ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Πρωτοτύπου Συστήματος Εντοπισμού Performer και Ελέγχου Moving Light μέσω UWB και grandMA2

Ιωάννης Κ. Δίπλας, ΑΕΜ: 220080

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Καραμπατζάκης,
Αν. Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής, ΔΠΘ

ΚΑΒΑΛΑ, 2026

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Πρωτοτύπου Συστήματος Εντοπισμού Performer και Ελέγχου Moving Light μέσω UWB και grandMA2

Δίπλας Ιωάννης,
ΑΕΜ: 220080

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία υποβλήθηκε στο Τμήμα Πληροφορικής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης για την απόκτηση του πτυχίου του Τμήματος.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Καραμπατζάκης, Αν. Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής, ΔΠΘ

2ο Μέλος: Δρ. Πέτρος Αμανατίδης, Διδάσκων Ακαδ. Εμπειρία, Τμήμα Πληροφορικής, ΔΠΘ

3ο Μέλος: Βασίλειος Τσουκαλάς, ΕΤΕΠ, Τμήμα Πληροφορικής, ΔΠΘ

ΚΑΒΑΛΑ, 2026

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Ιωάννης Δίπλας, 2026

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πληροφορικής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης δε δηλώνει απαραιτήτως την αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα/ως.

Τήρηση ακαδημαϊκών αρχών και δεοντολογίας

Η παρούσα εργασία είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε εξ ολοκλήρου από τον/την φοιτητή/φοιτήτρια Δίπλα Ιωάννη του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής, υπό την καθοδήγηση του/της επιβλέποντα/επιβλέπουσας.

Ο/Η φοιτητής/φοιτήτρια βεβαιώνει ότι κατά την εκπόνηση και τη συγγραφή της παρούσας πτυχιακής εργασίας τήρησε τα προβλεπόμενα από τον νόμο, τον εσωτερικό κανονισμό και τον κανονισμό εκπόνησης πτυχιακών εργασιών του Τμήματος, καθώς και ότι σεβάστηκε πλήρως τις Αρχές της Ακαδημαϊκής Ηθικής και του Κώδικα Δεοντολογίας, οι οποίες απαγορεύουν την παραποίηση των ερευνητικών/πειραματικών αποτελεσμάτων, την αναφορά ψευδών στοιχείων, την κατάχρηση της διανοητικής ιδιοκτησίας τρίτων και τη λογοκλοπή.

Ο/Η συγγραφέας

Ιωάννης Δίπλας

DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE
SCHOOL OF SCIENCE
DEPARTMENT OF INFORMATICS

Design, Implementation and Evaluation of a Prototype Performer Localization and Moving-Light Control System via UWB and grandMA2

UNDERGRADUATE DISSERTATION

Diplas Ioannis, RN: 220080

A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the undergraduate degree in the Department of Informatics, Democritus University of Thrace.

COMMITTEE OF EXAMINERS

Supervisor: Dimitrios Karampatzakis, Associate Professor, Department of Informatics, DUTH

Member 2: Dr. Petros Amanatidis, Adjunct Professor, Department of Informatics, DUTH

Member 3: Vasileios Tsoukalas, ETEP, Department of Informatics, DUTH

Kavala, 2026

All rights reserved

Copyright © Ioannis Diplas, 2026

The approval of the undergraduate dissertation by the Department of Informatics, Democritus University of Thrace, does not necessarily indicate the acceptance of the views of the author.

Fulfillment of academic principles and ethics

The present undergraduate dissertation is original and was prepared entirely by the student Ioannis Diplas of the Undergraduate Program of Studies of the Department of Primary Education, under the guidance of the supervisor. The student certifies that during the preparation and writing of this undergraduate dissertation he/she complied with the provisions of the law and the corresponding internal regulations of the Department, as well as that he/she fully respected the Principles of Academic Ethics and the Code of Ethics, which prohibit falsification of research/experimental results, false reporting, misuse of third-party intellectual property and plagiarism.

The author

Ioannis Diplas

……

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου Δημήτρη Καραμπατζάκη και Πέτρο Αμανατίδη για την πολύτιμη βοήθεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση, η υλοποίηση και η αξιολόγηση ενός πρωτοτύπου συστήματος εντοπισμού performer και ελέγχου κινούμενου φωτιστικού σώματος σε περιβάλλον σκηνής, με χρήση τεχνολογίας Ultra-Wideband, πλακετών DWM1001-DEV, υπολογιστή Raspberry Pi και λογισμικού grandMA2 onPC. Στόχος της εργασίας ήταν να διερευνηθεί κατά πόσο ένα χαμηλού έως μεσαίου κόστους σύστημα πραγματικού χρόνου μπορεί να παρέχει χρήσιμη πληροφορία θέσης προς μία κονσόλα φωτισμού, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο αυτόματος προσανατολισμός ενός φωτιστικού προς την εκτιμώμενη θέση ενός ατόμου που κινείται στη σκηνή.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίστηκε σε τρεις βασικούς άξονες: στο δίκτυο UWB με anchors και tag, στη συλλογή των δεδομένων θέσης μέσω passive listener συνδεδεμένου σε Raspberry Pi και στη μετατροπή των δεδομένων θέσης σε πακέτα PosiStageNet ώστε αυτά να αναγνωρίζονται από το grandMA2 ως εξωτερική πηγή tracking. Για την επαλήθευση του σκέλους της MA2 ανεξάρτητα από το UWB υποσύστημα αναπτύχθηκε ξεχωριστό δοκιμαστικό εργαλείο πληκτρολογίου, το οποίο απέστειλε τεχνητές, πλήρως ελεγχόμενες συντεταγμένες προς τη grandMA2.

Κατά τη διάρκεια της εργασίας αναπτύχθηκαν πολλαπλές εκδόσεις λογισμικού σε Python για τη σειριακή επικοινωνία με το DWM1001, για τη διαχείριση της εντολής les, για τον έλεγχο ποιότητας των μετρήσεων, για την εξομάλυνση της τροχιάς και για την αποστολή PSN πακέτων. Η πειραματική διαδικασία κατέδειξε ότι το υποσύστημα PSN και η ολοκλήρωση με τη grandMA2 λειτουργούν ορθά, υπό την προϋπόθεση σωστής παραμετροποίησης του δικτύου, σωστής τοποθέτησης του φωτιστικού στο εικονικό 3D περιβάλλον και σωστής αντιστοίχισης αξόνων. Αντίθετα, το κύριο τεχνολογικό όριο του πρωτοτύπου εντοπίστηκε στο επίπεδο του UWB localization, όπου παρουσιάστηκαν jitter, χρονική καθυστέρηση και μειωμένη ακρίβεια, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια κίνησης του tag.

Το βασικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι το υλοποιημένο σύστημα αποτελεί λειτουργικό proof of concept για την ολοκλήρωση UWB tracking με κονσόλα φωτισμού και προσφέρει επαρκές αποτέλεσμα για coarse tracking, πειραματική διερεύνηση και επίδειξη της έννοιας. Ωστόσο, με τη συγκεκριμένη πλατφόρμα DWM1001/PANS δεν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη πιστότητα και σταθερότητα ώστε το σύστημα να χρησιμοποιηθεί ως πλήρως αξιόπιστο, ακριβές και ομαλό automated follow spot σε απαιτητικές συνθήκες ζωντανής παραγωγής. Παρά τον περιορισμό αυτό, η εργασία τεκμηριώνει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία υλοποίησης, δοκιμών και αξιολόγησης και ανοίγει τον δρόμο για υβριδικές αρχιτεκτονικές με συνδυασμό UWB και οπτικού εντοπισμού στο μέλλον.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα Υπολογιστών, Εντοπισμός Θέσης, Συστήματα Ελέγχου Φωτισμού

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: UWB, DWM1001, Raspberry Pi, grandMA2, PosiStageNet

ABSTRACT

This thesis focuses on the design, implementation and evaluation of a prototype performer localization and moving-light control system for stage environments, based on Ultra-Wideband technology, DWM1001-DEV development boards, a Raspberry Pi host and the grandMA2 onPC lighting platform. The main objective was to investigate whether a low- to medium-cost real-time positioning system could provide usable positional data to a lighting console, allowing a moving fixture to automatically follow the estimated position of a performer on stage.

