ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Επιτήρηση χώρων υψηλής επισκεψιμότητας μέσω ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου και τεχνικών υπολογιστικής όρασης για τη δημόσια ασφάλεια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνης Σκουραδάκης
Ιωάννης Άγγελος Αθανασιάδης

Επιβλέπων: Χρήστος Νικολόπουλος, Αν. Καθηγητής Ελ. Με. Πα.

Χανιά, 31/3/2026

This page is intentionally blank

HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

Surveillance Of High-Traffic Areas Through Magnetic Field Detection and Computer Vision Techniques for Public Safety

DIPLOMA THESIS

Antonios Skouradakis
Ioannis Aggelos Athanasiadis

Supervisor: Christos Nikolopoulos, Assoc. Professor HMU.

Chania, 31/3/2026

This page is intentionally blank

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Επιτήρηση χώρων υψηλής επισκεψιμότητας μέσω ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου και τεχνικών υπολογιστικής όρασης για τη δημόσια ασφάλεια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνης Σκουραδάκης
Ιωάννης Άγγελος Αθανασιάδης

Επιβλέπων: Χρήστος Νικολόπουλος, Αν. Καθηγητής Ελ. Με. Πα.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 08.04.2026

.....	.....	.....
Χρήστος Νικολόπουλος	Ιωάννης Βαρδιάμπασης	Ανάργυρος Μπακλέζος
Αν. Καθηγητής Ελ. Με. Πα.	Καθηγητής Ελ. Με. Πα.	Επ. Καθηγητής Ελ. Με. Πα.

Χανιά, 31/3/2026

……

Αντώνης Σκουραδάκης
Ιωάννης Άγγελος Αθανασιάδης
Διπλωματούχοι Ηλεκτρονικοί Μηχανικοί Ελ.Με.Πα

Copyright © Αντώνης Σκουραδάκης, Ιωάννης Άγγελος Αθανασιάδης, 2026
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκεπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκεπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Ευχαριστίες

Αφιερώνουμε την διπλωματική μας στις οικογένειες μας που μας στήριξαν. Ευχαριστούμε για την στήριξη και βοήθεια τους καθηγητές μας Νικολόπουλο Χρήστο και Ανάργυρο Μπακλέζο

This page is intentionally blank

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 11
ABSTRACT 12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 13
1.1 Το Πρόβλημα της Ασφάλειας σε Δημόσιους Χώρους 13
1.2 Περιορισμοί Υπαρχουσών Τεχνολογιών Ανίχνευσης 13
1.3 Η Προτεινόμενη Λύση: Συνδυαστική Παθητική Ανίχνευση 13
1.4 Καινοτομία και Πλεονεκτήματα 13
2. ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 15
2.1 Συστήματα ασφαλείας και ανίχνευσης σε δημόσιους χώρους 15
2.2 Διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας σε χώρους υψηλής επισκεψιμότητας 15
2.2.1 Παραδοσιακές Μέθοδοι Ανίχνευσης και τα όριά τους: 15
2.2.2 Η Σύγχρονη Προσέγγιση: παθητική και μη παρεμβατική επιτήρηση (Passive & Non-Intrusive Screening). 17
2.3 Τεχνολογίες Υπολογιστικής Όρασης: Η Επανάσταση του YOLO και η Κρίσιμη Συνεισφορά του YOLOv8 (Version 8) 20
2.4 Αρχές Μαγνητομετρίας και Ανάλυση Σιδηρομαγνητικών Υλικών 23
2.4.1 Το Γήινο Μαγνητικό Πεδίο ως Σταθερό Υπόβαθρο 24
2.4.2 Φυσική των Σιδηρομαγνητικών Υλικών και Μαγνητική Διαπερατότητα 25
2.4.3 Μοντελοποίηση Μαγνητικού Διπόλου (Magnetic Dipole Modeling - MDM) 27
2.4.4 Το Αντίστροφο Πρόβλημα και η Πολυαισθητηριακή Προσέγγιση 28
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΒΛΑΨΟΥΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ 31
3.1 Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης 31
3.1.1 Διασύνδεση Hardware (DAQ NI) και Επεξεργασία Σημάτων 33
3.1.2 Βαθμονόμηση και Εκτίμηση Απόστασης (Camera Calibration) 34
3.2 Μαθηματικό Μοντέλο Μαγνητικού Διπόλου 35
3.2.1 Ημι-εμπειρική Προσέγγιση του Πεδίου B 35
3.2.2 Κατασκευή του Πίνακα Σχεδίασης (Design Matrix A) 35
3.2.3 Θεωρία Μεθόδου Ελάχιστων Τετραγώνων 35
3.2.4 Επίλυση Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares Solver) 39
3.2.5 Ανίχνευση Επικινδυνότητας (Danger Detection) 39
3.3 Προκλήσεις και Βελτιστοποίηση Οπτικής Ανίχνευσης 41
3.3.1 Διαχείριση Ψευδών Συναγερμών (False Alarms) 42
3.3.2 Περιγραφείς Σχήματος και Ταυτοποίησης 42
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 43

4.1 Εισαγωγικές Παρατηρήσεις 43
4.2 Δομή και Μεθοδολογική Ροή της Παρουσίασης 44
4.2.1 Ανάλυση Οπτικής Πληροφορίας και Χωρική Τοποθέτηση 44
4.2.2 Προεπεξεργασία και Ποιότητα Μαγνητικού Σήματος 45
4.2.3 Υπολογιστική Ευστάθεια του Αντίστροφου Προβλήματος 45
4.2.4 Αξιολόγηση του Μηχανισμού Ανίχνευσης Επικινδυνότητας 46
4.3 Εναλλακτική Προσέγγιση με Ευρεστικούς Αλγορίθμους Βελτιστοποίησης 46
4.4 Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση 46
4.4.1 Δυναμική Βαθμονόμηση και Χωρική Τοποθέτηση (Visual Odometry) 46
4.4.2 Ανάλυση Μαγνητικού Υποβάθρου και Αφαίρεση Θορύβου 48
4.4.3 Επίλυση Μαγνητικής Ροπής και Χαρακτηρισμός Στόχου 49
4.4.4 Σχολιασμός και Ερμηνεία Διαγραμμάτων 49
4.4.5 Μηχανισμός Επαλήθευσης και Χωρική Κατανομή 50
4.5 Χαρακτηρισμός Στόχου μέσω υπολογισμού της Μαγνητικής Ροπής 53
5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ 54
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 56

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Οπτική Επιτήρηση (CCTV) & Αλγόριθμοι Τεχνητής Νοημοσύνης 15
Σχήμα 2-2.-Πύλες Ανίχνευσης Μετάλλων (Walk-through Metal Detectors) 16
Σχήμα 2-3-Η Μαγνητομετρία ως Ενισχυτική Τεχνολογία 17
Σχήμα 2-4-Συγχώνευση Αισθητήρων (Sensor Fusion) 18
Σχήμα 2-5.-Μετασχηματισμός σε Πραγματικό Κόσμο (2D to 3D) 22
Σχήμα 2-6.-Μαγνητικό δίπολο 23
Σχήμα 2-7.-Βρόχος Υστέρησης (Hysteresis Loop) 27
Σχήμα 3-1-Επιτήρηση 31
Σχήμα 3-2. Διάταξη συστήματος 32
Σχήμα 3-3. Κίνηση Στόχου στην διάταξη 33
Σχήμα 3-4. Διάγραμμα ροής της αλυσίδας απόκτησης δεδομένων (DAQ), από τη φυσική μεταβλητή έως την αποθήκευση και απεικόνιση στον υπολογιστή 34
Σχήμα 4-1- Πρώτη δοκιμή οπτικού συστήματος 47
Σχήμα 4-2. Horizontal Magnitude Verification Relative Distribution Error 51
Σχήμα 4-3. Vertical Magnitude Verification Relative Distribution Error 52

