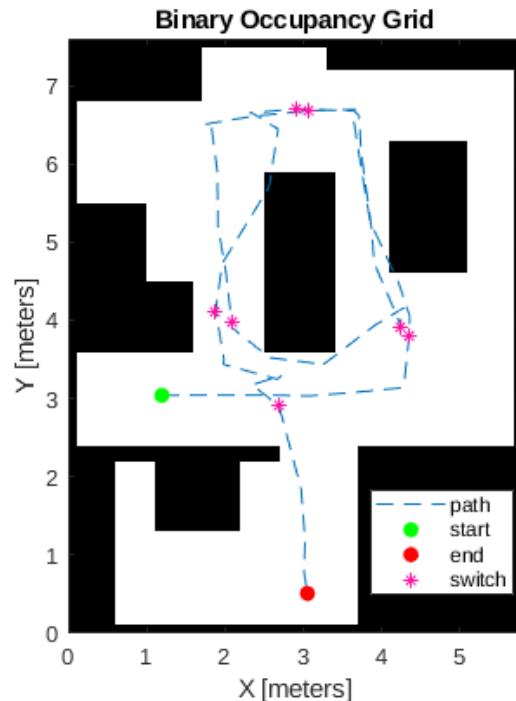
(a') $[N, k] = [20, 5]$



$$(\beta') [N, k] = [50, 15]$$



(y') $[N, k] = [100, 25]$



(δ') $[N, k] = [200, 50]$

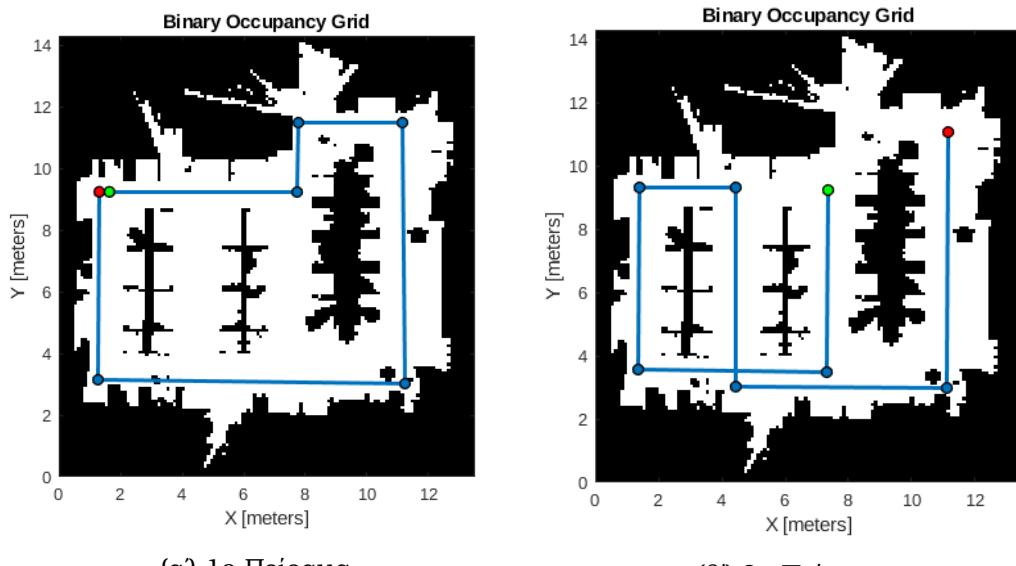
Σχήμα 5.18: Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 2ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$

Χώρος εργαστηρίου

Όπως αναφέρθηκε και στην [υποενότητα 4.3.1](#), ο χώρος του εργαστηρίου καταρτίζεται από τα υπό μέρους τμήματα του [Πίνακα 5.17](#). Τα μεγέθη του πίνακα αντιστοιχούν στο σύστημα συντεταγμένων που διακρίνεται στο [Σχήμα 5.19](#) ύστερα από αλλαγή συντεταγμένων και μονάδων μέτρησης από τα αρχικά δεδομένα του [Πίνακα 4.4](#). Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου, αντίστοιχα με τα πειράματα του οικιακού χώρου, αποτελούνται από διαδρομές διαφορετικών μεγεθών διαδρομών και αλλαγών δωματίου ([Σχήμα 5.19](#)). Επίσης οι διαδρομές που απεικονίζονται αποτελούν ένδειξη των πραγματικών διαδρομών που ακολουθήθηκαν καθώς σε κάθε επανάληψη ενδέχεται ο αριθμός των βημάτων να διαφέρει χωρίς αυτό βέβαια να αλλοιώνει ή να εμποδίζει την μελέτη της επισκεψιμότητας.

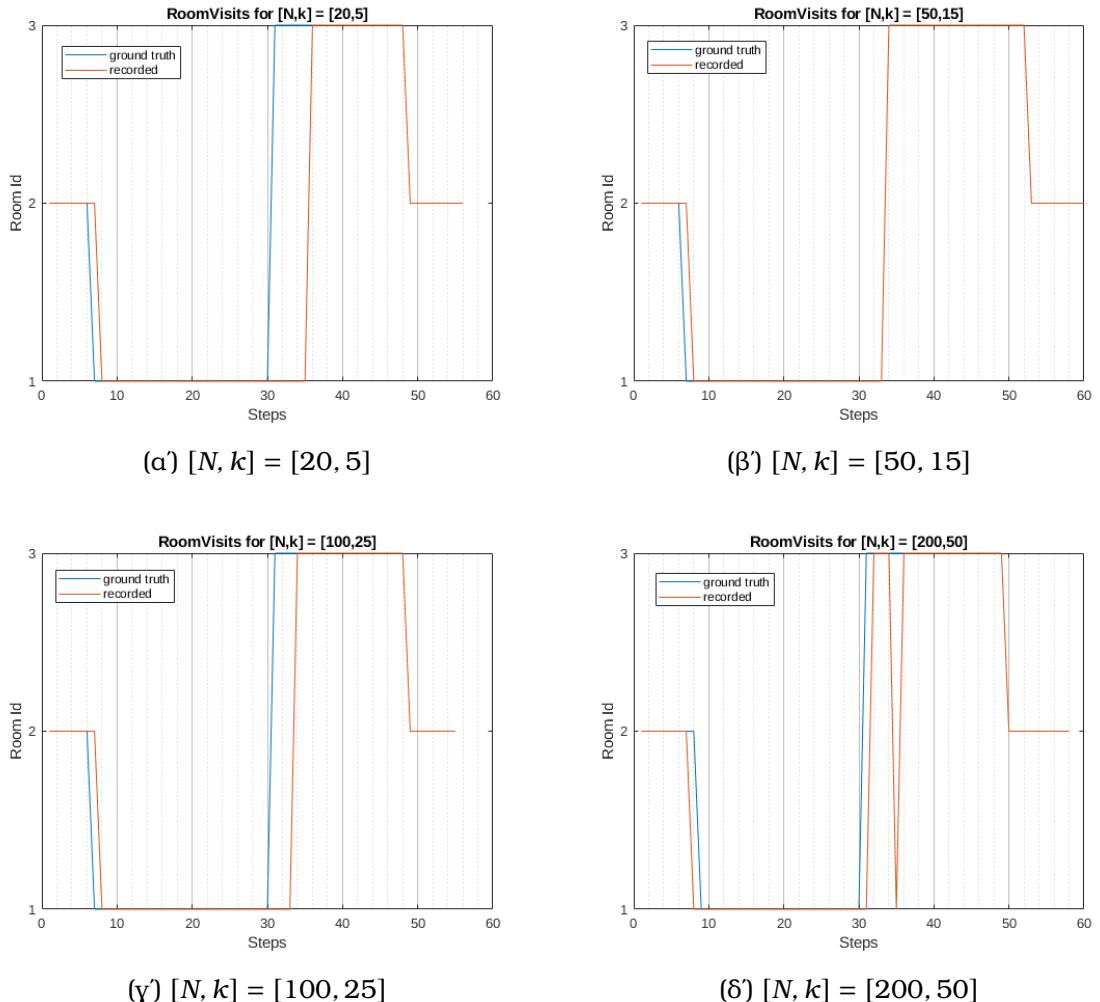
Room Id	x (m)	y (m)	w (m)	h (m)	Περιγραφή
1	6.6	13.5	6.7	10.3	Ηλεκτρολογικοί πάγκοι
2	0	11.5	6.4	8.4	Νησίδες Υπολογιστών
3	0	3.1	13.5	4	Διάδρομος