The proposed architecture was built around three main layers: the UWB real-time localization network consisting of anchors and a tag, the acquisition of location data through a passive listener connected to a Raspberry Pi, and the conversion of the location data into PosiStageNet packets so that grandMA2 could treat the external information as a tracking source. In order to validate the MA2 side independently from the UWB subsystem, a separate keyboard-based test application was also developed, capable of sending fully controlled virtual coordinates directly to the console.

Several Python software versions were implemented during the project for serial communication, shell control, les-based data acquisition, measurement filtering, trajectory smoothing and PSN packet generation. Experimental evaluation showed that the PSN subsystem and the integration with grandMA2 operate correctly, provided that network configuration, coordinate mapping and fixture positioning inside MA3D/grandMA2 are properly set. In contrast, the main technological limitation of the prototype was observed in the UWB localization stage, where jitter, latency and reduced positional accuracy appeared, especially while the tag was in motion.

The main conclusion of this work is that the implemented system is a functional proof of concept for integrating UWB tracking with a professional lighting control environment and can provide useful performance for coarse tracking, concept validation and educational demonstration. Nevertheless, with the selected DWM1001/PANS platform it is not possible to achieve the precision, smoothness and robustness required for a production-grade automated follow-spot solution. Despite this limitation, the thesis documents a complete methodology for integration, testing and critical evaluation and provides a foundation for future hybrid systems combining radio-based and optical tracking.

SUBJECT AREA: Computer Networks, Localization Systems, Lighting Control Systems

KEYWORDS: UWB, DWM1001, Raspberry Pi, grandMA2, PosiStageNet

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σχεδίαση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Πρωτοτύπου Συστήματος Εντοπισμού Performer και Ελέγχου Moving Light μέσω UWB και grandMA2 i

Σχεδίαση, Υλοποίηση και Αξιολόγηση Πρωτοτύπου Συστήματος Εντοπισμού Performer και Ελέγχου Moving Light μέσω UWB και grandMA2 iii

Design, Implementation and Evaluation of a Prototype Performer Localization and Moving-Light Control System via UWB and grandMA2 v

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ xi

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ xi

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 12

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο 13

2.1 Τεχνολογία UWB και συστήματα RTLS 13

2.2 Η πλατφόρμα DWM1001-DEV 13

2.3 PosiStageNet και grandMA2 14

2.4 Επαγγελματικά συστήματα stage tracking 14

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Απαιτήσεων και Στόχοι 14

3.1 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις 14

3.2 Ερευνητικά ερωτήματα 15

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση της Αρχιτεκτονικής 15

4.1 Συνολική ροή δεδομένων 15

4.2 Ρόλοι των κόμβων και περιορισμοί διάταξης 16

Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση Υλικού και Δικτύου UWB 16

5.1 Περιγραφή εξοπλισμού 16

5.2 Ρύθμιση του tag και του listener 16

Κεφάλαιο 6: Υλοποίηση Λογισμικού και Διασύνδεση με grandMA2 17

6.1 Βασική δομή του script UWB -> PSN 17

6.2 Keyboard test και απομόνωση της MA2 17

Κεφάλαιο 7: Πειραματική Μεθοδολογία 18

7.1 Σενάρια δοκιμών 18

7.2 Μετρικές αξιολόγησης 18

7.3 Μεθοδολογία debugging 19

Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα και Αξιολόγηση 19

8.1 Αποτελέσματα synthetic tracking 19

8.2 Αποτελέσματα πλήρους UWB tracking 19

8.3 Πειράματα με το quality factor 19

8.4 Πειράματα με smoothing και adaptive φίλτρα 20

8.5 Συνολική αποτίμηση 20

Κεφάλαιο 9: Συζήτηση – Περιορισμοί – Βελτιώσεις 20

9.1 Βασικοί περιορισμοί του πρωτοτύπου 20
9.2 Πιθανές βελτιώσεις με τα ίδια μέσα 20
9.3 Υβριδική μελλοντική κατεύθυνση 21
Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα 21
Βιβλιογραφία 21

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Συνολική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος 15

Σχήμα 2: Περιβάλλον DRTLS Manager και ρόλοι των κόμβων του UWB συστήματος.....17

Σχήμα 3: Εφαρμογή δοκιμής ελεγχόμενης αποστολής θέσης προς την grandMA2 onPC 18

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικός εξοπλισμός του συστήματος.....16

Πίνακας 2: Συχνά προβλήματα και ενέργειες αντιμετώπισης.....**Error! Bookmark not defined.**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	**Ελληνικός Όρος**
Performer localization	Εντοπισμός καλλιτέχνη
Moving light	Κινούμενο φωτιστικό
Tracking source	Πηγή δεδομένων παρακολούθησης
Listener	Παθητικός κόμβος παρακολούθησης
Quality factor	Δείκτης ποιότητας μέτρησης

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

UWB	Ultra-Wideband
RTLS	Real-Time Location System
PSN	PosiStageNet
PANS	Positioning and Networking Stack
LOS	Line of Sight
QF	Quality Factor
MA2	grandMA2 onPC
ΔΠΘ	Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η τεχνολογία του θεατρικού και συναυλιακού φωτισμού έχει μετακινηθεί τα τελευταία χρόνια από τη στατική προ-προγραμματισμένη φωτιστική σχεδίαση σε περιβάλλοντα όπου ζητείται ολοένα και περισσότερο η δυναμική προσαρμογή των φωτιστικών σε πραγματικό χρόνο. Σε παραγωγές με κινούμενα σκηνικά, πολυμεσικές προβολές, αυτοματισμούς και σύνθετη κινησιολογία performers, η δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής ενός φωτιστικού στη θέση ενός ανθρώπου αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η κλασική μορφή αυτής της ανάγκης είναι το follow spot, δηλαδή ένα φωτιστικό που ακολουθεί και φωτίζει διαρκώς έναν performer. Στην παραδοσιακή πρακτική ο έλεγχος αυτός γίνεται από χειριστή. Στη σύγχρονη τάση, όμως, υπάρχει ενδιαφέρον για αυτοματοποιημένη ή ημι-αυτοματοποιημένη εκδοχή.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκκίνησε ακριβώς από αυτή την ανάγκη: να διερευνηθεί αν είναι εφικτό να υλοποιηθεί ένα σύστημα το οποίο να παρακολουθεί έναν performer σε εσωτερικό χώρο, να υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο τη θέση του και να τροφοδοτεί μία κονσόλα φωτισμού με τις αντίστοιχες συντεταγμένες, ώστε ένα moving light να στραφεί προς το σωστό σημείο. Η αρχική ερευνητική υπόθεση ήταν ότι ένα οικονομικά προσιτό UWB σύστημα εντοπισμού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή συντεταγμένων, ενώ μία πλατφόρμα φωτισμού όπως η grandMA2 θα αναλάμβανε την κατανάλωση αυτών των δεδομένων μέσω ενός ανοιχτού πρωτοκόλλου όπως το PosiStageNet.

Το πρόβλημα αυτό είναι ενδιαφέρον για τρεις λόγους. Πρώτον, βρίσκεται στο σημείο τομής μεταξύ εντοπισμού θέσης, δικτυακής επικοινωνίας πραγματικού χρόνου και συστημάτων φωτισμού σκηνής. Δεύτερον, έχει σαφή πρακτική χρησιμότητα, καθώς ένα λειτουργικό σύστημα αυτής της κατηγορίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εκπαιδευτικές εφαρμογές, σε πειραματικά stage setups ή σε proof-of-concept λύσεις για ευρύτερη εμπορική αξιοποίηση. Τρίτον, αποκαλύπτει με ιδιαίτερα καθαρό τρόπο τα όρια μιας τεχνολογίας όταν αυτή επιχειρείται να μεταφερθεί από το θεωρητικά κατάλληλο πεδίο εφαρμογής της σε ένα πολύ πιο απαιτητικό περιβάλλον από άποψη χρονισμού και ακρίβειας.

Στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν πλακέτες DWM1001-DEV της Qorvo/Decawave, οι οποίες ενσωματώνουν την οικογένεια DWM1001 και το firmware PANS για γρήγορη ανάπτυξη RTLS εφαρμογών [1], [2]. Η επιλογή τους δικαιολογήθηκε από το γεγονός ότι επιτρέπουν την υλοποίηση ενός βασικού UWB συστήματος με anchors, tags και listener/gateway χωρίς ανάγκη σχεδίασης νέου hardware [3], [4]. Ωστόσο, όπως φάνηκε στην πορεία της ανάπτυξης, η σύνδεση ενός τέτοιου UWB συστήματος με μια απαιτητική εφαρμογή φωτισμού υψηλής ακρίβειας αναδεικνύει κρίσιμα ζητήματα σχετικά με το ρυθμό ενημέρωσης, το jitter, την ποιότητα των μετρήσεων και την ομαλότητα της τροχιάς.

Η εργασία δεν περιορίστηκε στην ανάπτυξη ενός script μεταφοράς δεδομένων. Αντίθετα, περιλάμβανε σειρά από τεχνικές φάσεις: ορισμό δικτύου UWB, ρύθμιση ρόλων initiator, active anchors, passive listener και tag, υλοποίηση κώδικα στον Raspberry Pi, δημιουργία και αποσφαλμάτωση packet generator για PSN, επαλήθευση της λειτουργίας της grandMA2 με τεχνητό tracker, διόρθωση της εικονικής θέσης του fixture στον χώρο, παραμετροποίηση φίλτρων και τελικά συστηματική αξιολόγηση του αποτελέσματος. Με άλλα λόγια, η εργασία εξελίχθηκε από απλή ιδέα αυτοματοποίησης φωτισμού σε ολοκληρωμένη διερεύνηση μιας σύνθετης τεχνολογικής αλυσίδας.

Από ακαδημαϊκή άποψη, το σημαντικότερο στοιχείο αυτής της εργασίας δεν είναι η απόλυτη επιτυχία του τελικού αποτελέσματος, αλλά η τεκμηριωμένη αποτύπωση του τι επιτυγχάνεται, τι δεν επιτυγχάνεται και γιατί. Σε αρκετές εφαρμοσμένες διπλωματικές και πτυχιακές εργασίες η αξία δεν βρίσκεται μόνο στην παράδοση ενός τέλειου συστήματος, αλλά στην ανάπτυξη μιας μεθόδου, στην πειραματική διερεύνηση εναλλακτικών και στην εξαγωγή βάσιμων τεχνικών συμπερασμάτων. Η παρούσα εργασία ακολουθεί ακριβώς αυτή τη λογική: παρουσιάζει το prototype, αξιολογεί την επίδοσή του, εντοπίζει τα όριά του και προτείνει ρεαλιστικές μελλοντικές βελτιώσεις.

Οι κύριοι στόχοι της εργασίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής. Πρώτον, να αποδειχθεί ότι είναι εφικτή η ροή δεδομένων θέσης από σύστημα UWB προς τη grandMA2 μέσω PSN. Δεύτερον, να εξεταστεί η σταθερότητα και η πρακτική χρηστικότητα αυτής της ροής σε πραγματικό moving-light setup. Τρίτον, να δημιουργηθούν βοηθητικά εργαλεία που να διαχωρίζουν το πρόβλημα της ραδιοεντόπισης από το πρόβλημα της σωστής στόχευσης φωτιστικού. Τέταρτον, να αποτιμηθεί ειλικρινά αν η συγκεκριμένη πλατφόρμα επαρκεί για ακριβές automated follow-spot. Πέμπτον, να διατυπωθούν προτάσεις για πιο ώριμες ή υβριδικές αρχιτεκτονικές σε μελλοντική συνέχεια της έρευνας.

Η υπόθεση εργασίας ελέγχεται με συνδυασμό υλοποίησης και πειραματικής αξιολόγησης. Το πρώτο επίπεδο αφορά την αμιγώς δικτυακή διασύνδεση με τη grandMA2: εδώ το ερώτημα είναι αν το λογισμικό ελέγχου μπορεί πράγματι να δημιουργεί σωστά PSN packets και αν η κονσόλα τα αναγνωρίζει ως valid tracking source. Το δεύτερο επίπεδο αφορά τη γεωμετρία της σκηνής και του φωτιστικού: εδώ ελέγχεται αν η τοποθέτηση του fixture μέσα στον εικονικό χώρο της MA2 είναι σωστή. Το τρίτο επίπεδο αφορά την ποιότητα της εκτίμησης θέσης από το UWB. Η ανάγκη διαχωρισμού των τριών αυτών επιπέδων προέκυψε στην πράξη και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μεθοδολογικά κέρδη της εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Τεχνολογία UWB και συστήματα RTLS

Η τεχνολογία Ultra-Wideband αποτελεί μία ραδιοτεχνολογία ευρείας ζώνης, στην οποία η πληροφορία μεταδίδεται με ιδιαίτερα μικρής διάρκειας παλμούς και μεγάλο εύρος φάσματος. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά ως μία από τις πλέον κατάλληλες επιλογές για indoor positioning, ακριβώς επειδή μπορεί να επιτύχει σαφώς καλύτερη ακρίβεια από κλασικές τεχνολογίες όπως Wi-Fi ή Bluetooth, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει απαίτηση για εκτίμηση θέσης σε πραγματικό χρόνο [11]. Σύμφωνα με σύγχρονες ανασκοπήσεις, η UWB παραμένει ιδιαίτερα ελκυστική για RTLS εφαρμογές εξαιτίας του καλού συμβιβασμού μεταξύ ακρίβειας, ανθεκτικότητας και κόστους ανάπτυξης [11].

Ένα RTLS αποτελεί σύστημα στο οποίο υπάρχουν σταθεροί κόμβοι αναφοράς και ένας ή περισσότεροι κινητοί κόμβοι των οποίων η θέση υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η αρχή λειτουργίας μπορεί να στηρίζεται σε μετρήσεις χρόνου πτήσης, διαφοράς χρόνου άφιξης, γωνίας άφιξης ή σε υβριδικές τεχνικές. Στο πλαίσιο του DWM1001/PANS, ο τελικός χρήστης δεν υλοποιεί ο ίδιος όλο το localization stack, αλλά αξιοποιεί προκαθορισμένο firmware που του επιτρέπει να στήσει γρήγορα ένα δίκτυο anchors και tags [1], [2].

Παρά τα πλεονεκτήματα της UWB, η πραγματική συμπεριφορά ενός RTLS σε εσωτερικό χώρο εξαρτάται έντονα από τη γεωμετρία των anchors, τη γραμμή θέασης, τις ανακλάσεις, την παρουσία ανθρώπινου σώματος, το ύψος τοποθέτησης και τον τρόπο με τον οποίο το ίδιο το firmware πραγματοποιεί averaging ή filtering. Για τον λόγο αυτό, η απόδοση ενός UWB συστήματος δεν πρέπει να θεωρείται μόνο με βάση τις θεωρητικές δυνατότητες της τεχνολογίας, αλλά με βάση το συγκεκριμένο hardware, το firmware, το περιβάλλον εγκατάστασης και τον actuator που καλείται να οδηγήσει.