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-Σύγκριση Μαγνητικής Ροπής ανά Προσανατολισμό 50

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός καινοτόμου, υβριδικού συστήματος ασφαλείας για την ανίχνευση μεταλλικών απειλών όπως όπλα και μαχαίρια σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα συνδυάζει την υπολογιστική όραση με την μαγνητομετρία, δίνοντας μια λύση που σέβεται την ιδιωτικότητα και την υγεία των πολιτών.
Ο αναγνώστης, μελετώντας την εργασία, θα περιηγηθεί στις εξής ενότητες:

- Στο Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή): Παρουσιάζεται το πλαίσιο του προβλήματος ασφαλείας σε δημόσιους χώρους και αναλύονται τα μειονεκτήματα των υπαρχουσών τεχνολογιών . Τίθενται οι στόχοι της εργασίας και η ανάγκη για μια παθητική, μη ιονίζουσα μέθοδο ανίχνευσης.
- Στο Κεφάλαιο 2 (Θεωρητικό Υπόβαθρο): Αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, η συμπεριφορά του γήινου μαγνητικού πεδίου και το μοντέλο του μαγνητικού δίπολου. Επίσης, αναλύεται η τεχνολογία των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης και η λειτουργία του αλγορίθμου YOLOv8.
- Στο Κεφάλαιο 3 (Μεθοδολογία & Σχεδιασμός): Περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος, η διάταξη των οκτώ μαγνητικών αισθητήρων και η ενσωμάτωση της κάμερας. Αναλύεται η διαδικασία συγχρονισμού δεδομένων (Data Fusion) και η εκπαίδευση του μοντέλου YOLOv8 για την οπτική αναγνώριση.
- Στο Κεφάλαιο 4 (Αντίστροφο ΗΜ Πρόβλημα & Αλγόριθμοι): Παρουσιάζεται η μαθηματική πλευρά της εργασίας. Εξηγείται πώς το σύστημα μετατρέπει τις μετρήσεις των αισθητήρων σε εκτίμηση της μαγνητικής ροπής (m) και πώς η οπτική πληροφορία βοηθά στην επίλυση του αντίστροφου προβλήματος για την ταυτοποίηση της απειλής.
- Στο Κεφάλαιο 5 (Πειραματική Διαδικασία & Αποτελέσματα): Παρατίθενται οι δοκιμές σε πραγματικά σενάρια. Ο αναγνώστης θα δει την αξιολόγηση της ακρίβειας του συστήματος, τη χρήση μετρικών (Sensitivity/ Specificity) και τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τις θεωρητικές προβλέψεις.
- Στο Κεφάλαιο 6 (Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα): Συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα του συστήματος και προτείνονται βελτιώσεις, όπως η χρήση πιο προηγμένων ευρεστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Λέξεις – κλειδιά:
Αντίστροφο Ηλεκτρομαγνητικό Πρόβλημα, Παθητική Μαγνητομετρία, Υπολογιστική Όραση, YOLOv8, Μαγνητική Υπογραφή, Ανίχνευση Όπλων, Ασφάλεια Δημόσιων Χώρων, Μαγνητικό Δίπολο, Σύντηξη Δεδομένων Αισθητήρων (Sensor Fusion).

ABSTRACT

This thesis presents the development of an innovative, hybrid security system for the real-time detection of metallic threats (such as guns and knives). The system combines computer vision with passive magnetometry, offering a solution that respects the health and privacy of citizens.
The reader of this thesis will navigate through the following sections:

- Chapter 1 (Introduction): Presents the framework of the security problem in public spaces and analyzes the disadvantages of existing technologies (X-rays, millimeter waves). It also defines the objectives of the thesis and the need for a passive, nonionizing detection method.
- In Chapter 2 (Theoretical Background): The fundamental principles of electromagnetism, the behavior of the Earth's magnetic field and the magnetic dipole model are explained. Also, the technology of magnetoresistance sensors and the operation of the YOLOv8 algorithm are analyzed.
- In Chapter 3 (Methodology & Design): The system architecture, the arrangement of the eight magnetic sensors and the integration of the camera are described. The data synchronization process (Data Fusion) and the training of the YOLOv8 model for visual recognition are analyzed.
- In Chapter 4 (Inverse EM Problem & Algorithms): The mathematical heart of the work is presented. It is explained how the system converts sensor measurements into an estimate of the magnetic moment (m) and how the optical information helps in solving the inverse problem for threat identification.
- In Chapter 5 (Experimental Procedure & Results): The tests in real scenarios are listed. The reader will see the evaluation of the system's accuracy, the use of metrics (Sensitivity/Specificity) and the comparison of the experimental data with the theoretical predictions.
- In Chapter 6 (Conclusions & Future Research): The advantages of the system are summarized and improvements are suggested, such as the use of more advanced heuristic optimization algorithms.

Keywords:
Inverse Electromagnetic Scattering, Passive Magnetometry, Computer Vision, YOLOv8, Magnetic Signature, Weapon Detection, Public Security, Magnetic Dipole Model, Sensor Fusion.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το Πρόβλημα της Ασφάλειας σε Δημόσιους Χώρους

Η ανάγκη για αποτελεσματική επιτήρηση και ανίχνευση απειλών σε χώρους υψηλής συνάθροισης (αεροδρόμια, κυβερνητικά κτίρια, εμπορικά κέντρα) αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της σύγχρονης εποχής. Η παραδοσιακή χρήση συστημάτων CCTV βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον ανθρώπινο παράγοντα, πράγμα που περιορίζει την αξιοπιστία τους. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι ο τεράστιος όγκος δεδομένων από πολλαπλές κάμερες προκαλεί κούραση στους χειριστές, αυξάνοντας την πιθανότητα παράβλεψης επικίνδυνων αντικειμένων, όπως όπλα ή μαχαίρια.

1.2 Περιορισμοί Υπαρχουσών Τεχνολογιών Ανίχνευσης

Μέχρι σήμερα, η ανίχνευση απειλών βασίζεται σε τεχνολογίες όπως οι σαρωτές με ακτίνες X-ray και τα συστήματα Μικροκυματικών τεχνολογιών (millimeter-wave). Παρά την αποτελεσματικότητά τους, οι τεχνολογίες αυτές συνοδεύονται από σημαντικά μειονεκτήματα όπως τα ζητήματα υγείας. Η χρήση ιονίζουσας ακτινοβολίας, έστω και σε χαμηλές δόσεις (0.015 μSv - 0.88 μSv), προκαλεί ανησυχίες για την αθροιστική έκθεση των επιβατών. Επίσης η ιδιωτικότητα, η παραγωγή λεπτομερών εικόνων του ανθρώπινου σώματος θεωρείται συχνά επεμβατική και προκαλεί κοινωνικές αντιδράσεις. Τέλος για τις λεγόμενες «κρυμμένες απειλές» τα συστήματα οπτικής ανίχνευσης (CCTV) δε μπορούν να εντοπίσουν όπλα που είναι κρυμμένα κάτω από ρούχα ή μέσα σε τσάντες, αν δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή.

1.3 Η Προτεινόμενη Λύση: Συνδυαστική Παθητική Ανίχνευση

Η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει μια καινοτόμα προσέγγιση που συνδυάζει την υπολογιστική Όραση (Computer Vision) με την μαγνητομετρία. Η λύση αυτή βασίζεται στη σύζευξη δύο διαφορετικών πηγών πληροφορίας όπως η οπτική ανίχνευση (YOLOv8) και η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγουν σιδηρομαγνητικά υλικά. Δηλαδή χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος YOLOv8 για τον εντοπισμό και τη χωρική τοποθέτηση ατόμων και ορατών απειλών σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με τη μαγνητική υπογραφή ενός ύποπτου αντικειμένου μέσω μιας διάταξης παθητικών μαγνητικών αισθητήρων που μετρούν τις διαταραχές του γήινου μαγνητικού πεδίου. Η επίλυση του αντίστροφου ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος επιτρέπει την εκτίμηση της μαγνητικής ροπής του αντικειμένου, οδηγώντας στην ταυτοποίησή του.