Πίνακας 5.17: Κατακερματισμός χώρου εργαστηρίου

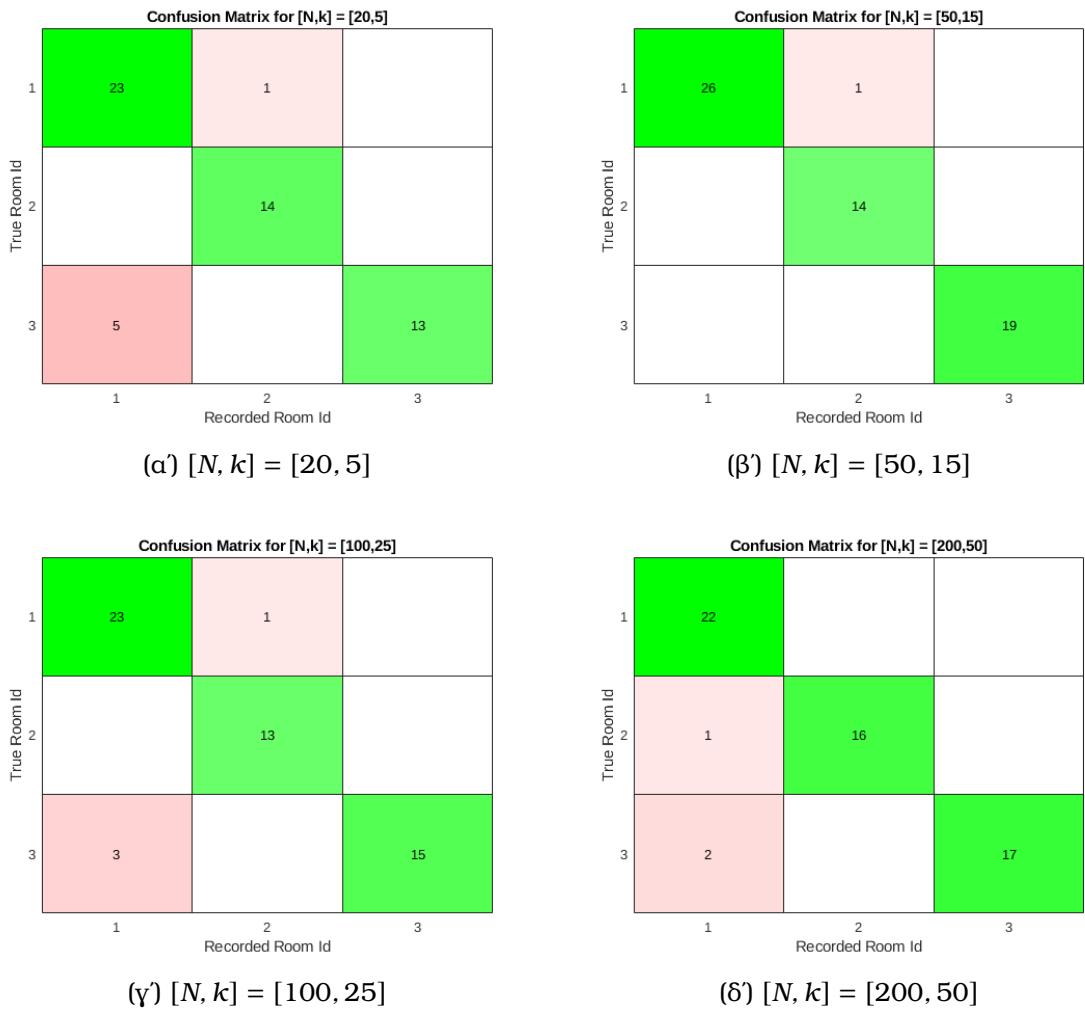


Σχήμα 5.19: Ενδεικτικές διαδρομές πειραμάτων στον χώρο του εργαστηρίου. Με πράσινο ορίζεται το σημείο εκκίνησης και με κόκκινο το σημείο τερματισμού

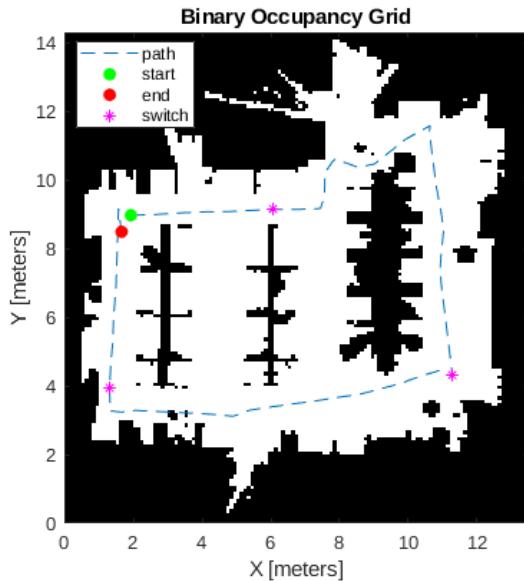
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν για τα διαφορετικά ζεύγη παραμέτρων του [Πίνακα 5.15](#) από την διαδρομή του [5.19α'](#) ([Σχήμα 5.20 - 5.22](#)) καθώς και από την διαδρομή του [5.19β'](#) ([Σχήμα 5.23 - 5.25](#))



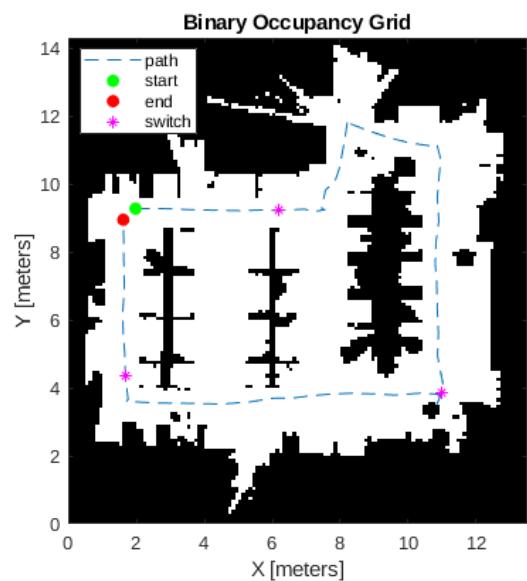
Σχήμα 5.20: Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