2.2 Η πλατφόρμα DWM1001-DEV

Η πλατφόρμα DWM1001-DEV είναι development board της Qorvo για αξιολόγηση του module DWM1001C [3], [4]. Σύμφωνα με την επίσημη περιγραφή του προϊόντος, η πλακέτα επιτρέπει την ταχεία συναρμολόγηση ενός πλήρους ασύρματου RTLS που περιλαμβάνει anchors, tags και gateways χωρίς ανάγκη σχεδίασης νέου hardware [4]. Η πλατφόρμα παρέχει USB σύνδεση για τροφοδοσία, debugging και σειριακή επικοινωνία, καθώς και shell/API μηχανισμούς για έλεγχο του συστήματος [3], [5], [6].

Το firmware PANS είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί επιτρέπει τη διαμόρφωση των κόμβων σε active anchors, initiator, tags και passive listeners. Μέσω shell mode είναι διαθέσιμες εντολές όπως aurg,

aurs, les και άλλες, οι οποίες διευκολύνουν τόσο τη λειτουργία όσο και το debugging [2], [6]. Αυτό καθιστά την πλατφόρμα πολύ ελκυστική για proof-of-concept έργα. Ταυτόχρονα όμως η χρήση προκαθορισμένου firmware σημαίνει ότι ο προγραμματιστής δεν έχει πλήρη ελευθερία να ελέγξει το localization stack, τα εσωτερικά φίλτρα και το update behavior.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε αυτή τη διττή φύση της πλατφόρμας. Από τη μία, η γρήγορη εκκίνηση του έργου δεν θα ήταν εφικτή χωρίς μια τόσο έτοιμη πλατφόρμα. Από την άλλη, ακριβώς επειδή το localization βασίζεται σε κλειστές επιλογές firmware, τα προβλήματα jitter και latency δεν μπορούν να εξαλειφθούν μόνο με host-side κώδικα.

2.3 PosiStageNet και grandMA2

Το PosiStageNet είναι πρωτόκολλο δικτυακής μεταφοράς δεδομένων tracking που χρησιμοποιείται στον χώρο του θεάματος. Η βασική του λειτουργία είναι να μεταφέρει μοναδικά IDs trackers και τις αντίστοιχες χωρικές συντεταγμένες με μορφή που μπορεί να καταναλωθεί από φωτιστικά, media servers, audio engines και άλλα stage systems. Στην παρούσα εργασία, το PSN λειτούργησε ως το κοινό λεξιλόγιο ανάμεσα στο Raspberry Pi και τη grandMA2.

Η χρήση PSN υπήρξε στρατηγική επιλογή. Χωρίς αυτό, το project θα ήταν ταυτόχρονα και localization experiment και κονσολο-ειδικό integration. Με το PSN, ο Raspberry λειτουργεί ως μεταφραστής: λαμβάνει θέσεις από UWB και τις μετατρέπει σε tracking packets. Αν αύριο το UWB αντικατασταθεί από vision ή motion capture, η grandMA2 μπορεί να παραμείνει ίδια. Αντίστοιχα, αν η κονσόλα αλλάξει, το localization layer μπορεί να διατηρηθεί.

Στην grandMA2, όμως, το να λαμβάνει κανείς valid tracking source δεν σημαίνει αυτόματα σωστή στόχευση. Όπως αποδείχθηκε και πειραματικά, η θέση του fixture στο τρισδιάστατο stage model, ο προσανατολισμός του και η σωστή αντιστοίχιση των αξόνων είναι εξίσου σημαντικά με την εγκυρότητα του ίδιου του πρωτοκόλλου. Αυτό εξηγεί γιατί ένα μέρος του debugging δεν αφορούσε καθόλου το UWB, αλλά την εσωτερική χωρική περιγραφή της grandMA2.

2.4 Επαγγελματικά συστήματα stage tracking

Στον επαγγελματικό χώρο υπάρχουν ολοκληρωμένες πλατφόρμες stage tracking, όπως το BlackTrax, που είναι σχεδιασμένες ακριβώς για παρακολούθηση performers και αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο με αξιοποίηση στη φωτιστική, ηχητική και οπτική παραγωγή [7], [13]. Τα συστήματα αυτά αποτελούν χρήσιμο σημείο σύγκρισης, όχι γιατί το παρόν prototype επιχειρεί να τα ανταγωνιστεί, αλλά επειδή δείχνουν ποιο είναι το επίπεδο επιδόσεων που απαιτείται για επαγγελματική χρήση.

Η αναφορά αυτή είναι σημαντική και για ένα δεύτερο λόγο. Βοηθά στην ορθή τοποθέτηση της παρούσας εργασίας: το υλοποιημένο σύστημα δεν αποτελεί ανταγωνιστικό εμπορικό προϊόν, αλλά ερευνητικό πρωτότυπο που εξετάζει αν ένα low-cost UWB stack μπορεί να προσεγγίσει ορισμένες λειτουργίες stage tracking. Με αυτή την έννοια η εργασία δεν αποτυγχάνει επειδή δεν φτάνει στο επίπεδο ενός BlackTrax. Αντίθετα, αποκτά αξία ακριβώς επειδή αναδεικνύει εμπειρικά το χάσμα ανάμεσα σε educational RTLS και production-grade stage tracker.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση Απαιτήσεων και Στόχοι

3.1 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις

Η πρώτη λειτουργική απαίτηση ήταν η δημιουργία ενός UWB δικτύου που να μπορεί να εκτιμά τη θέση ενός κινητού tag σε πραγματικό χρόνο. Η δεύτερη απαίτηση ήταν η δυνατότητα του Raspberry Pi να λαμβάνει αυτές τις θέσεις μέσω passive listener. Η τρίτη απαίτηση ήταν η μετατροπή των θέσεων σε PSN packets και η αποστολή τους στη grandMA2. Η τέταρτη απαίτηση ήταν η δυνατότητα ενός moving fixture να χρησιμοποιεί τον tracker ως στόχο. Η πέμπτη απαίτηση ήταν η ύπαρξη ανεξάρτητου test εργαλείου ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η MA2 χωρίς καθόλου UWB.

Σε επίπεδο μη λειτουργικών απαιτήσεων, ζητήθηκε το σύστημα να είναι όσο γίνεται γρήγορο, σταθερό και χαμηλού κόστους. Δεν υπήρχε η πολυτέλεια νέας σχεδίασης hardware ή ανάπτυξης

custom firmware σε χαμηλό επίπεδο. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός έπρεπε να αξιοποιήσει στο έπακρο τα διαθέσιμα DWM1001-DEV και να μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος της λογικής στο host. Η απαίτηση αυτή καθόρισε ουσιαστικά όλη τη φιλοσοφία του έργου.

3.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας ήταν τα εξής: μπορεί ένα DWM1001-based UWB σύστημα να τροφοδοτήσει μία κονσόλα grandMA2 μέσω PosiStageNet; ποιο μέρος του συνολικού προβλήματος οφείλεται στο localization και ποιο στη γεωμετρία/παραμετροποίηση της grandMA2; πόσο πρακτικά χρήσιμο είναι το αποτέλεσμα ως follow spot; και ποια τεχνολογική κατεύθυνση φαίνεται πιο υποσχόμενη για μελλοντική συνέχεια;

Η διατύπωση των ερωτημάτων είχε και πρακτική αξία. Οδήγησε στην ανάγκη να αναπτυχθούν διαφορετικά σενάρια δοκιμών και κυρίως ένα synthetic tracking εργαλείο. Χωρίς αυτό, κάθε αποτυχία του τελικού beam θα έμενε ασαφές αν είναι σφάλμα πρωτοκόλλου, σφάλμα γεωμετρίας ή αδυναμία της τεχνολογίας UWB.