1.4 Καινοτομία και Πλεονεκτήματα

Η προτεινόμενη μέθοδος υπερτερεί των συμβατικών συστημάτων καθώς είναι απόλυτα ασφαλής (Passive Sensing), καθώς δεν εκπέμπει ακτινοβολία, τηρώντας την αρχή ALARA, διασφαλίζει την ιδιωτικότητα, καθώς η ταυτοποίηση βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα μαγνητικής υπογραφής και όχι σε επεμβατικές εικόνες σώματος και τέλος, αυξάνει την ακρίβεια, χρησιμοποιώντας ευρεστικούς αλγορίθμους (όπως ο Differential Evolution) και μετρικές ευαισθησίας/ειδικότητας για την ελαχιστοποίηση των ψευδών συναγερμών.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 Συστήματα ασφαλείας και ανίχνευσης σε δημόσιους χώρους

2.2 Διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας σε χώρους υψηλής επισκεψιμότητας

Η διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας σε χώρους υψηλής επισκεψιμότητας, όπως αεροδρόμια, σιδηροδρομικοί σταθμοί, κυβερνητικά κτίρια και στάδια, αποτελεί μια από τις κρισιμότερες προκλήσεις της σύγχρονης αυτής εποχής. Οι απειλές, έρχονται συχνά με τη μορφή μεταλλικών ή σιδηρομαγνητικών όπλων και αντικειμένων, πρέπει να εντοπίζονται έγκαιρα και με ακρίβεια, χωρίς να διαταράσσεται δυσανάλογα η ελεύθερη κυκλοφορία ή η ιδιωτικότητα των πολιτών. Αυτή η ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας, αποδοτικότητας και σεβασμού έχει οδηγήσει στην εξέλιξη ενός ολοένα και πιο πολύπλοκου οικοσυστήματος τεχνολογιών ασφαλείας.

2.2.1 Παραδοσιακές Μέθοδοι Ανίχνευσης και τα όριά τους:

Τα επικρατούντα συστήματα σήμερα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, που αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς:

2.2.1.1 Οπτική Επιτήρηση (CCTV) & Αλγόριθμοι Τεχνητής Νοημοσύνης:

Τα δίκτυα κλειστής τηλεόρασης, ενισχυμένα πλέον με αλγορίθμους υπολογιστικής όρασης για την ανίχνευση ύποπτων συμπεριφορών, όπως εγκαταλελειμμένων αποσκευών ή ασυνήθιστης συγκέντρωσης πλήθους, προσφέρουν εξαιρετική χωρική κάλυψη και δυνατότητα ανάλυσης πιο μετά.



Σχήμα 2-1. Οπτική Επιτήρηση (CCTV) & Αλγόριθμοι Τεχνητής Νοημοσύνης

Ωστόσο, το βασικό τους μειονέκτημα είναι η πλήρης ανικανότητα να "δούνε" μέσα ή κάτω από τα ρούχα ή τις αποσκευές ενός ατόμου. Τα οπτικά συστήματα αντιμετωπίζουν απευθείας ορατές απειλές ή ενδείξεις, αλλά είναι τυφλά απέναντι σε σκόπιμα κρυμμένα αντικείμενα.

2.2.1.2 Πύλες Ανίχνευσης Μετάλλων (Walk-through Metal Detectors):

Αποτελούν τον χρυσό κανόνα και η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για τον άμεσο εντοπισμό μεταλλικών όπλων. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Ωστόσο, η χρήση τους επιβάλλει μια ριζικά επεμβατική λογική: απαιτούν η ροή των ανθρώπων να είναι μέσω συγκεκριμένων, στενών σημείων ελέγχου. Αυτό έχει τρεις βασικές συνέπειες. Μια από αυτές είναι η δημιουργία συμφόρησης και μακροχρόνιες καθυστερήσεις, υποβαθμίζοντας την εμπειρία του χρήστη και τη λειτουργικότητα του χώρου. Δεύτερον είναι η σύνδεση με υψηλό λειτουργικό κόστος λόγω της ανάγκης για μόνιμο και εκπαιδευμένο προσωπικό επίβλεψης και επαλήθευσης των συναγερμών και τέλος προκαλεί υψηλό ποσοστό ψευδών συναγερμών από αβλαβή καθημερινά αντικείμενα (κλειδιά, κινητά τηλέφωνα, μεταλλικά κουμπιά), γεγονός που επιδεινώνει περαιτέρω όλα τα παραπάνω προβλήματα.



Σχήμα 2-2.-Πύλες Ανίχνευσης Μετάλλων (Walk-through Metal Detectors)

2.2.2 Η Σύγχρονη Προσέγγιση: παθητική και μη παρεμβατική επιτήρηση (Passive & Non-Intrusive Screening).

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, η σύγχρονη έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της ασφάλειας στρέφεται προς συστήματα παθητικής και μη παρεμβατικής (non-intrusive) επιτήρησης. Ο στόχος είναι φιλόδοξος. Να επιτευχθεί ο εντοπισμός απειλών ενώ οι άνθρωποι κινούνται φυσιολογικά και ελεύθερα στον χώρο, χωρίς να συνωθούνται, να σταματούν ή να γίνονται άγρυπνο αντικείμενο έντονης προσοχής. Αυτή η «διαφανής ασφάλεια» θα μπορούσε να λειτουργήσει σε περιβάλλοντα μεγάλης κίνησης, ελαχιστοποιώντας τις διακοπές και αυξάνοντας παράλληλα την πιθανότητα ανίχνευσης.

2.2.2.1 Η μαγνητομετρία ως ενισχυτική τεχνολογία.

Φυσικά εντός αυτού του πλαισίου, η μαγνητομετρία είναι μια ιδανική και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Οι μαγνητικοί αισθητήρες λειτουργούν παθητικά, καταγράφοντας με μεγάλη ευαισθησία τις ακόμα και τις πιο μικρές διαταραχές που προκαλεί οποιοδήποτε σιδηρομαγνητικό υλικό στο σταθερό μαγνητικό πεδίο της γης.



Σχήμα 2-3-Η Μαγνητομετρία ως Ενισχυτική Τεχνολογία

Σε αντίθεση με τις πύλες μετάλλων, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν διακριτικά στον χώρο (π.χ., σε πλαίσια θυρών, σε κολώνες, κάτω από δάπεδα) και να ανιχνεύσουν μαγνητικές ροπές χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε ενεργή αλληλεπίδραση με το άτομο. Ωστόσο, η πρακτική

εφαρμογή της μαγνητομετρίας σε δυναμικά περιβάλλοντα συναντά δύο κρίσιμα εμπόδια: ένα από αυτά είναι το υψηλό περιβαλλοντικό μαγνητικό θόρυβο (από ηλεκτρικές καλωδιώσεις, μεταλλικές κατασκευές, κινούμενα οχήματα) που μπορεί να καλύψει το σήμα του στόχου, και δεύτερον το πρόβλημα εντοπισμού της πηγής. Ακόμα κι αν μια μαγνητική ανωμαλία ανιχνευθεί, είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιοριστεί αν προέρχεται από ένα επικίνδυνο αντικείμενο που κουβαλάει ένα άτομο ή από κάποιο άλλο αβλαβές μεταλλικό αντικείμενο στο περιβάλλον.