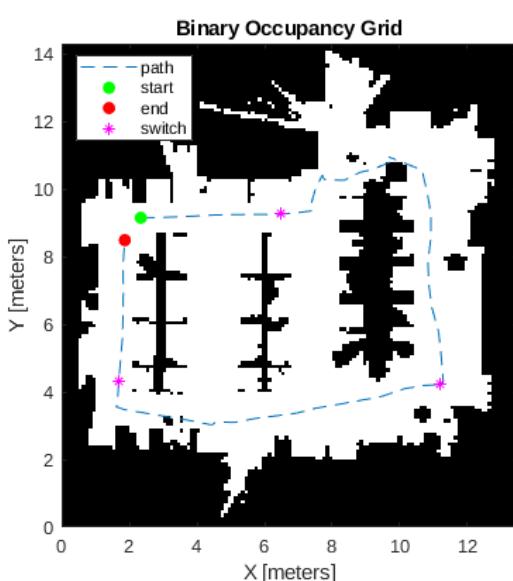
Σχήμα 5.21: Πίνακες σύγχυσης 1ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



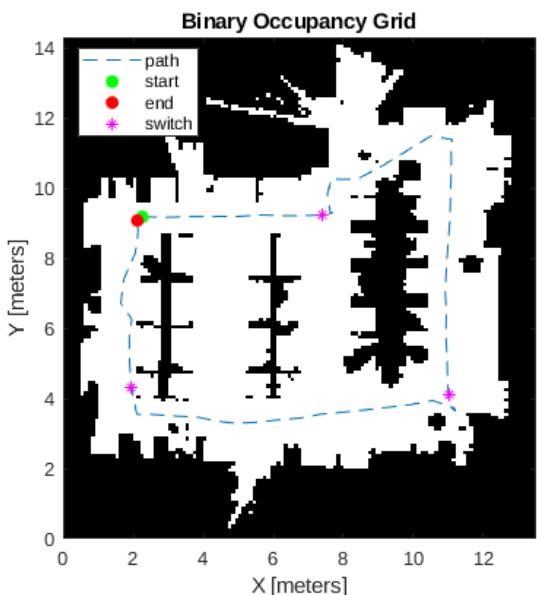
(α') $[N, k] = [20, 5]$



(β') $[N, k] = [50, 15]$

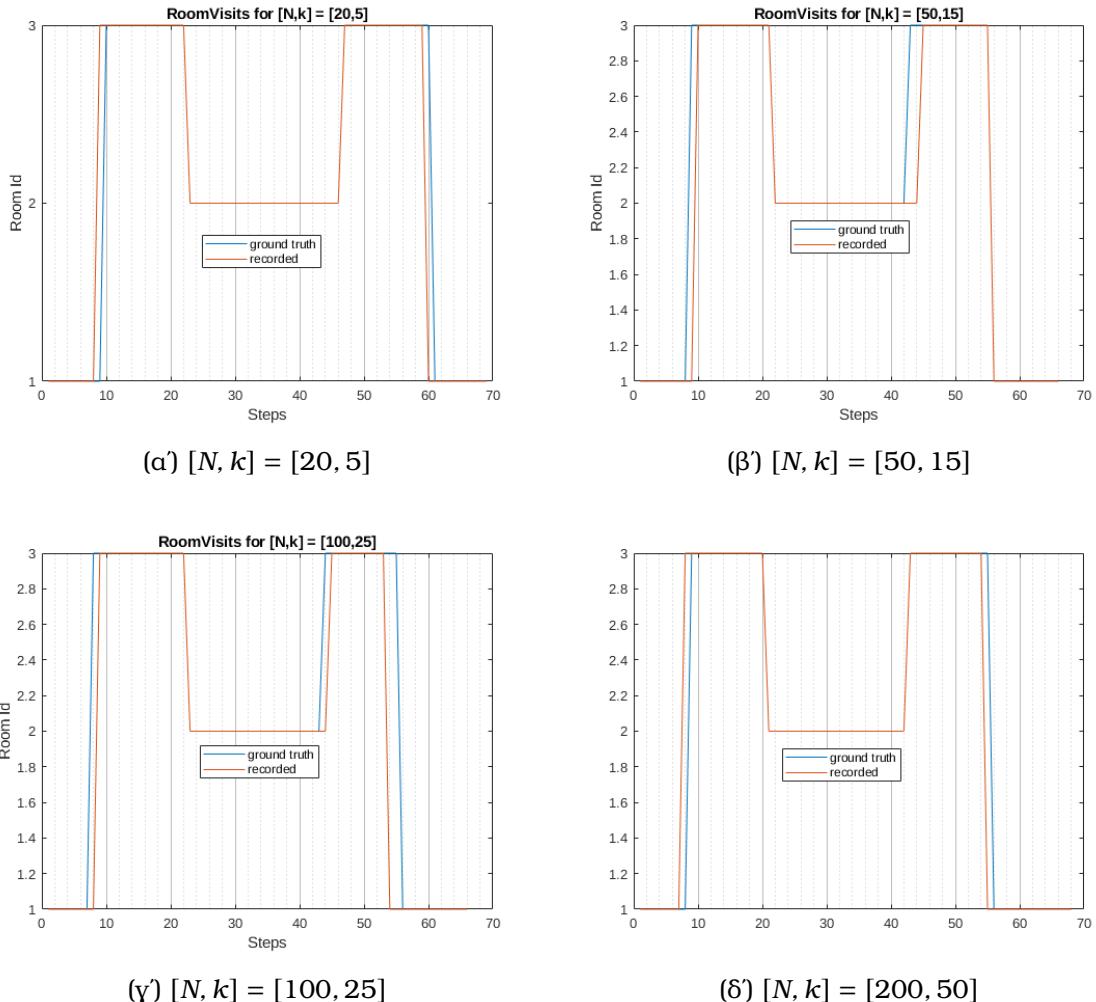


(γ') $[N, k] = [100, 25]$

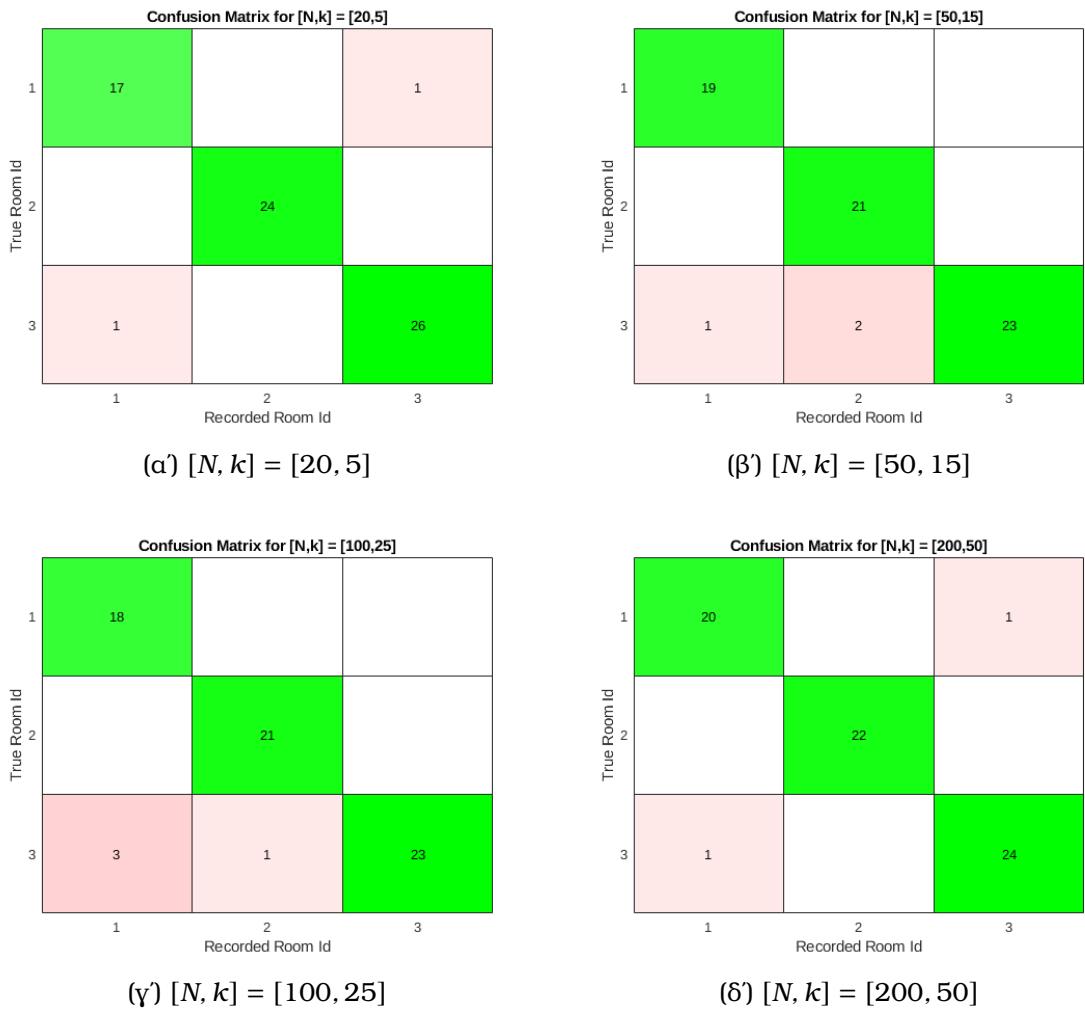


(δ') $[N, k] = [200, 50]$

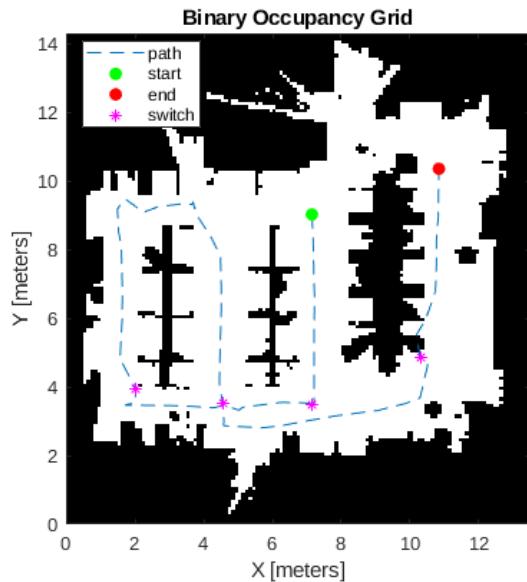
Σχήμα 5.22: Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 1ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



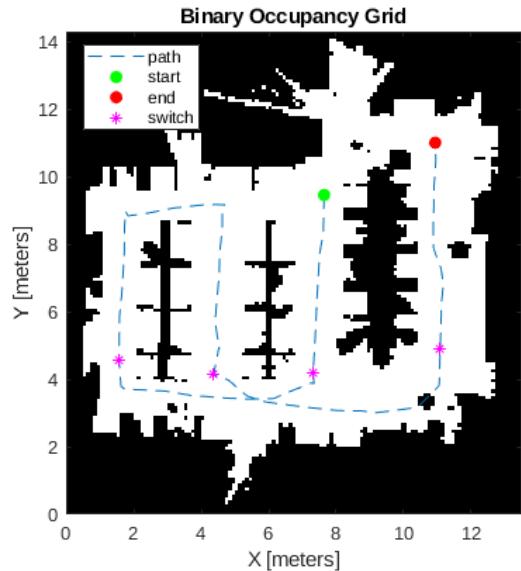
Σχήμα 5.23: Επισκεψιμότητα και αλλαγές δωματίων 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



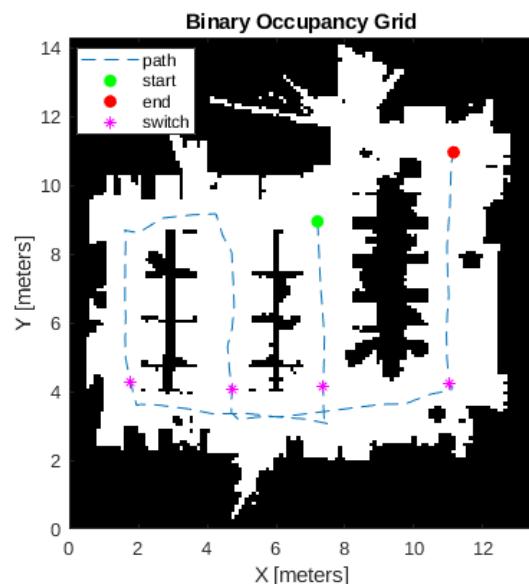
Σχήμα 5.24: Πίνακες σύγχυσης 2ου πειράματος για τα διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$



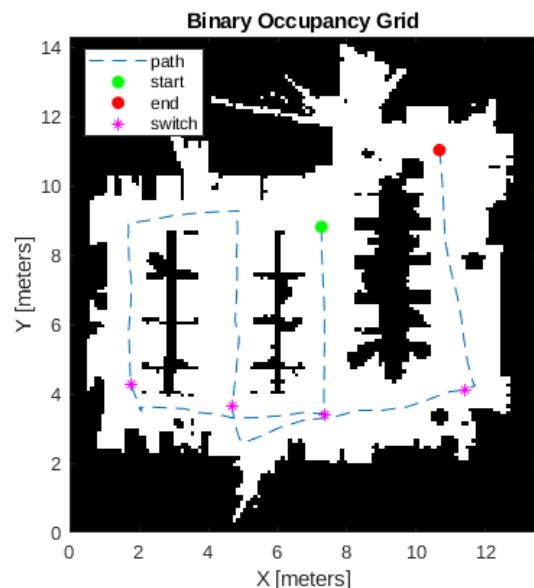
(α') $[N, k] = [20, 5]$



(β') $[N, k] = [50, 15]$



(γ') $[N, k] = [100, 25]$



(δ') $[N, k] = [200, 50]$

Σχήμα 5.25: Καταγεγραμμένες διαδρομές και χειροκίνητες αλλαγές χρήστη 2ου πειράματος για διαφορετικά ζεύγη $[N, k]$

5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

PDR