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση της Αρχιτεκτονικής

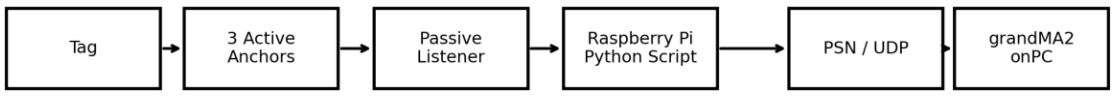
4.1 Συνολική ροή δεδομένων

Η συνολική ροή των δεδομένων είναι η εξής: το tag κινείται στον χώρο, τα active anchors υποστηρίζουν το localization, ο passive listener ακούει τα αποτελέσματα του δικτύου και τα εξάγει με τη μορφή shell output μέσω της εντολής les, ο Raspberry Pi διαβάζει τη σειριακή έξοδο, αποσπά τις συντεταγμένες, εφαρμόζει βασικό φιλτράρισμα και τελικά στέλνει PSN packets μέσω UDP προς το PC με τη grandMA2. Η grandMA2 αναγνωρίζει τον tracker και στρέφει το moving fixture προς τη δηλωμένη θέση.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής είναι ο αρθρωτός χαρακτήρας της. Η πληροφορία θέσης αποσυνδέεται πλήρως από το lighting layer. Αυτό επιτρέπει όχι μόνο debugging αλλά και μελλοντική αντικατάσταση του UWB με άλλο tracking source, χωρίς να πρέπει να ξανασχεδιαστεί η πλευρά της κονσόλας. Αντίστοιχα, οποιοδήποτε σύστημα μπορεί να παράγει PSN θεωρητικά μπορεί να συνδεθεί με τη grandMA2.

Η αρχιτεκτονική αυτή, παρότι απλή σε επίπεδο ροής, αποδείχθηκε πολύ πιο σύνθετη στην πράξη. Η εκκίνηση του listener, η μεταβλητότητα του quality factor, η ανάγκη σωστού coordinate mapping και η αναγνώριση του σωστού δικτύου στο PC έδειξαν ότι η ολοκλήρωση διαφορετικών τεχνολογιών απαιτεί προσοχή σε λεπτομέρειες που δεν είναι ορατές σε ένα θεωρητικό block diagram.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η συνολική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος. Το tag εντοπίζεται από το δίκτυο UWB, τα δεδομένα συλλέγονται μέσω του passive anchor και προωθούνται στο Raspberry Pi, όπου μετατρέπονται σε πακέτα PSN και αποστέλλονται στην grandMA2 onPC για τον έλεγχο του φωτιστικού.



Σχήμα 1: Συνολική αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος

4.2 Ρόλοι των κόμβων και περιορισμοί διάταξης

Στην τελική μορφή της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν πέντε modules: τρία active anchors, ένα passive anchor/listener και ένα tag. Η αρχική ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθούν τέσσερα active anchors, όμως το reporting προς το Raspberry απαιτούσε listener. Ο listener δεν βοηθά τον υπολογισμό της θέσης, αλλά είναι απαραίτητος για να εξαχθεί η θέση προς το host. Επομένως, ένα module «χάθηκε» από τη γεωμετρία του localization για να καλύψει την ανάγκη της εξαγωγής δεδομένων.

Ο περιορισμός αυτός έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για τη θεωρία και για το αποτέλεσμα. Από τη μία, το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί, αφού τρία active anchors αποτελούν το ελάχιστο για τρισδιάστατη εκτίμηση. Από την άλλη, η έλλειψη τέταρτου active anchor σημαίνει μικρότερη πλεονάζουσα πληροφορία και χαμηλότερη ικανότητα διόρθωσης γεωμετρικών αβεβαιοτήτων. Το σημείο αυτό αποδείχθηκε κρίσιμο και στην τελική κριτική αποτίμηση της εργασίας.

Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση Υλικού και Δικτύου UWB

5.1 Περιγραφή εξοπλισμού

Ο διαθέσιμος εξοπλισμός ήταν αρκετός για proof-of-concept αλλά όχι ιδανικός για το βέλτιστο localization setup. Το γεγονός ότι υπήρχαν συνολικά πέντε boards και όχι έξι ήταν τελικά ουσιαστικό, γιατί ανάγκασε τη θυσία ενός module για listener αντί για τέταρτο active anchor. Παρ' όλα αυτά, η υλικοτεχνική υποδομή επαρκούσε για την πλήρη υλοποίηση της αρχιτεκτονικής και για ουσιαστικά πειράματα.

Συστατικό	Πλήθος	Ρόλος	Σχόλιο
DWM1001-DEV	5	3 active anchors, 1 passive listener, 1 tag	UWB localization network
Raspberry Pi	1	Host / serial reader / PSN sender	Εκτελεί τα Python scripts
PC με grandMA2 onPC	1	Lighting control host	Λαμβάνει PSN μέσω UDP
Moving head fixture	1	Τελικός ενεργοποιητής	Στρέφεται προς το target
Ethernet Pi–PC	1	Δίκτυο δεδομένων	Στατικές IP για αξιόπιστη επικοινωνία

Πίνακας 1: Βασικός εξοπλισμός του συστήματος

5.2 Ρύθμιση του tag και του listener

Ένα από τα σημαντικότερα πρακτικά ευρήματα αφορούσε τη ρύθμιση του tag. Αρχικά παρατηρήθηκε μεγάλη καθυστέρηση και αραιή ανανέωση θέσης. Η διερεύνηση έδειξε ότι οι παράμετροι nominal και stationary update ήταν άνισες, γεγονός που επέτρεπε στο σύστημα να επιβραδύνει αισθητά όταν το tag θεωρούσε ότι βρίσκεται σε στάση. Με την εντολή aurs 1 1 και με απενεργοποίηση του stationary detection το φαινόμενο αυτό περιορίστηκε σημαντικά.

Από την άλλη πλευρά, ο listener αποδείχθηκε ευαίσθητος στον τρόπο εκκίνησης. Η ακολουθία ανοίγματος της σειριακής θύρας, εισόδου σε shell και αποστολής της εντολής les απαιτούσε σωστό χρονισμό. Επιπλέον, σε ορισμένες εκτελέσεις ο listener παρήγαγε κανονικά loc_data και σε άλλες όχι, κάτι που φανέρωσε ότι η λειτουργία του δεν είναι πλήρως ντετερμινιστική από την οπτική του host.

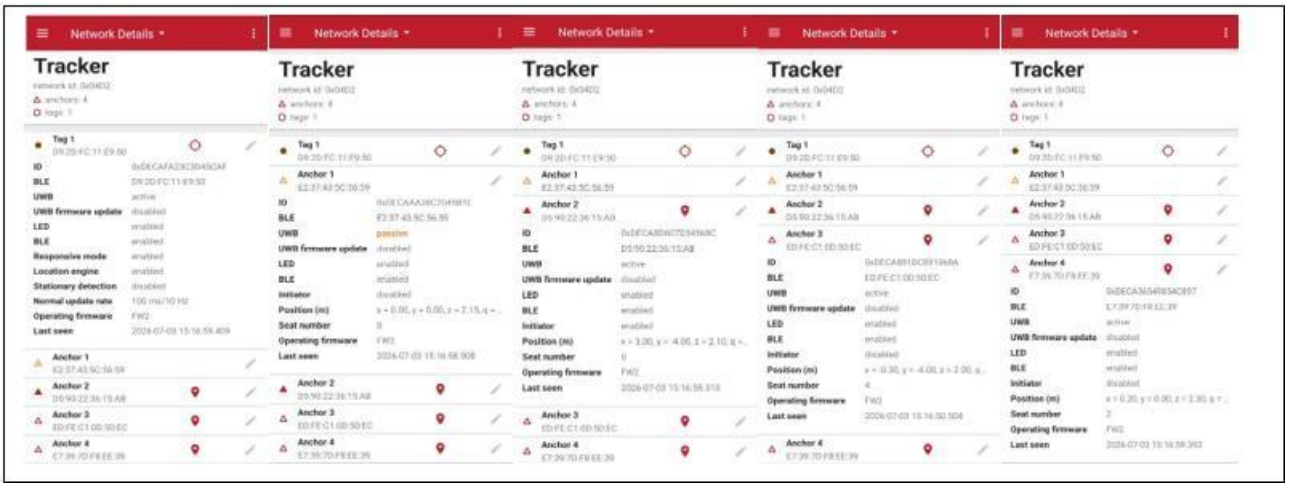
Κεφάλαιο 6: Υλοποίηση Λογισμικού και Διασύνδεση με grandMA2

6.1 Βασική δομή του script UWB -> PSN

Το κύριο script του Raspberry εκτελεί τέσσερις λειτουργίες. Πρώτον, ανοίγει τη σειριακή σύνδεση προς τον passive listener. Δεύτερον, τον θέτει σε shell mode και ενεργοποιεί το les. Τρίτον, διαβάζει και αναλύει τις γραμμές που περιέχουν θέση tag. Τέταρτον, αποστέλλει PSN packets προς τη grandMA2. Η επιλογή της Python κρίθηκε κατάλληλη επειδή η εφαρμογή ήταν I/O-bound και όχι υπολογιστικά βαριά, ενώ η αναγνωσιμότητα και η ταχύτητα ανάπτυξης είχαν πολύ μεγαλύτερη σημασία από τα μικρά θεωρητικά κέρδη ενός low-level rewrite.