Σχήμα 2-4-Συγχώνευση Αισθητήρων (Sensor Fusion)

Η προσέγγιση της παρούσας εργασία βασίζεται στη συγχώνευση αισθητήρων (Sensor Fusion) για ενισχυμένη απόφαση. Η παρούσα εργασία προτείνει μια καινοτόμα λύση σε αυτά τα προβλήματα μέσω της συστηματικής συγχώνευσης αισθητήρων (sensor fusion) μεταξύ υπολογιστικής όρασης και μαγνητομετρίας. Η βασική ιδέα δεν είναι να αντικατασταθεί κάποια από τις δύο τεχνολογίες, αλλά να τις συνδυάσει συμπληρωματικά για να επιτευχθεί μια ποιοτικά ανώτερη κατηγοριοποίηση απειλών. Συγκεκριμένα, η υπολογιστική όραση (η οποία θα περιγραφεί αναλυτικά στην επόμενη ενότητα 2.2) λειτουργεί ως το «ενεργό μάτι» του συστήματος, αναλαμβάνοντας τον ακριβή εντοπισμό και την παρακολούθηση (tracking) κάθε ατόμου στο χώρο, προσδιορίζοντας τη θέση του σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι γεωμετρικές πληροφορίες τροφοδοτούνται δυναμικά στο μαθηματικό μοντέλο της μαγνητικής ανίχνευσης. Έτσι, το σύστημα δεν αντιδρά απλώς σε μια αφηρημένη μαγνητική διαταραχή, αλλά την αναζητεί και την ερμηνεύει στο πλαίσιο ενός συγκεκριμένου, οπτικά εντοπισμένου ατόμου. Αυτή η συσχέτιση επιτρέπει τον αποτελεσματικό διαχωρισμό του σήματος-στόχου από τον περιβαλλοντικό θόρυβο και την

επίλυση του αντίστροφου προβλήματος για τον υπολογισμό της απόστασης και της ισχύος (μαγνητικής ροπής) της πηγής.
Με αυτόν τον τρόπο, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική στοχεύει να προσφέρει μια νέα ικανότητα: την παθητική ανίχνευση και αξιολόγηση κρυμμένων σιδηρομαγνητικών αντικειμένων σε άτομα σε ελεύθερη κίνηση, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα της οπτικής ευαισθησίας με το βάθος διείσδυσης της μαγνητομετρίας, προκειμένου να ενισχύσει δραματικά την ασφάλεια χωρίς να θυσιάζεται η ρευστότητα και η ελευθερία κίνησης στον δημόσιο χώρο.

2.2.2.2 Σύγκριση με Υπάρχουσες Τεχνολογίες Ανίχνευσης

Η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για αξιόπιστη, αποδοτική και ταυτόχρονα ασφαλή ανίχνευση πιθανών απειλών σε κρίσιμα σημεία ελέγχου, όπως είναι τα αεροδρόμια και τα λιμάνια, έχει οδηγήσει διαχρονικά στην υιοθέτηση και ευρεία χρήση τεχνολογιών όπως οι σαρωτές οπισθοσκέδασης (backscatter) και οι σαρωτές κυμάτων χιλιοστού (millimeter-wave). Οι τεχνολογίες αυτές, αν και θεωρούνται προηγμένες και έχουν συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση των διαδικασιών ασφαλείας, δεν παύουν να συνοδεύονται από συγκεκριμένες και ουσιαστικές προκλήσεις και περιορισμούς που αξίζει να αναλυθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.
Αρχικά, ένα από τα βασικότερα ζητήματα που ανακύπτουν σχετίζεται με την υγεία των επιβατών και του προσωπικού. Οι σαρωτές οπισθοσκέδασης βασίζονται στη χρήση ιονίζουσας ακτινοβολίας, συγκεκριμένα ακτίνων Χ. Παρόλο που τα επίπεδα ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται είναι χαμηλά και εντός των επιτρεπτών ορίων, εξακολουθεί να υπάρχει έντονη ανησυχία σχετικά με τις πιθανές συσσωρευτικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στο ανθρώπινο DNA με την πάροδο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, η δόση ακτινοβολίας ανά σάρωση κυμαίνεται από 0.015 μSv έως 0.88 μSv, γεγονός που, αν και μικρό σε μεμονωμένη χρήση, αποκτά σημασία όταν εξετάζεται σε επαναλαμβανόμενη έκθεση.
Παράλληλα, ένα δεύτερο ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα αφορά την ιδιωτικότητα των επιβατών. Οι εικόνες που παράγονται από αυτούς τους σαρωτές, ιδίως από τα συστήματα οπισθοσκέδασης, θεωρούνται από ένα μεγάλο μέρος του κοινού επεμβατικές, καθώς έχουν τη δυνατότητα να αποκαλύπτουν λεπτομέρειες του ανθρώπινου σώματος κάτω από τα ρούχα. Αυτό δημιουργεί όχι μόνο ηθικά ζητήματα αλλά και πρακτικές δυσκολίες στη διαχείριση και αποθήκευση τέτοιου είδους ευαίσθητων δεδομένων.
Επιπλέον, δεν μπορεί να παραβλεφθεί το κόστος και η πολυπλοκότητα αυτών των συστημάτων. Η λειτουργία τους απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό, το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανάλυση των παραγόμενων εικόνων, συχνά σε ξεχωριστούς χώρους, προκειμένου να διασφαλιστεί η ιδιωτικότητα των επιβατών. Αυτή η απαίτηση αυξάνει σημαντικά τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και την πολυπλοκότητα της συνολικής διαδικασίας ελέγχου.
Αντίθετα, η προτεινόμενη μέθοδος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία βασίζεται στην παθητική μαγνητομετρία, παρουσιάζει μια διαφορετική και ιδιαίτερα ελκυστική προσέγγιση, η οποία υπερτερεί σε πολλαπλά επίπεδα.
Πρώτον, όσον αφορά την ασφάλεια, το σύστημα αυτό είναι πλήρως ακίνδυνο, καθώς δεν εκπέμπει καμία μορφή ακτινοβολίας, είτε ιονίζουσα είτε μη. Αντιθέτως, λειτουργεί παθητικά, μετρώντας αποκλειστικά τις διαταραχές που προκαλούνται στο ήδη υπάρχον γήινο μαγνητικό πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο, η επιβάρυνση σε όρους ακτινοβολίας είναι πρακτικά μηδενική (0

μSv), γεγονός που το καθιστά ιδανικό για συνεχή και επαναλαμβανόμενη χρήση χωρίς κανέναν απολύτως κίνδυνο για την υγεία.
Δεύτερον, σε ό,τι αφορά την ιδιωτικότητα, η συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει ένα σαφώς πιο φιλικό και αποδεκτό πλαίσιο για τους επιβάτες. Το σύστημα δεν παράγει καμία οπτική αναπαράσταση του ανθρώπινου σώματος, αλλά επικεντρώνεται αποκλειστικά στην ανίχνευση σιδηρομαγνητικών αντικειμένων μέσω της χαρακτηριστικής μαγνητικής τους υπογραφής. Έτσι, αποφεύγονται πλήρως τα ζητήματα που σχετίζονται με την αποκάλυψη προσωπικών δεδομένων ή την παραβίαση της ιδιωτικότητας.
Τρίτον, ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας ανίχνευσης. Μέσω της αξιοποίησης σύγχρονων αλγορίθμων και τεχνικών υπολογιστικής όρασης, όπως το YOLOv8, η ανίχνευση και η αξιολόγηση των πιθανών απειλών πραγματοποιείται χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης για την ερμηνεία ευαίσθητων δεδομένων. Αυτό μειώνει σημαντικά τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και την πιθανότητα ανθρώπινου σφάλματος.
Επιπροσθέτως, αξίζει να αναφερθούν και ορισμένα τεχνικά στοιχεία που ενισχύουν περαιτέρω τη σύγκριση μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Στην περίπτωση των σαρωτών κυμάτων χιλιοστού, η πυκνότητα ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 0.00001 και 0.0006 mW/cm^2. Αν και η ακτινοβολία αυτή θεωρείται μη ιονίζουσα, οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της παραμένουν ακόμη υπό διερεύνηση, γεγονός που αφήνει περιθώρια αβεβαιότητας.
Τέλος, σύμφωνα με την αρχή ALARA (As Low As Reasonably Achievable), η έκθεση σε ακτινοβολία θα πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο. Η χρήση παθητικών μαγνητικών αισθητήρων, όπως προτείνεται στη συγκεκριμένη εργασία, αποτελεί ουσιαστικά την απόλυτη εφαρμογή αυτής της αρχής, καθώς οδηγεί σε πλήρη εξάλειψη της έκθεσης, επιτυγχάνοντας το ιδανικό σενάριο μηδενικής ακτινοβολίας.