Παρακάτω παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων των πειραμάτων PDR για την αναγνώριση και εκτίμηση μήκους βημάτων (Πίνακα 5.18) και για τον υπολογισμού γωνιών στροφών του χρήστη (Πίνακα 5.19)

Τμήματα	Βήματα	Απόσταση (m)	PDR		
			Βήματα	Απόσταση (m)	Σφάλμα (%)
1.1	17	14	17	13.928	-0.51
1.2	18	15	18	14.870	-0.86
1.3	17	14	17	14.008	0.06
1.4	18	15	18	14.918	-0.54
2.1	17	14	17	14.169	1.21
2.2	18	15	17	13.906	-7.29
2.3	18	14	18	15.021	7.29
2.4	17	15	17	14.595	-2.70
3.1	7	5.10	6	4.665	-8.53
3.2	7	5.80	7	5.476	-5.58
3.3	6	4.80	6	4.593	-4.33
3.4	7	5.80	7	5.615	-3.20
3.5	7	5.10	7	5.399	5.86
4.1	7	5.10	6	4.761	-6.65
4.2	7	5.80	7	5.685	-1.98
4.3	6	4.80	6	4.706	-1.96
4.4	7	5.80	7	5.630	-2.92
4.5	6	5.10	6	4.907	-3.78
5.1	17	14	17	13.842	-1.13
5.2	19	15	19	15.133	0.89
5.3	18	14	18	14.277	1.98
5.4	7	5.10	7	5.195	1.87
5.5	8	5.80	7	5.413	-6.67
5.6	6	4.80	6	4.589	-4.40
5.7	7	5.80	7	5.477	-5.56
5.8	7	5.10	6	4.649	-8.84
6.1	18	14	18	14.476	3.40
6.2	19	15	19	15.299	1.99
6.3	17	14	17	13.865	-0.96
6.4	6	5.10	6	4.865	-4.61
6.5	7	5.80	7	5.606	-3.35
6.6	6	4.80	6	4.678	-2.55
6.7	8	5.80	7	5.463	-5.81
6.8	7	5.10	6	4.720	-7.44
Σύνολο:	384	308.400	377	304.400	-1.297