Σημαντική απόφαση υπήρξε η μετάβαση από readline-based λογική σε λογική buffer. Αντί να θεωρεί το πρόγραμμα ότι κάθε read αντιστοιχεί σε πλήρη γραμμή, συγκεντρώνει bytes σε ενδιάμεσο buffer και αναγνωρίζει γραμμές μόνο όταν εμφανιστεί newline. Αυτό περιόρισε τα parsing failures και έκανε πιο προβλέψιμη τη συμπεριφορά του συστήματος.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το περιβάλλον του DRTLS Manager, μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση των κόμβων του συστήματος UWB. Μέσω της εφαρμογής ορίστηκαν οι ρόλοι των συσκευών ως active anchors, passive anchor και tag, καθώς και οι βασικές ρυθμίσεις λειτουργίας του δικτύου εντοπισμού.



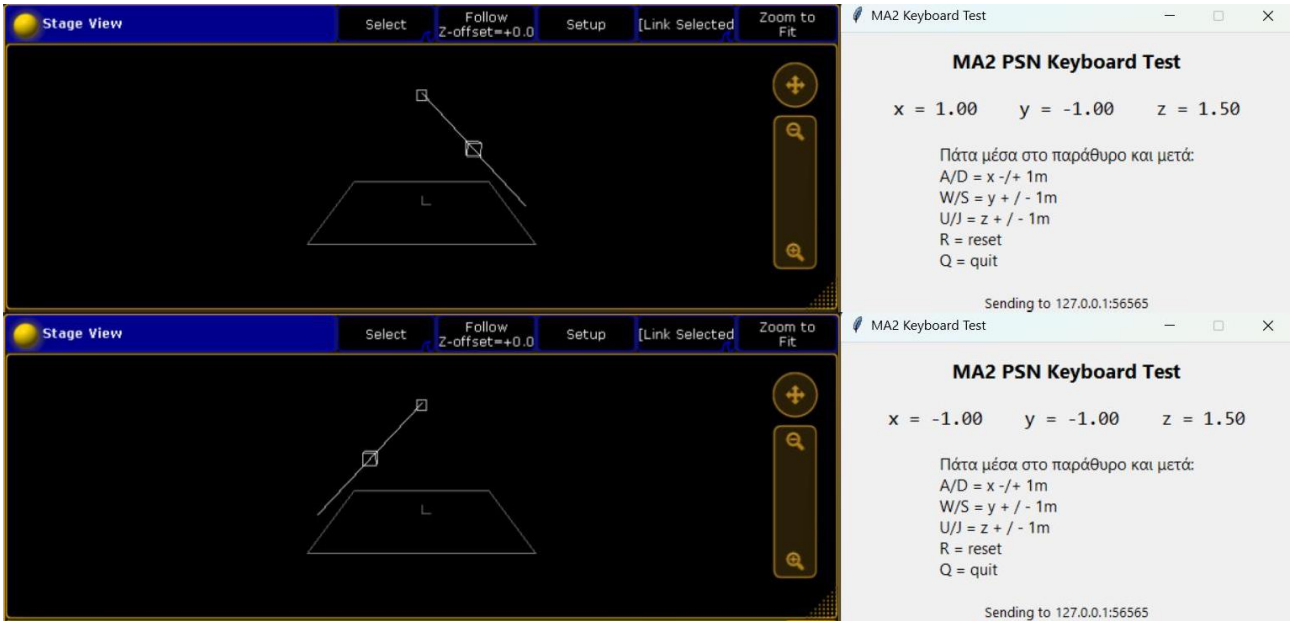
Σχήμα 2: Περιβάλλον DRTLS Manager και ρόλοι των κόμβων του UWB συστήματος

6.2 Keyboard test και απομόνωση της MA2

Η ανάπτυξη keyboard test script υπήρξε καθοριστική. Αρχικά δοκιμάστηκε terminal-based προσέγγιση, η οποία σε Windows αποδείχθηκε προβληματική λόγω curses και console limitations. Τελικά υλοποιήθηκε γραφική έκδοση με Tkinter, στην οποία ο χρήστης μετακινεί έναν synthetic tracker με πλήκτρα και αποστέλλει τις αντίστοιχες συντεταγμένες προς τη grandMA2.

Το εργαλείο αυτό λειτούργησε ως αναλυτικό εργαλείο απομόνωσης του συστήματος. Απέδειξε ότι η MA2 μπορεί να λάβει tracker, να τον συσχετίσει με fixture και να ακολουθήσει σωστά τη θέση όταν τα δεδομένα είναι καθαρά και ελεγχόμενα. Χάρη σε αυτό έγινε δυνατή και η ανακάλυψη της λανθασμένης τοποθέτησης του fixture στο εικονικό stage, σφάλμα που αρχικά μπορούσε να εκληφθεί ως σφάλμα localization.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η βοηθητική εφαρμογή δοκιμών, μέσω της οποίας ήταν δυνατή η αποστολή προκαθορισμένων ή χειροκίνητα μεταβαλλόμενων συντεταγμένων προς την grandMA2 onPC. Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ανεξάρτητη επαλήθευση της ορθής λειτουργίας της διασύνδεσης PSN, χωρίς τη συμμετοχή του UWB υποσυστήματος.



Σχήμα 3: Εφαρμογή δοκιμής ελεγχόμενης αποστολής θέσης προς την grandMA2 onPC

Κεφάλαιο 7: Πειραματική Μεθοδολογία

7.1 Σενάρια δοκιμών

Η πειραματική διαδικασία οργανώθηκε έτσι ώστε να απομονώνονται όσο γίνεται οι μεταβλητές. Δεν επιχειρήθηκε από την αρχή ένα ενιαίο end-to-end test με όλα τα υποσυστήματα ταυτόχρονα, διότι σε μια τέτοια περίπτωση οποιοδήποτε σφάλμα θα ήταν δύσκολο να αποδοθεί στο σωστό επίπεδο. Αντίθετα, δημιουργήθηκαν τρία διακριτά επίπεδα δοκιμής: α) synthetic tracking χωρίς UWB, β) έλεγχος δικτύωσης και PSN, και γ) πλήρες UWB pipeline.

Στο synthetic tracking εξεταζόταν μόνο η συμπεριφορά της grandMA2 και του fixture. Στο δικτυακό επίπεδο εξεταζόταν η ορθή επικοινωνία UDP και η αναγνώριση του tracking source. Στο πλήρες pipeline εξεταζόταν η πραγματική συμπεριφορά του UWB με το tag σε στάση και σε κίνηση. Ο σχεδιασμός αυτός επέτρεψε να διαχωριστούν προβλήματα geometry από προβλήματα protocol και προβλήματα protocol από προβλήματα localization.