2.3 Τεχνολογίες Υπολογιστικής Όρασης: Η Επανάσταση του YOLO και η Κρίσιμη Συνεισφορά του YOLOv8 (Version 8)

Η υπολογιστική οραση (Computer Vision) αποτελεί κρίσιμο κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης, με στόχο την αυτόματη εξαγωγή πληροφοριών από οπτικά δεδομένα. Ένα από τα πιο απαιτητικά και σημαντικά καθήκοντα εντός αυτού είναι η ανίχνευση αντικειμένων (object detection), το οποίο συνδυάζει την εύρεση και την αναγνώριση πολλαπλών αντικειμένων μέσα σε μια εικόνα ή βίντεο. Για δεκαετίες, η ανάπτυξη αλγορίθμων που μπορούν να εκτελέσουν αυτό το καθήκον με υψηλή ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα πεδία του τομέα.
Η εμφάνιση της αρχιτεκτονικής YOLO (You Only Look Once) το 2016 σηματοδότησε μια καθοριστική καμπή, εισάγοντας έναν ριζικά διαφορετικό, ενιαίο (single-stage) και εξαιρετικά γρήγορο τρόπο προσέγγισης του προβλήματος.
Η θεμελιώδης καινοτομία του YOLO έγκειται στην αναθεώρηση της διαδικασίας. Ενώ οι προηγούμενες κυρίαρχες μέθοδοι (όπως τα δίκτυα R-CNN) βασίζονταν σε πολύ-σταδιακές διαδικασίες που περιλάμβαναν τη δημιουργία υποψήφιων περιοχών (region proposals) και τη διαδοχική ταξινόμησή τους, το YOLO μετατρέπει το πρόβλημα σε έναν ενιαίο πρόβλημα παλινδρόμησης . Συγκεκριμένα, διαιρεί την εισερχόμενη εικόνα σε ένα πλέγμα κελιών. Κάθε κελί είναι υπεύθυνο για την πρόβλεψη οριοθετημένων παραθύρων (bounding boxes) και των

πιθανοτήτων κλάσης για τα αντικείμενα των οποίων το κέντρο εμπίπτει μέσα σε αυτό, σε μια μόνο διέλευση του νευρωνικού δικτύου. Αυτή η απαραίτητη επεξεργασία είναι που του προσδίδει την εκπληκτική του ταχύτητα, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως αυτή της παρούσας εργασίας.

Η οικογένεια YOLO έχει υποστεί συνεχή και γρήγορη εξέλιξη, με κάθε νέα έκδοση να βελτιώνει την ακρίβεια, την ταχύτητα και την ευκολία χρήσης. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η έκδοση YOLOv8, που κυκλοφόρησε το 2023 από την εταιρεία Ultralytics, ως ο αλγόριθμος ανίχνευσης αντικειμένων. Η επιλογή αυτή βασίστηκε σε μια σειρά κρίσιμων πλεονεκτημάτων που προσφέρει ο YOLOv8 έναντι προηγούμενων εκδόσεων και ανταγωνιστικών αρχιτεκτονικών:

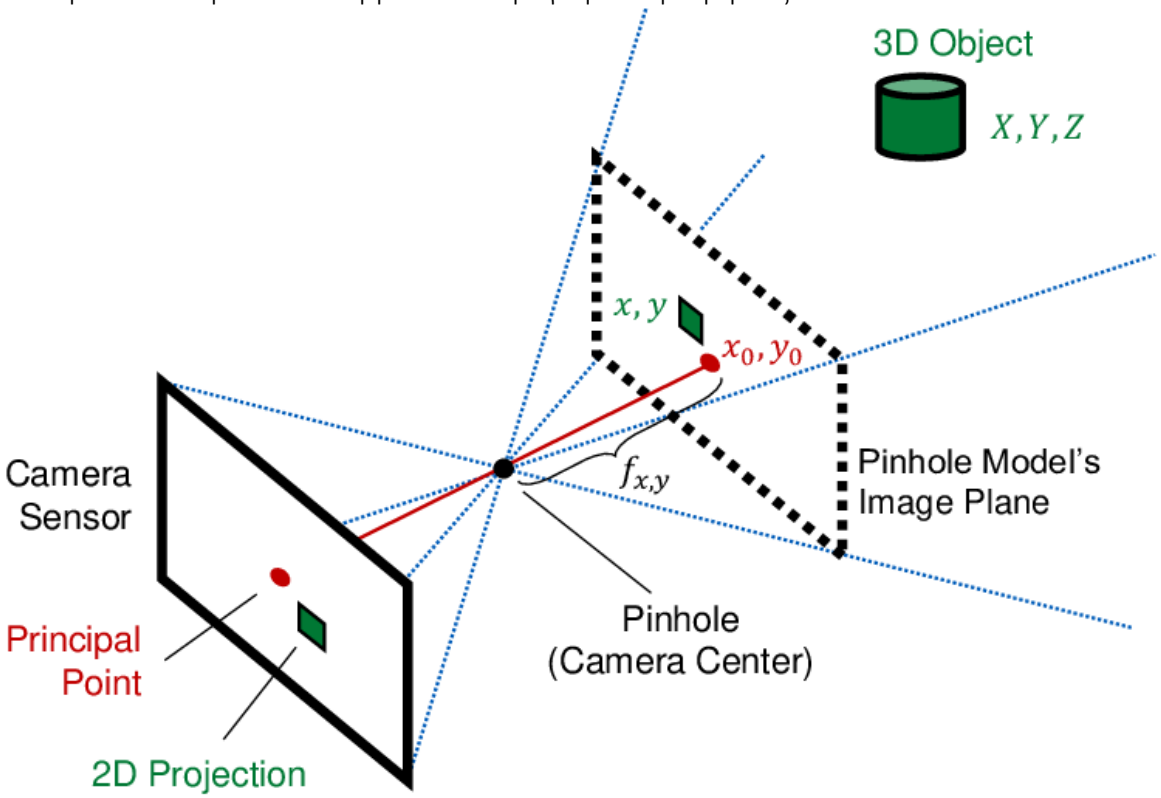
- **Εξαιρετική Ισορροπία Ακρίβειας-Ταχύτητας:** Το YOLOv8 διαθέτει μια βελτιωμένη αρχιτεκτονική δικτύου (backbone και neck) που ενσωματώνει τα πιο σύγχρονα στοιχεία, όπως αποκλειστικοτητάς βαρύτητας (attention mechanisms) και νέες συναρτήσεις ενεργοποίησης, επιτυγχάνοντας κορυφαία αποτελέσματα σε προτύπους δοκιμών όπως το COCO dataset, διατηρώντας παράλληλα πλαίσια ανά δευτερόλεπτο (FPS) κατάλληλα για επεξεργασία βίντεο.
- **Ευκολία Χρήσης και Εκπαίδευσης:** Το περιβάλλον Ultralytics PyTorch του YOLOv8 παρέχει ένα πολύ υψηλού επιπέδου API, με απλές εντολές για εκπαίδευση, αξιολόγηση και πρόβλεψη. Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη υλοποίηση και επανάληψη, εστιάζοντας τους πόρους στην πειραματική διάταξη και όχι στην πολυπλοκότητα του κώδικα.
- **Ποικιλία Μεγεθών Μοντέλων:** Το YOLOv8 διατίθεται σε μια οικογένεια μοντέλων διαφόρων μεγεθών (YOLOv8n-nano, YOLOv8s-small, YOLOv8m-medium, YOLOv8l-large, YOLOv8x-extra large). Αυτό επιτρέπει την επιλογή του βέλτιστου μοντέλου ανάλογα με τους υπολογιστικούς πόρους και τις απαιτήσεις ακρίβειας της εφαρμογής. Για τις ανάγκες πραγματικού χρόνου της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε ένα από τα μικρότερα και ταχύτερα μοντέλα (π.χ., YOLOv8n ή YOLOv8s) μετά από πειραματική αξιολόγηση.
- **Ισχυρές Δυνατότητες Παρακολούθησης (Tracking):** Αν και το YOLOv8 είναι πρωτίστως ανιχνευτής, η βιβλιοθήκη Ultralytics προσφέρει εύκολη ενσωμάτωση με αλγορίθμους παρακολούθησης (όπως ο ByteTrack), κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι το ίδιο άτομο θα παρακολουθείται συνέπεια σε διαδοχικά καρέ του βίντεο, αποφεύγοντας εναλλαγές ταυτότητας.