Πίνακας 5.18: Συγκεντρωτικός πίνακας - Μήκος απόστασης

Στροφές	Γωνία (deg)	PDR	Σφάλμα (%)
		Γωνία (deg)	
1.1	90	79.650	11.50
1.2	90	84.406	6.22
1.3	90	103.8017	15.33
2.1	-90	-118.9412	32.16
2.2	-90	-74.6300	17.08
2.3	-90	-94.2843	4.76
3.1	90	92.266	2.52
3.2	-90	-62.547	30.50
3.3	-90	-84.387	6.24
3.4	90	80.595	10.45
4.1	-90	-87.748	2.50
4.2	90	81.999	8.89
4.3	90	79.853	11.28
4.4	-90	-85.152	5.39
5.1	90	80.529	10.52
5.2	90	101.053	12.28
5.3	90	83.309	7.43
5.4	90	86.941	3.40
5.5	-90	-75.783	15.80
5.6	-90	-96.0130	6.68
5.7	90	82.064	8.82
6.1	-90	-77.590	13.79
6.2	-90	-69.495	22.78
6.3	-90	-73.577	18.25
6.4	-90	-76.733	14.74
6.5	90	88.651	1.50
6.6	90	65.152	27.61
6.7	-90	-89.571	0.48
M.O:		11.746	

Πίνακας 5.19: Συγκεντρωτικός πίνακας - Στροφές Χρήστη

Από τον συγκεντρωτικό πίνακα εκτίμησης αποστάσεων, και τα διαγράμματα σφαλμάτων (5.11) παρατηρείται πως τα ποσοστιαία σφάλματα τείνουν να αυξάνονται στα τμήματα όπου οι αποστάσεις είναι μικρότερες, κυρίως του ότι σε μερικές περιπτώσεις δεν αναγνωρίζονται τα βήματα του χρήστη όταν πρόκειται για μικρότερα βήματα κυρίως στην εκκίνηση ή στον τερματισμό της βάδισης. Αλγορίθμικά, αυτό συμβαίνει είτε διότι οι μετρήσεις της επιτάχυνσης δεν ξεπερνάνε το όριο βάδισης, είτε γιατί η περιοχή βάδισης προλαβαίνει να τερματιστεί πριν προλάβει ο αλγόριθμος να αναγνωρίσει το zero crossing της επιτάχυνσης και επομένως να απορριφθεί εκείνο το βήμα. Παρόλα αυτά το ποσοστό επιτυχίας εντοπισμού βημάτων υπολογίζεται ως

$$\text{successRate} = \frac{377 \text{ steps}}{384 \text{ steps}} = 0.9818 \approx 98.2\%$$

ενώ το απόλυτο σφάλμα απόστασης δεδομένων των μη εγγεγραμμένων βημάτων, στο

1.3%. Αξίζει να σημειωθεί πως, αν προσμετρηθεί το μέσο μήκος βήματος

$$stepAvg = \frac{308.4 \text{ m}}{384 \text{ step}} = 0.803 \text{ m/step}$$

, στην θέση των μη καταγεγραμμένων βημάτων, το συνολικό σφάλμα απόστασης θα υπολογίζοταν:

$$meanError = \left| 1 - \frac{304.4 + 7 \cdot 0.803}{308.4} \right| = \left| 1 - \frac{310.021}{308.4} \right| = \left| 1 - 1.00525 \right| \approx 0.5\%$$

Για τις στροφές παρατηρούμε πως όταν γίνονται πιο απότομα, δηλαδή σε μικρότερο χρονικό διάστημα από τις υπόλοιπες, ή κατά την διάρκεια της περιστροφής το παράθυρο τερματιστεί στιγμιαία, τότε αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από την πραγματικότητά. Βέβαια συμπεριλαμβανομένων των τιμών μεγάλης απόκλισης (32.1%, 27.6%) ο μέσος όρος σφάλματος των στροφών του χρήστη, σύμφωνα με τον [Πίνακα 5.19](#), υπολογίζεται στο 11.7%. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όπου πραγματοποιούμε κάθετες στροφές, το απόλυτο σφάλμα μεταφράζεται σε απόκλιση 10.5 περίπου μοιρών ή αλλιώς σε 0.18 rad.

PF - Localization

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες εξαγωγής συντελεστών απόδοσης των πειραμάτων επισκεψιμότητας. Ο [Πίνακας 5.20](#) αντιστοιχεί στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον οικιακό χώρο και τα δεδομένα του εξήχθησαν από τους αντίστοιχους πίνακες σύγχυσης ([5.14](#), [5.17](#)). Αντίστοιχα ο [Πίνακας 5.21](#) αναφέρεται στα πειράματα που υλοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου και τα δεδομένα του έχουν εξαχθεί από τους πίνακες σύγχυσης των [5.21](#) και [5.24](#).

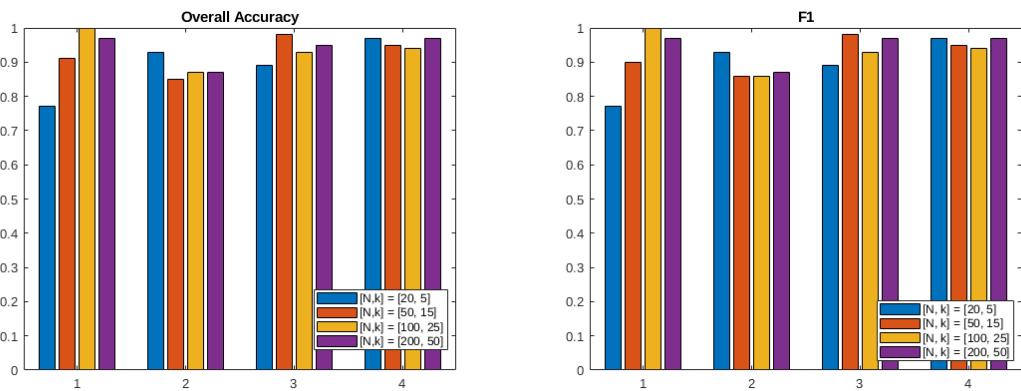
[N, k]	OA	P_{1-4}				R_{1-4}				Weighted F1
20,5	0.77	0.67	1.00	1.00	0.67	1.00	0.65	1.00	0.80	0.77
50,15	0.91	1.00	0.88	0.83	1.00	1.00	1.00	0.83	0.75	0.90
100,25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
200,50	0.97	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.97
20,5	0.93	1.00	0.95	0.89	0.92	1.00	0.90	1.00	0.85	0.93
50,15	0.85	0.57	1.00	0.69	1.00	1.00	0.81	1.00	0.77	0.86
100,25	0.87	0.67	0.94	0.82	0.86	0.67	0.77	0.93	1.00	0.86
200,50	0.87	1.00	0.94	0.82	0.82	0.80	0.71	1.00	1.00	0.87