7.2 Μετρικές αξιολόγησης

Η αξιολόγηση στηρίχθηκε σε συνδυασμό ποιοτικών και ημι-ποσοτικών μετρικών. Ως πρώτη μετρική χρησιμοποιήθηκε η ηλικία του τελευταίου valid sample, η οποία τυπωνόταν στο debug output ως age. Όταν το age έμενε χαμηλό, υπήρχε ένδειξη ότι το stream ανανεώνεται κανονικά. Όταν αυξανόταν σταθερά, υπήρχε σαφής ένδειξη ότι ο listener είχε σταματήσει να παρέχει νέα usable δεδομένα.

Ως δεύτερη μετρική χρησιμοποιήθηκε η οπτική σταθερότητα της δέσμης όταν το tag ήταν ακίνητο. Αυτό το κριτήριο είναι εξαιρετικά σημαντικό σε εφαρμογές follow spot, γιατί ακόμη και μικρές τυχαίες κινήσεις γύρω από το target γίνονται άμεσα αντιληπτές από τον θεατή. Ως τρίτη μετρική χρησιμοποιήθηκε η αντιληπτική καθυστέρηση κατά την κίνηση του tag. Ως τέταρτη μετρική χρησιμοποιήθηκε η χωρική πιστότητα, δηλαδή κατά πόσο το beam πράγματι χτυπούσε την περιοχή που έπρεπε.

Οι μετρικές αυτές δεν είναι όλες αυστηρά αριθμητικές, αλλά είναι επαρκείς για εφαρμοσμένη πτυχιακή εργασία όπου ο τελικός στόχος είναι ένα stage actuator. Η επιτυχία ή αποτυχία ενός τέτοιου συστήματος κρίνεται όχι μόνο από αριθμούς αλλά και από την πρακτική οπτική ποιότητα της συμπεριφοράς του φωτιστικού.

7.3 Μεθοδολογία debugging

Η αποσφαλμάτωση του συστήματος ακολούθησε επαναληπτική και ιεραρχική λογική. Κάθε φορά που παρουσιαζόταν πρόβλημα, γινόταν πρώτα προσπάθεια να εντοπιστεί σε ποιο επίπεδο ανήκει. Αν η MA2 δεν έβλεπε tracker, εξεταζόταν πρώτα το networking και το PSN packet format. Αν έβλεπε tracker αλλά το fixture χτυπούσε λάθος σημείο, εξεταζόταν η θέση του fixture στο stage. Αν η synthetic δοκιμή λειτουργούσε αλλά το UWB όχι, το πρόβλημα θεωρείτο localization-side.

Η λογική αυτή απέτρεψε μεγάλο αριθμό λανθασμένων συμπερασμάτων. Για παράδειγμα, το γεγονός ότι αρχικά το fixture φαινόταν να μη σημαδεύει σωστά θα μπορούσε εύκολα να αποδοθεί στο UWB. Τελικά, όμως, το keyboard test απέδειξε ότι το ζήτημα ήταν η χωρική τοποθέτηση του fixture στη MA2. Αντίστοιχα, σε άλλες φάσεις του έργου φαινόταν ότι το script καθυστερεί, ενώ στην πράξη το bottleneck βρισκόταν στο quality filter ή στο ότι ο listener δεν έδινε νέα loc_data.

Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

8.1 Αποτελέσματα synthetic tracking

Η synthetic δοκιμή με πληκτρολογιακά ή GUI-driven βήματα αποτέλεσε το πιο καθαρό success case της εργασίας. Η grandMA2 αναγνώρισε το PSN source, το moving fixture ακολούθησε τις τεχνητές συντεταγμένες και η συμπεριφορά αποδείχθηκε ορθή όταν το fixture είχε τοποθετηθεί σωστά στον εικονικό χώρο. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει πέραν αμφιβολίας ότι το packet generation, η δικτυακή επικοινωνία και το MA2 tracking chain είναι λειτουργικά.

Το ίδιο πείραμα έδειξε και κάτι ακόμη σημαντικό: όταν οι συντεταγμένες είναι σταθερές και ελεγχόμενες, η πλευρά της grandMA2 μπορεί να αποδώσει πολύ καλά. Κατά συνέπεια, τα σοβαρότερα προβλήματα του τελικού πρωτοτύπου δεν πρέπει να αναζητηθούν στο PSN ή στη βασική λειτουργία της κονσόλας, αλλά στην ποιότητα της εισερχόμενης πληροφορίας θέσης.

8.2 Αποτελέσματα πλήρους UWB tracking

Στο πλήρες UWB pipeline το αποτέλεσμα ήταν μικτό. Από τη μία πλευρά, το σύστημα μπορούσε να εκκινήσει, να λάβει valid sample από το tag και να οδηγήσει το fixture προς το target. Από την άλλη πλευρά, η σταθερότητα αυτής της ροής δεν ήταν εγγυημένη. Σε ορισμένες εκτελέσεις το stream ξεκινούσε και παρήγαγε σειρά από μετρήσεις. Σε άλλες, το script λάμβανε ένα μόνο sample και στη συνέχεια το age αυξανόταν συνεχώς, ένδειξη ότι δεν υπήρχαν νέα valid δεδομένα.

Όταν το stream ήταν αρκετά πλούσιο, το moving fixture προσπαθούσε πράγματι να ακολουθήσει το tag. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το concept δεν είναι θεωρητικό αλλά πρακτικά λειτουργικό. Όμως η ποιότητα της κίνησης δεν ήταν εκείνη που θα χαρακτήριζε ένα πραγματικό follow spot: εμφανίστηκαν jitter όταν το tag ήταν ακίνητο, μικρές αποκλίσεις γύρω από το target, υστέρηση κατά την εκκίνηση κίνησης και μειωμένη ακρίβεια στην τροχιά.

8.3 Πειράματα με το quality factor

Η παράμετρος MIN_QF αποδείχθηκε από τις πιο επιδραστικές. Με υψηλό κατώφλι, το σύστημα φαινόταν πιο ήρεμο, αλλά έχανε πολλές μετρήσεις. Με αποτέλεσμα η δέσμη να μένει στην τελευταία καλή θέση και να δημιουργείται πρακτικά αίσθηση μεγάλης καθυστέρησης. Με μηδενικό ή πολύ χαμηλό κατώφλι, το beam προσπαθούσε πιο συχνά να ακολουθήσει το tag, αλλά άρχιζε να πάλλεται γύρω από αυτό όταν το tag ήταν ακίνητο. Αυτό σημαίνει ότι οι χαμηλής ποιότητας μετρήσεις δεν είναι άχρηστες για την παρακολούθηση κίνησης, αλλά είναι βλαβερές για τη σταθερότητα σε στάση.

Το συμπέρασμα ήταν ότι ούτε η υπερβολικά αυστηρή ούτε η υπερβολικά χαλαρή επιλογή είναι ιδανική. Το πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί με μία μόνο παράμετρο. Χρειάζεται συνδυασμός quality gating και κατάλληλου smoothing, ενώ και πάλι το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την ποιότητα του ίδιου του localization stream.

8.4 Πειράματα με smoothing και adaptive φίλτρα

Η σταθερή εξομάλυνση με ένα μόνο alpha παρείχε περιορισμένα οφέλη. Όταν το alpha ήταν χαμηλό, το beam ηρεμούσε αλλά αποκτούσε εμφανή αδράνεια. Όταν το alpha πλησίαζε το 1, η κίνηση γινόταν πιο άμεση αλλά το jitter περνούσε πολύ έντονα στο fixture. Η adaptive προσέγγιση, με διαφορετικό alpha και διαφορετικό deadzone σε στάση και σε κίνηση, ήταν η πιο λογική βελτίωση που μπορούσε να δοκιμαστεί με τα διαθέσιμα εργαλεία.