Η Συγκεκριμένη Εφαρμογή του YOLOv8 στην Πειραματική Διάταξη

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, ο ρόλος του YOLOv8 είναι θεμελιώδης και καθοριστικός για την επιτυχία της ολοκληρωμένης λύσης. Δεν χρησιμοποιείται απλώς ως ένας αυτόνομος ανιχνευτής, αλλά ως ο αισθητήρας-καθοδηγητής που τροφοδοτεί το μαγνητικό υποσύστημα με απαραίτητες πληροφορίες. Η ροή εργασίας είναι η εξής:

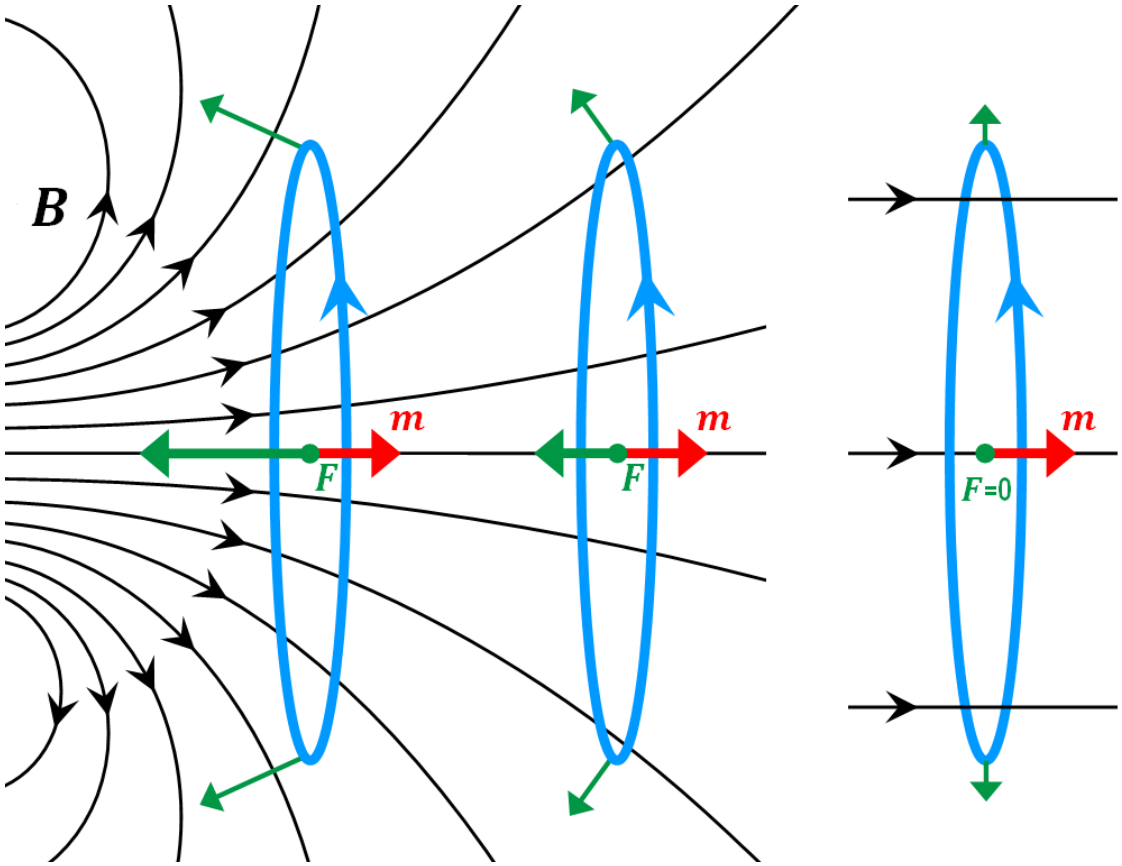
1. Ανίχνευση & Τοπικοποίηση: Το βίντεο από τη στατική κάμερα της πειραματικής διάταξης πηγαίνει στο μοντέλο YOLOv8, το οποίο έχει προ-εκπαιδευθεί με dataset από εικόνες ανθρώπων σε δημόσιους χώρους όπως αεροδρόμια και σταθμούς τρένων. Για κάθε καρέ, ο αλγόριθμος εντοπίζει όλα τα άτομα στο οπτικό πεδίο και επιστρέφει για κάθε ένα τις συντεταγμένες pixel του οριοθετημένου παραθύρου (bounding box) που το περιβάλλει.

2. Εξαγωγή Συντεταγμένων Κέντρου: Οι συντεταγμένες του κέντρου του bounding box *(x_center_pixel, y_center_pixel)* υπολογίζονται. Αυτό το σημείο αντιπροσωπεύει την εκτίμηση της 2D θέσης του ατόμου στο επίπεδο της εικόνας.
3. Μετασχηματισμός σε Πραγματικό Κόσμο (2D to 3D): Χρησιμοποιώντας γεωμετρικά μοντέλα προβολής και μεθόδους βαθμονόμησης της κάμερας (camera calibration μέσω του κώδικα), οι pixel συντεταγμένες του κέντρου μετατρέπονται σε συντεταγμένες στον πραγματικό χώρο (σε μέτρα), συγκεκριμένα στο οριζόντιο επίπεδο (άξονες X, Y) όπου κινείται το άτομο. Αυτό το βήμα είναι κρίσιμο, καθώς συνδέει τον οπτικό κόσμο με τον φυσικό κόσμο όπου λαμβάνουν οι μαγνητικοί μετρήσεις.



Σχήμα 2-5.-Μετασχηματισμός σε Πραγματικό Κόσμο (2D to 3D)

4. Σύνδεση με το Μαγνητικό Μοντέλο: Οι υπολογισμένες πραγματικές συντεταγμένες (X, Y) του ατόμου σε πραγματικό χρόνο χρησιμεύουν ως γνωστές είσοδοι στο μαθηματικό μοντέλο του μαγνητικού διπόλου (Ενότητα 3.2). Με γνωστή τη θέση της πηγής στον οριζόντιο άξονα, το σύστημα μπορεί τώρα να επιλύσει το αντίστροφο πρόβλημα για να υπολογίσει τις άγνωστες παραμέτρους: την απόσταση (Z) του αντικειμένου από τον αισθητήρα (βάθος) και πιο σημαντικά, τη μαγνητική του ροπή (m). Η μαγνητική ροπή είναι ο ποσοτικός δείκτης που διακρίνει ένα αβλαβές κλειδί από ένα μεγάλο μεταλλικό μαχαίρι ή πιστόλι.