Πίνακας 5.20: Μετρικές αξιολόγησης πειραμάτων οικιακού χώρου

[N, k]	OA	P_{1-3}			R_{1-3}			Weighted F1
20,5	0.89	0.82	0.93	1.00	0.96	1.00	0.72	0.89
50,15	0.98	1.00	0.93	1.00	0.96	1.00	1.00	0.98
100,25	0.93	0.88	0.93	1.00	0.96	1.00	0.83	0.93
200,50	0.95	0.88	1.00	1.00	1.00	0.94	0.89	0.97
20,5	0.97	0.94	1.00	0.96	0.94	1.00	0.96	0.97
50,15	0.95	0.95	0.91	1.00	1.00	1.00	0.88	0.95
100,25	0.94	0.86	0.95	1.00	1.00	1.00	0.85	0.94
200,50	0.97	0.95	1.00	0.96	0.95	1.00	0.96	0.97

Πίνακας 5.21: Μετρικές αξιολόγησης πειραμάτων στον χώρο του εργαστηρίου

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετρικών απόδοσης OA και F1 για το σύνολο των πειραμάτων φαίνονται [Σχήμα 5.26](#). Η σειρά ομαδοποίησης των ραβδογράμμων αντιστοιχεί και στην σειρά παρουσίασης των πειραμάτων (Οικιακός χώρος 1-2, Εργαστηριακός χώρος 1-2).



(α') Ραβδόγραμμα OA για κάθε πείραμα

(β') Ραβδόγραμμα F1 για κάθε πείραμα

Σχήμα 5.26: Ραβδογράμματα συντελεστών απόδοσης πληροφοριών επισκεψιμότητας

Παρατηρώντας και τα αντίστοιχα σχήματα διαδρομών χρήστη ([5.15](#), [5.18](#), [5.22](#), [5.25](#)), γίνεται αντιληπτό πως για μεγάλο αριθμό σωματιδίων του φίλτρου, συνεπώς και μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων που συμβάλλουν στην εκτίμηση της θέσης του χρήστη, η διαδρομή τείνει να αποτυπώνεται πιο πιστά για τον χώρο του εργαστηρίου αλλά όχι για τον μεγαλύτερο ($N = 200, k = 50$). Άξιο αναφοράς είναι πως στα πειράματα του οικιακού χώρου, εξαιτίας των πολύ κοντινών αποστάσεων σε εμπόδια, τα σωματίδια λάμβαναν μικρότερο βάρος κατά την κίνηση ανάμεσα στα εμπόδια και επομένως η εκτίμηση θέσης του χρήστη αδυνατούσε να ακολουθήσει την πραγματική απόλυτη θέση του. Κατ' επέκταση αυτής της συμπεριφοράς στο [Σχήμα 5.15β'](#) φαίνεται να εκτίμησε πως ο χρήστης ακολουθούσε παράλληλη διαδρομή η οποία είχε περισσότερο χώρο κίνησης. Επίσης στο [Σχήμα 5.15β'](#) ο χρήστης πέρασε μέσα από το εμπόδιο. Το τελευταίο συνέβη εξαιτίας του ίδιου λόγου, μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση είχαν διαμοιραστεί δύο particle clusters εκατέρωθεν του εμποδίου, με αποτέλεσμα η εκτίμηση θέσης να εντοπίζεται κατά το μέσο αυτών, ενώ αξιοσημείωτο είναι πως για την συγκεκριμένη συνέδρια η πληροφορία επισκεψιμότητας δεν περιείχε σφάλματα. Παρόλα αυτά τα δεδομένα της επισκεψιμότητας και η αναγνώριση των δωματίων για

τα υπόλοιπα πειράματα από το σύστημα έχουν αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς παρατηρείται μικρή απόκλιση από τις πραγματικές τιμές.

Σε αντίθεση με τον οικιακό χώρο, οι διαδρομές των πειραμάτων εργαστηριακού χώρου περιγράφουν πιο αποτελεσματικά την πραγματική κίνηση του χρήστη, κυρίως λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων του χώρου και συνεπώς της μεγαλύτερης ελευθερίας κίνησης των σωματιδίων. Παρά το γεγονός ότι δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις διαδρομές, στο πρώτο πείραμα ([Σχήμα 5.22α'](#) και [Σχήμα 5.22γ'](#)) παρατηρείται μια ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση των δεδομένων της επισκεψιμότητας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πειράματα διότι στην κάτω γωνία δεξιά του χάρτη κατά την διάρκεια των πειραμάτων δεν υπήρχε στην πραγματικότητα εμπόδιο, οπότε καθώς πραγματοποιούνταν η περιήγηση του χώρου σε εκείνο το σημείο, τα σωματίδια προσπαθούσαν να το αποφύγουν με αποτέλεσμα η εκτίμηση της θέσης να μεταφερθεί αρκετά ώστε να καταγραφεί αλλαγή τοποθεσίας από τον διάδρομο, στον ηλεκτρολογικό πάγκο.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικές εργασίας υλοποιήθηκε ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικό χώρο με χρήση αισθητήρων κινητού τηλεφώνου, και αναπτύχθηκε μέσω εφαρμογής χρήστη σε περιβάλλον Android με τη χρήση γλώσσας προγραμματισμού JavaScript και το framework ReactNative. Στόχος της εργασίας αποτελούσε την εξαγωγή πληροφοριών επισκεψιμότητας τοποθεσιών εντός του χώρου στον οποίο περιηγείται ο χρήστης.

Η εφαρμογή Android που αναπτύχθηκε λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, αυτόνομα και ανεξάρτητα από εξωτερικές διατάξεις (Wi-Fi, cameras, bluetooth κ.α) προσφέροντας μια απλούστερη λύση στο πρόβλημα εντοπισμού θέσης. Είναι απλή στην χρήση και παρέχει στον χρήστη τις πληροφορίες που χρειάζεται σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον περιέχει βοηθητικές λειτουργίες για την διευκόλυνση τόσο της χρήσης ανά πάσα στιγμή, όσο και της υλοποίησης των πειραματικών μελετών.

Όπως αναφέρθηκε στο [κεφάλαιο 1](#), παρόλο που εκτιμάται ανά πάσα στιγμή η ακριβής τοποθεσία του χρήστη, η επισκεψιμότητα δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στην ορθή κατηγοριοποίηση του τμήματος του περιβάλλοντος χώρου στον οποίο βρίσκεται. Στο [κεφάλαιο 5](#) παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων και με βάση αυτά καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Το σύστημα εντοπίζει με μεγάλη επιτυχία τα βήματα του χρήστη σε πραγματικό χρόνο καθώς αυτός περιηγείται του χώρου. Όμως ανά περιπτώσεις, είτε κατά την εκκίνηση βάδισης είτε κατά τον τερματισμό ενδέχεται να απορριφθεί κάποιο βήμα λόγω κυρίως της αρκετά βάδισης χαμηλής κορυφής της επιτάχυνσης που παράγει με αποτέλεσμα να μην ξεπεράσει το όριο εντοπισμού του βήματος. Παρόλα αυτά το ποσοστό εντοπισμού βήμάτων παραμένει αρκετά υψηλό.
- Η ενσωματωμένη λειτουργία εκτίμησης απόστασης του χρήστη παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας. Η χρήση εμβιομηχανικού μοντέλου σε συνδυασμό με την βαθμονόμηση του, οδηγούν στον αξιόπιστο υπολογισμό μήκους βήματος όπου αθροιστικά υπολογίζεται το μήκος της διαδρομής του

χρήστη.