Παρόλα αυτά, ακόμη και η adaptive στρατηγική δεν οδήγησε σε τέλειο αποτέλεσμα. Η συμπεριφορά βελτιώθηκε ως προς τον συμβιβασμό ανάμεσα σε responsiveness και σταθερότητα, αλλά το τελικό follow δεν έφτασε το επίπεδο πιστότητας που θα αναμενόταν σε επαγγελματική εφαρμογή. Αυτό είναι ίσως το πιο ειλικρινές τεχνικό συμπέρασμα της εργασίας: τα host-side φίλτρα μπορούν να μετριάσουν τις αδυναμίες του localization, όχι όμως να τις εξαφανίσουν.

8.5 Συνολική αποτίμηση

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εργασία πέτυχε σε επίπεδο ολοκλήρωσης συστημάτων αλλά πέτυχε μόνο μερικώς σε επίπεδο ποιότητας παρακολούθησης. Η πλήρης αλυσίδα UWB–Raspberry–PSN–grandMA2 είναι λειτουργική. Η grandMA2 μπορεί να λαμβάνει εξωτερικές θέσεις και να κατευθύνει fixture. Η synthetic δοκιμή επιβεβαιώνει πλήρως αυτή τη δυνατότητα. Όμως η πληροφορία θέσης από το DWM1001/PANS, όπως χρησιμοποιήθηκε εδώ, δεν επαρκεί για πραγματικά smooth και ακριβές automated follow spot.

Από ακαδημαϊκή σκοπιά, αυτό δεν είναι αποτυχία αλλά σαφές τεχνικό συμπέρασμα. Η εργασία απέδειξε όχι μόνο τι λειτουργεί, αλλά και πού ακριβώς βρίσκεται το bottleneck. Σε ένα εφαρμοσμένο project μηχανικής αυτή η γνώση είναι εξίσου χρήσιμη με ένα πλήρως επιτυχημένο demo, ιδιαίτερα όταν στόχος είναι η κατανόηση των ορίων μιας τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 9: Συζήτηση – Περιορισμοί – Βελτιώσεις

9.1 Βασικοί περιορισμοί του πρωτοτύπου

Ο πρώτος και σημαντικότερος περιορισμός είναι η ίδια η πλατφόρμα localization. Το DWM1001/PANS είναι σχεδιασμένο ως development-friendly RTLS και όχι ως stage-grade high-precision tracking engine. Το δεύτερο όριο είναι η διάταξη των κόμβων, αφού η έλλειψη έκτου module σήμαινε τρία active anchors αντί για τέσσερα. Το τρίτο όριο είναι ότι ο τελικός actuator, δηλαδή ένα moving light με σχετικά στενή δέσμη, αποκαλύπτει ακόμη και μικρά λάθη στις συντεταγμένες.

Το τελευταίο σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Ένα localization system που θα κρινόταν επαρκές για zone-based triggering ή για γενική παρακολούθηση θέσης μπορεί να φαίνεται ανεπαρκές όταν καλείται να οδηγήσει απευθείας φωτιστικό σώμα. Η απαιτητικότητα της οπτικής εφαρμογής ανεβάζει ουσιαστικά τον πήχη της τεχνολογίας localization.

9.2 Πιθανές βελτιώσεις με τα ίδια μέσα

Αν υπήρχε περισσότερος χρόνος και ένας επιπλέον DWM1001-DEV, η πιο λογική βελτίωση θα ήταν η διάταξη τεσσάρων active anchors, ενός passive listener και ενός tag. Αυτό θα αύξανε τη γεωμετρική πληροφορία του localization και πιθανόν θα βελτίωνε τη σταθερότητα. Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί συστηματικότερα η τοποθέτηση των anchors σε διαφορετικά ύψη και με καλύτερη κάλυψη του χώρου.

Σε επίπεδο λογισμικού, θα είχε ενδιαφέρον η δοκιμή πιο ώριμων φίλτρων, όπως Kalman filter ή συνδυασμός UWB με IMU. Ωστόσο, η εμπειρία της παρούσας εργασίας υποδεικνύει ότι τέτοιες τεχνικές θα βελτίωναν μόνο μερικώς το αποτέλεσμα και δεν θα εξάλειφαν το βασικό limitation της πλατφόρμας.

9.3 Υβριδική μελλοντική κατεύθυνση

Η πιο υποσχόμενη μελλοντική κατεύθυνση είναι η υβριδική χρήση UWB και vision. Η σχετική βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η UWB μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως coarse localization και identity layer, ενώ το vision μπορεί να παρέχει ακριβή και ομαλή στιγμιαία θέση [12]. Σε ένα τέτοιο σύστημα το UWB δεν θα οδηγεί μόνο του το fixture, αλλά θα παρέχει μία αρχική εκτίμηση περιοχής ή ένα fallback όταν το οπτικό σύστημα χάνει προσωρινά τον performer.

Η παρούσα εργασία είναι ιδανικό σημείο εκκίνησης για μια τέτοια εξέλιξη, διότι έχει ήδη λύσει το δύσκολο ζήτημα της ολοκλήρωσης με τη grandMA2. Άρα σε μελλοντικό έργο δεν θα χρειαστεί να σχεδιαστεί εκ νέου το output layer, αλλά μόνο να αντικατασταθεί ή να ενισχυθεί το source των συντεταγμένων.

Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα

Η εργασία υλοποίησε επιτυχώς την αλυσίδα εντοπισμού performer και ελέγχου moving light με χρήση UWB, Raspberry Pi, PosiStageNet και grandMA2. Απέδειξε ότι ένας custom tracking source μπορεί να τροφοδοτήσει τη grandMA2 και ότι η κονσόλα μπορεί να χρησιμοποιήσει εξωτερικές συντεταγμένες για την κίνηση ενός fixture. Παράλληλα, όμως, έδειξε ότι η ποιότητα του localization stream είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την τελική οπτική ποιότητα της εφαρμογής.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα είναι ότι το συγκεκριμένο prototype είναι λειτουργικό ως proof of concept και εκπαιδευτικό/πειραματικό σύστημα, αλλά δεν φτάνει στο επίπεδο απόδοσης ενός production-grade automated follow spot. Η εργασία επομένως δεν προσφέρει μόνο ένα πρωτότυπο, αλλά κυρίως μια καθαρή, τεκμηριωμένη τεχνική αξιολόγηση του τι μπορεί και τι δεν μπορεί να πετύχει μια low-cost UWB προσέγγιση σε ένα τόσο απαιτητικό stage use case.

Η αξία της εργασίας βρίσκεται ακριβώς σε αυτή την ειλικρινή αποτίμηση: ολοκληρώθηκε η υλοποίηση, απομονώθηκαν τα υποσυστήματα, βρέθηκαν τα κρίσιμα bottlenecks και διατυπώθηκαν σαφή επόμενα βήματα για τεχνολογική βελτίωση ή για υβριδικές μελλοντικές αρχιτεκτονικές.

Βιβλιογραφία

[1] Qorvo, DWM1001 System Overview and Performance, διαθέσιμο από την ιστοσελίδα της Qorvo.

[2] Qorvo, DWM1001 Firmware User Guide, SW-DWM1001-Firmware-User-Guide.

[3] Qorvo, DWM1001-DEV Product Brief / Hardware Datasheet.

[4] Qorvo, DWM1001-DEV Product Page.

[5] Qorvo, DWM1001 Datasheet.

[6] Decawave / Qorvo, DWM1001 Firmware API Guide.

[7] CAST Software, BlackTrax official product overview.

[8] MA Lighting, grandMA2 help pages και release notes σχετικά με PSN και tracking support.

[9] Qorvo forum discussions σχετικά με listener mode, les command, active/passive roles και practical troubleshooting.

[10] Qorvo / Decawave, MDEK1001 System User Manual.

[11] M. F. R. Al-Okby et al., 'UWB-Based Real-Time Indoor Positioning Systems', Applied Sciences, 2024.

[12] P. Peng et al., 'An Indoor Positioning Method Based on UWB and Visual Fusion', Sensors, 2022.

[13] CAST Software, τεχνικά case studies και public material σχετικά με stage tracking deployments.

UWB προσέγγισης.