Σχήμα 2-6.-Μαγνητικό δίπολο

Με αυτόν τον τρόπο, το YOLOv8 μετατρέπεται από έναν απλό «βλέποντα» αισθητήρα σε το κρίσιμο συνδετικό κρίκο που επιτρέπει την ενεργοποίηση και την εστιασμένη ερμηνεία της μαγνητομετρίας. Η ακριβής του ικανότητα εντοπισμού καθοδηγεί το μαθηματικό μοντέλο, επιτρέποντας τη στόχευση συγκεκριμένων ατόμων και την ποσοτικοποίηση της απειλής που ενδεχομένως κουβαλούν, υλοποιώντας την αρχή της συγχώνευσης αισθητήρων .

2.4 Αρχές Μαγνητομετρίας και Ανάλυση Σιδηρομαγνητικών Υλικών

Η λειτουργική επάρκεια του προτεινόμενου συστήματος βασίζεται στην ικανότητα ακριβούς ανίχνευσης, καταγραφής και υπολογιστικής ανάλυσης των μεταβολών που εμφανίζονται στο τοπικό μαγνητικό πεδίο. Η διαδικασία αυτή δεν περιορίζεται σε μία απλή μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, αλλά περιλαμβάνει μία πολυπαραγοντική επεξεργασία σημάτων υψηλής ευαισθησίας, η οποία απαιτεί βαθιά κατανόηση των φυσικών φαινομένων που διέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητικών πεδίων και των υλικών σωμάτων. Συγκεκριμένα, η παρουσία σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και ορισμένα κράματα, προκαλεί τοπικές διαταραχές στη χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες μπορούν να καταγραφούν μέσω κατάλληλων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου υψηλής ακρίβειας.
Η ερμηνεία των μεταβολών αυτών βασίζεται στις αρχές της μαγνητοστατικής, δηλαδή του κλάδου του ηλεκτρομαγνητισμού που μελετά τα στατικά ή αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία και τη

συμπεριφορά των μαγνητικών διπόλων μέσα σε αυτά. Κατά την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν έντονη μαγνήτιση λόγω της ευθυγράμμισης των μαγνητικών τους περιοχών (domains), γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία δευτερογενών μαγνητικών πεδίων. Τα πεδία αυτά αλληλεπιδρούν με το αρχικό περιβάλλον πεδίο, δημιουργώντας ανιχνεύσιμες ανωμαλίες, οι οποίες αποτελούν το βασικό μέσο εντοπισμού και χαρακτηρισμού των υλικών στόχων.
Επιπλέον, η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από τους μαγνητικούς αισθητήρες απαιτεί την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων και αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, με σκοπό τη φιλτραρισμένη απομόνωση του χρήσιμου σήματος από τον περιβαλλοντικό θόρυβο και τις παρεμβολές. Μέσω της υπολογιστικής αυτής διαδικασίας καθίσταται δυνατή όχι μόνο η ανίχνευση της παρουσίας σιδηρομαγνητικών αντικειμένων, αλλά και η εκτίμηση χαρακτηριστικών τους, όπως η σχετική θέση, το μέγεθος και η μαγνητική τους ροπή. Κατά συνέπεια, η μαγνητομετρία αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για την ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων ανίχνευσης και αναγνώρισης μεταλλικών αντικειμένων σε εφαρμογές υψηλής ασφάλειας και βιομηχανικού ελέγχου.

2.4.1 Το Γήινο Μαγνητικό Πεδίο ως Σταθερό Υπόβαθρο

Το Γήινο Μαγνητικό Πεδίο (ΓΜΠ) αποτελεί ένα θεμελιώδες φυσικό φαινόμενο που περιβάλλει τον πλανήτη και προκύπτει κυρίως από τη δυναμική κίνηση αγώγιμων υλικών στον εξωτερικό πυρήνα της Γης. Το πεδίο αυτό μπορεί να περιγραφεί ως ένα τρισδιάστατο διανυσματικό μέγεθος, το οποίο χαρακτηρίζεται τόσο από την ένταση όσο και από τη διεύθυνσή του σε κάθε σημείο της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας της Γης. Η ένταση του ΓΜΠ μεταβάλλεται γεωγραφικά και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ περίπου “25” και “65” μT, παρουσιάζοντας μεγαλύτερες τιμές στις πολικές περιοχές και μικρότερες κοντά στον ισημερινό. Παράλληλα, η κατεύθυνση του πεδίου καθορίζεται από τη γεωγραφική θέση και περιγράφεται μέσω παραμέτρων όπως η μαγνητική απόκλιση και η μαγνητική κλίση.
Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, το ΓΜΠ αντιμετωπίζεται ως το βασικό σημείο αναφοράς ή επίπεδο μηδενισμού για το σύστημα μέτρησης. Με άλλα λόγια, το σύστημα σχεδιάζεται ώστε να ανιχνεύει αποκλίσεις και διαταραχές σε σχέση με την κανονική χωρική κατανομή του φυσικού αυτού πεδίου. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ φυσιολογικών μεταβολών του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου και ανωμαλιών που προκαλούνται από την παρουσία εξωτερικών αντικειμένων.
Η σημασία του ΓΜΠ στο προτεινόμενο σύστημα είναι καθοριστική, καθώς λειτουργεί ως φυσική πηγή μαγνητικής ροής που διεγείρει τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Όταν ένα τέτοιο υλικό εισέρχεται στο πεδίο επιτήρησης, οι μαγνητικές περιοχές του υλικού ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, προκαλώντας επαγόμενη μαγνήτιση. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη δημιουργία δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, το οποίο αλληλεπιδρά με το ΓΜΠ και προκαλεί τοπικές μεταβολές στη συνολική κατανομή του πεδίου. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να καταγραφούν από κατάλληλους μαγνητικούς αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας και να αναλυθούν υπολογιστικά για τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό του αντικειμένου.
Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι χωρίς την ύπαρξη ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, είτε φυσικού είτε τεχνητού, τα παθητικά σιδηρομαγνητικά υλικά δεν θα εμφάνιζαν μετρήσιμο

μαγνητικό αποτύπωμα. Συνεπώς, το ΓΜΠ αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα λειτουργίας των παθητικών συστημάτων μαγνητικής ανίχνευσης, προσφέροντας ένα σταθερό και συνεχώς παρόν πεδίο αναφοράς που καθιστά δυνατή την αξιόπιστη ανίχνευση μεταλλικών στόχων σε εφαρμογές ασφάλειας, επιτήρησης.

2.4.2 Φυσική των Σιδηρομαγνητικών Υλικών και Μαγνητική Διαπερατότητα

Τα υλικά που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές δημόσιας ασφάλειας, όπως ο χάλυβας και άλλα κράματα σιδήρου που χρησιμοποιούνται σε όπλα, εκρηκτικούς μηχανισμούς ή επικίνδυνες κατασκευές, χαρακτηρίζονται από υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r. Η μαγνητική διαπερατότητα αποτελεί θεμελιώδη φυσική ιδιότητα ενός υλικού και εκφράζει την ικανότητά του να επιτρέπει τη διέλευση και την ενίσχυση μαγνητικών γραμμών ροής στο εσωτερικό του. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, η τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του κενού, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ευαίσθητα στην παρουσία εξωτερικών μαγνητικών πεδίων.

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η μαγνητική συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών οφείλεται στη δομή τους, η οποία αποτελείται από περιοχές γνωστές ως μαγνητικές περιοχές ή περιοχές Weiss . Κάθε μία από αυτές τις περιοχές περιέχει άτομα των οποίων οι μαγνητικές ροπές είναι ήδη ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους, δημιουργώντας μικροσκοπικά τοπικά μαγνητικά πεδία. Ωστόσο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, οι περιοχές αυτές έχουν τυχαίο προσανατολισμό, με αποτέλεσμα το συνολικό μαγνητικό αποτέλεσμα του υλικού να είναι μηδενικό ή πολύ μικρό.