- Το σύστημα ανιχνεύει ορθά τα παράθυρα των περιστροφών του χρήστη και παράγει την εκτίμηση της γωνίας αυτών. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, λόγω της εξάρτησης του υποσυστήματος αποκλειστικά από το γυροσκόπιο, ο θόρυβος των μετρήσεων που ενδέχεται να περιέχεται, ανεξάρτητα από την αρχική προ-επεξεργασία του σήματος, οδηγεί στην μείωση της απόδοσης του.
- Το σύστημα μπορεί να εμφανίζει την εκτίμηση της θέσης του ανά πάσα στιγμή, και γίνεται αυτόματα η ενημέρωσή της στην οθόνη της κινητής συσκευής όταν το σύστημα αναγνωρίσει επιτυχώς είτε event στροφής είτε event βήματος.
- Έχοντας ενσωματώσει την πληροφορία κατακερματισμού του χώρου, η εφαρμογή μπορεί και αναγνωρίζει κάθε χρονική στιγμή σε ποιο δωμάτιο βρίσκεται ο χρήστης και εμφανίζει την αντίστοιχη πληροφορία στην οθόνη.
- Το σύστημα εξάγει πληροφορία επισκεψιμότητας των τοποθεσιών του χώρου του χρήστη με μεγάλη αποτελεσματικότητα ενώ οι αποκλίσεις των μετρήσεων της εφαρμογής με την πραγματικότητα είναι ικανοποιητικά μικρές.

Η εφαρμογή του κινητού είναι αρκετά αποτελεσματική για την εξαγωγή πληροφοριών επισκεψιμότητας ενώ αξιοποιεί μόλις δύο αισθητήρες, ενώ παράλληλα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και δεν βασίζεται σε κάποια άλλη εξωτερική διάταξη. Επιπλέον παρατηρείται ικανοποιητική απόδοση των των υποσυστημάτων PDR για την αναγνώριση καταστάσεων στροφής και μετακίνησης του χρήστη, ενώ η εκτίμηση μήκους βήματος λειτουργεί με συνέπεια ενώ οι διακυμάνσεις των σφαλμάτων διατηρούνται σταθερά μικρές.

6.2 Προβλήματα

Από τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν από την αρχή ήταν η υλοποίηση προσαρμοστικού φίλτρου Kalman το οποίο θα αντικαθιστούσε την διαδικασία PDR, διότι απαιτούσε την σωστή αλγορίθμική μοντελοποίηση της ανθρώπινης κίνησης πράγμα που το καθιστούσε δύσκολο. Παράλληλα έγινε η προσπάθεια υλοποίησης συνδυασμού των μεθόδων με την υλοποίηση AKF σφαλμάτων ούτως ώστε να διορθώνει τις πορεία του χρήστη κατά την διάρκεια της περιήγησης του. Παρά την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος η αυτούσια μέθοδος PDR σε συνδυασμό με ένα PF αποδείχθηκε πιο αποδοτική λύση.

Επιπλέον, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάστηκαν ήταν η διασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας της κινητής συσκευής. Λόγω της μικρής υπολογιστικής ισχύος, οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονταν, έπρεπε να καταναλώνουν όσο δυνατόν λιγότερους πόρους γίνεται. Παράλληλα λόγω της υλοποίησης λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, κατά την δοκιμή και τον πειραματικό έλεγχο εμφανιζόντουσαν φαινόμενα καθυστερήσεων (lag) με αποτέλεσμα ή να καταγράφονται τα δεδομένα σε ύστερο χρόνο είτε να απορρίπτονταν δεδομένα μέχρι την στιγμή που θα ήταν διαθέσιμοι ξανά οι πόροι του κινητού.

Ένα διαφορετικής φύσης πρόβλημα ήταν η διάθεση των χαρτών για την δοκιμή των αλγορίθμων και την πειραματική μελέτη, ενώ οι χάρτες έχριζαν επεξεργασίας ούτως

ώστε να αποθηκεύονται και να επεξεργάζονται στη σωστή μορφή που προϋποθέτουν οι αλγόριθμοι της εφαρμογής.

6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η βασική πρόταση προέκτασης της εφαρμογής είναι η αντικατάσταση της υπάρχουσας υλοποίησης για την αναγνώριση και υπολογισμού περιστροφών χρήστη με μία πιο εξελιγμένη μέθοδο η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιεί επιπλέον δεδομένα και από το μαγνητόμετρο της συσκευής ούτως ώστε να μειωθεί σημαντικά το μέγεθος του σφάλματος περιστροφών που παράγεται. Αρχικά προτείνεται η χρήση της υλοποίησης του Kalman φίλτρου και η μετατροπή αυτού ώστε να εξειδικεύεται στην εκτίμηση της κατεύθυνσης του χρήστη παρά στην εύρεση κατάστασης θέσης του, αλλά παράλληλα, οι συνδυαστικές προσεγγίσεις, που χρησιμοποιούν δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες ή αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για τη βελτίωση της εκτίμησης της θέσης και της κατεύθυνσης, είναι ιδιαίτερα υποσχόμενες.

Για τον εντοπισμό των βημάτων του χρήστη και την εκτίμηση αποστάσεων, παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που παράγονται από την παρούσα λύση, η υλοποίηση ενός μοντέλου δυναμικού εντοπισμού βημάτων καθώς και δυναμική εκτίμηση βήματος θα σήμαινε σημαντική βελτίωση του παρόντος συστήματος. Αυτό που προτείνεται είναι η χρήση απλών ασαφών ελεγκτών για την αναγνώριση μεγάλου μεσαίου ή μικρού βήματος και να υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο δυναμικά το μήκος του βήματος.

Η μεγαλύτερη πρόκληση που εισάγουν τα συστήματα PDR τα οποία αξιοποιούν τους αισθητήρες κινητών τηλεφώνων είναι η αναγνώριση της κίνησης του χρήστη ανεξαρτήτως θέσης και χρήσης της συσκευής από τον χρήστη για κάθε στιγμή. Δηλαδή ανεξάρτητα από το ποιο σημείο του σώματος είναι τοποθετημένη η συσκευή (τσέπη, χέρια, τσάντα κλπ) μια αντίστοιχη εφαρμογή να είναι σε θέση να παράγει και να εξάγει αποτελέσματα τοποθεσίας χρήστη εντός εσωτερικών χώρων.

Στα πλαίσια ανάπτυξής της εφαρμογής Android, η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων και η μη βέλτιστη διαχείριση των εργαλείων που προσφέρει η JavaScript και η ReactNative δίνει περιθώρια στην μετέπειτα εξέλιξη της εφαρμογής χρήστη τόσο σε αλγορίθμικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο απόδοσης υλικού. Επομένως μπορεί να χρειαστούν διαδικασίες βελτιστοποίησης κώδικα και για τους επιμέρους αλγορίθμους αλλά και για την βελτίωση της διεπαφής χρήστη.

Παράτημα Α'

Ακρωνύμια και συντομογραφίες

3D 3-Dimension

AKF Adaptive Kalman Filter

DR Dead Reckoning

FN False Negative

FP False Positive

GIS Geographic Information System

GPS Global Positioning System

IDE Integrated Development Environment

INS Inertial Navigation System

IoT Internet of Things

IPS Indoors Positioning System

KF Kalman Filter

LiDAR Light Detection And Ranging

OA Overall Accuracy

OEM Original Equipment Manufacturer

PDR Pedestrian Dead Reckoning

PF Particle Filter

RF Radio Frequency

ROS Robot Operating System

RTLS Real Time Locating System

SDK Software Development Kit

SDUP Step Detection and UPdate

SLAM Simultaneous Localization And Mapping

TN True Negative

TP True Positive

UI User Interface

URU User Rotation Update

ZARU Zero Angular Rate Update

ZEMU ZERo Movement Update

KMO Κινητός Μέσος Όρος

Βιβλιογραφία

- [1] G. Cicirelli, D. Impedovo, V. Dentamaro, R. Marani, G. Pirlo, and T. R. D’Orazio, “Human gait analysis in neurodegenerative diseases: A review,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 26, no. 1, pp. 229–242, 2022.
- [2] E. Y. S. Chao, *Biomechanics of the Human Gait*. New York, NY: Springer New York, 1986, pp. 225–244.
- [3] C. Prakash, R. Kumar, and N. Mittal, “Recent developments in human gait research: parameters, approaches, applications, machine learning techniques, datasets and challenges,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 49, pp. 1–40, 01 2018.
- [4] A. Saboor, T. Kask, A. Kuusik, M. Alam, Y. Le Moullec, I. Niazi, A. Zoha, and R. Ahmad, “Latest research trends in gait analysis using wearable sensors and machine learning: A systematic review,” *IEEE Access*, vol. 8, 09 2020.
- [5] R. Harle, “A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1281–1293, 2013.
- [6] Y. Song, S. Shin, S. Kim, D. Lee, and K. H. Lee, “Speed estimation from a tri-axial accelerometer using neural networks,” in *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2007, pp. 3224–3227.
- [7] E. Bishop and Q. Li, “Walking speed estimation using shank-mounted accelerometers,” in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 5096–5101.
- [8] J. W. Kim, H. J. Jang, D.-H. Hwang, and C. Park, “A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system,” *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 01, pp. 0–0, 2004. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:52089042>
- [9] M. Banitalebi Dehkordi, A. Frisoli, E. Sotgiu, and C. Loconsole, “Pedestrian indoor navigation system using inertial measurement unit,” *International Journal of Sensor Networks and Data Communications*, vol. 3, pp. 1–9, 06 2014.
- [10] J. Park, Y. Kim, and J. Lee, “Waist mounted pedestrian dead-reckoning system,” 11 2012, pp. 335–336.
- [11] P. Goyal, V. J. Ribeiro, H. Saran, and A. Kumar, “Strap-down pedestrian dead-reckoning system,” in *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2011, pp. 1–7.

- [12] X. Hou and J. Bergmann, "Pedestrian dead reckoning with wearable sensors: A systematic review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 143–152, 2021.
- [13] U. Steinhoff and B. Schiele, "Dead reckoning from the pocket - an experimental study," in *2010 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2010, pp. 162–170.
- [14] C. Yu, H. Luo, Z. Fang, Q. Wang, and W. Shao, "Adaptive kalman filtering-based pedestrian navigation algorithm for smartphones," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, p. 172988142093093, 06 2020.
- [15] A. M. Sabatini, "Kalman-filter-based orientation determination using inertial/magnetic sensors: Observability analysis and performance evaluation," *Sensors*, vol. 11, no. 10, pp. 9182–9206, 2011. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/10/9182>
- [16] J. W. Song and C. G. Park, "Enhanced pedestrian navigation based on course angle error estimation using cascaded kalman filters," *Sensors*, vol. 18, no. 4, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1281>
- [17] W. Kang and Y. Han, "Smartpdr: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 2906–2916, 2015.
- [18] G. Chen, X. Meng, Y. Wang, Y. Zhang, P. Tian, and H. Yang, "Integrated wifi/pdr/smartphone using an unscented kalman filter algorithm for 3d indoor localization," *Sensors*, vol. 15, no. 9, pp. 24 595–24 614, 2015. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/9/24595>
- [19] B. Wang, X. Liu, B. Yu, R. Jia, and X. Gan, "Pedestrian dead reckoning based on motion mode recognition using a smartphone," *Sensors*, vol. 18, no. 6, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1811>
- [20] M. Khedr and N. El-Sheimy, "A smartphone step counter using imu and magnetometer for navigation and health monitoring applications," *Sensors*, vol. 17, no. 11, 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/11/2573>
- [21] J. Seo, Y. Chiang, T. Laine, and A. Khan, "Step counting on smartphones using advanced zero-crossing and linear regression," *ACM IMCOM 2015 - Proceedings*, 01 2015.
- [22] Y. Yao, L. Pan, W. Feng, X. Xu, X. Liang, and X. Xu, "A robust step detection and stride length estimation for pedestrian dead reckoning using a smartphone," *IEEE Sensors Journal*, vol. PP, pp. 1–1, 04 2020.
- [23] H. Weinberg, "Using the adxl202 in pedometer and personal navigation applications," 2002. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55560101>
- [24] N.-H. Ho, P. H. Truong, and G.-M. Jeong, "Step-detection and adaptive step-length estimation for pedestrian dead-reckoning at various walking speeds using a smartphone," *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1423>

- [25] S. Shin, C. Park, J. Kim, H. Hong, and J. Lee, "Adaptive step length estimation algorithm using low-cost mems inertial sensors," 03 2007, pp. 1 – 5.
- [26] N. Fallah, I. Apostolopoulos, K. Bekris, and e. folmer, "Indoor human navigation systems: A survey," *Interacting with Computers*, vol. 25, pp. 21–33, 01 2013.
- [27] S. He and S.-H. G. Chan, "Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 466–490, 2016.
- [28] Y. Zhuang, J. Yang, Y. Li, L. Qi, and N. El-Sheimy, "Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons," *Sensors*, vol. 16, no. 5, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/596>
- [29] A. Alarifi, A. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. A. Al-Ammar, and H. S. Al-Khalifa, "Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, 2016. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/5/707>
- [30] Y. Wu, F. Tang, and H. Li, "Image-based camera localization: an overview," *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, vol. 1, 12 2018.
- [31] F. Höflinger, J. Hoppe, R. Zhang, A. Ens, L. Reindl, J. Wendeberg, and C. Schindelhauer, "Acoustic indoor-localization system for smart phones," 02 2014, pp. 1–4.
- [32] Y. Li, P. Zhang, X. Niu, Y. Zhuang, H. Lan, and N. El-Sheimy, "Real-time indoor navigation using smartphone sensors," in *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2015, pp. 1–10.
- [33] A. Crivello, M. Agostini, F. Palumbo, and F. Potortì, "An open-source framework for smartphone-based indoor localization," 02 2018.
- [34] F.-S. Ning and Y.-C. Chen, "Combining a modified particle filter method and indoor magnetic fingerprint map to assist pedestrian dead reckoning for indoor positioning and navigation," *Sensors*, vol. 20, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/185>
- [35] M. Fusca, P. Perego, and G. Andreoni, "Method for wearable kinematic gait analysis using a harmonic oscillator applied to the center of mass," *Journal of Sensors*, vol. 2018, 04 2018.
- [36] A. Abadleh, E. Al-Hawari, E. Alkafaween, and H. Al-Sawalqah, "Step detection algorithm for accurate distance estimation using dynamic step length," in *2017 18th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, 2017, pp. 324–327.
- [37] J. Borenstein, L. Ojeda, and S. Kwanmuang, "Heuristic reduction of gyro drift in imu-based personnel tracking systems," *Journal of Navigation*, vol. 62, pp. 41 – 58, 01 2009.
- [38] D. Wu, L. Xia, and J. Geng, "Heading estimation for pedestrian dead reckoning based on robust adaptive kalman filtering," *Sensors*, vol. 18, no. 6, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1970>

- [39] J. Lin, C. Zou, L. Lan, S. Gu, and X. An, “Deep heading estimation for pedestrian dead reckoning,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1656, no. 1, p. 012009, sep 2020. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1656/1/012009>
- [40] T. Li, M. Bolic, and P. M. Djuric, “Resampling methods for particle filtering: Classification, implementation, and strategies,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 32, no. 3, pp. 70–86, 2015.