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό αντικείμενο εκτεθεί σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, όπως το Γήινο Μαγνητικό Πεδίο, οι μαγνητικές περιοχές τείνουν να αναπροσανατολιστούν και να ευθυγραμμιστούν με τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη καθαρής μαγνητικής ροπής στο αντικείμενο, φαινόμενο που είναι γνωστό ως μαγνητική επαγωγή. Η επαγόμενη αυτή μαγνήτιση προκαλεί τη δημιουργία δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου, το οποίο εξαρτάται από τις φυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες του αντικειμένου, όπως η σύσταση του υλικού, το σχήμα και ο όγκος του. Η παρουσία του σιδηρομαγνητικού αντικειμένου στον χώρο επιτήρησης οδηγεί στη δημιουργία μιας τοπικής διαταραχής του μαγνητικού πεδίου, γνωστής ως μαγνητική ανωμαλία (magnetic anomaly). Η ανωμαλία αυτή προκύπτει από την υπέρθεση (superposition) του αρχικού Γήινου Μαγνητικού Πεδίου με το δευτερογενές πεδίο που δημιουργείται λόγω της επαγόμενης μαγνήτισης του αντικειμένου. Οι μαγνητικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο προτεινόμενο σύστημα καταγράφουν το συνολικό πεδίο που προκύπτει από αυτή την υπέρθεση, χωρίς να μπορούν να διαχωρίσουν άμεσα τις επιμέρους συνιστώσες. Για τον λόγο αυτό, το υπολογιστικό σύστημα επεξεργασίας δεδομένων διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο, καθώς εφαρμόζει αλγορίθμους φιλτραρίσματος, μοντελοποίησης και αντίστροφων υπολογιστικών μεθόδων με σκοπό την απομόνωση της συνεισφοράς του αντικειμένου από το φυσικό μαγνητικό υπόβαθρο. Μέσω της ανάλυσης αυτής, καθίσταται δυνατός όχι μόνο ο εντοπισμός της παρουσίας σιδηρομαγνητικών υλικών, αλλά και η εκτίμηση χαρακτηριστικών παραμέτρων τους, συμβάλλοντας σημαντικά στην ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων ανίχνευσης για εφαρμογές ασφάλειας και επιτήρησης. Η αποτελεσματική χρήση του Γεωμαγνητικού Πεδίου (ΓΜΠ) ως σταθερού σημείου αναφοράς απαιτεί τον αυστηρό έλεγχο του μαγνητικού περιβάλλοντος. Η έννοια της μαγνητικής καθαρότητας (magnetic cleanliness), η οποία αποτελεί

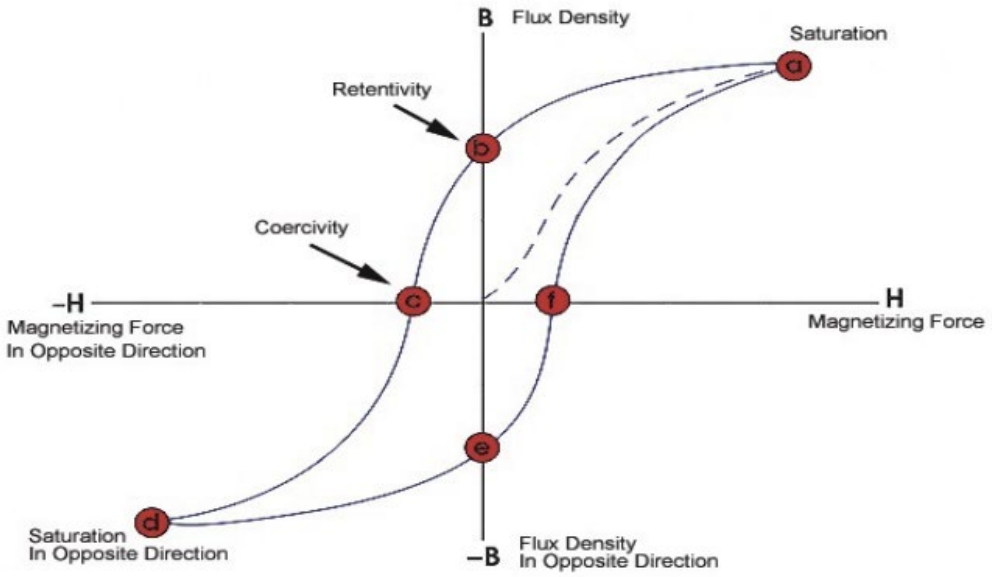
ακρογωνιαίο λίθο στον σχεδιασμό δορυφόρων και διαστημικών οργάνων [Σπαντιδέας, 2017], μεταφέρεται εδώ στον σχεδιασμό της πύλης ανίχνευσης. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του εσωτερικού θορύβου της διάταξης, ώστε να καθίσταται δυνατή η απομόνωση της «μαγνητικής υπογραφής» του στόχου. Η μαγνητική καθαρότητα της πύλης βασίζεται στον έλεγχο δύο κύριων συνιστωσών που συνεισφέρουν στο συνολικό πεδίο B_{total}: Κάθε ηλεκτρικό ρεύμα *I* που διαρρέει τα κυκλώματα των αισθητήρων παράγει ένα επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, σύμφωνα με τον Νόμο των Biot-Savart:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \times r}{r^2}$$

Για να αποφευχθεί η δημιουργία παρασιτικών μαγνητικών ροπών, η δρομολόγηση των καλωδιώσεων (routing) πρέπει να γίνεται με τρόπο που να αλληλοαναιρούνται τα πεδία (π.χ. συστρεμμένα ζεύγη καλωδίων - twisted pairs). Τα υλικά της κατασκευής δεν πρέπει να παρουσιάζουν σημαντική μαγνητική επιδεκτικότητα x_m Αν το υλικό είναι παραμαγνητικό ή σιδηρομαγνητικό, η παρουσία του ΓΜΠ H_{ext} θα προκαλέσει μαγνήτιση M, αλλοιώνοντας την τοπική πυκνότητα ροής:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m)H$$

Χρησιμοποιώντας υλικά με $\chi_m \approx 0$ (όπως ξύλο, ειδικά πολυμερή ή αλουμίνιο), διασφαλίζουμε ότι οι δυναμικές γραμμές του ΓΜΠ διέρχονται ανεπηρέαστες από τον σκελετό της πύλης. Σε ένα πραγματικό περιβάλλον ασφαλείας, το σταθερό υπόβαθρο (baseline) απειλείται από: Παραμένουσα Μαγνήτιση (Remanent Magnetization): Σιδηρομαγνητικά στοιχεία στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου (οπλισμένο σκυρόδεμα). Πεδία Χαμηλής Συχνότητας: Ηλεκτρικά δίκτυα (50Hz) που προκαλούν ταλαντώσεις στο μετρούμενο πεδίο. Η αλληλεπίδραση αυτών των πηγών με το σύστημα οδηγεί σε μια χωρική παραμόρφωση του πεδίου, η οποία περιγράφεται από την απόκλιση της μαγνητικής ροής. Η αποτελεσματικότητα της πύλης βασίζεται στη διάκριση μεταξύ των μη μαγνητικών υλικών του σκελετού $\chi m \approx 0$ και των σιδηρομαγνητικών υλικών που φέρει ο στόχος (π.χ. ατσάλινο μαχαίρι). Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από τον Βρόχο Υστέρησης (Hysteresis Loop), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7.-Βρόχος Υστέρησης (Hysteresis Loop)

Για την επίτευξη υψηλής διακριτικής ικανότητας, εφαρμόζονται οι εξής στρατηγικές:
Επιλογή Υλικών: Χρήση αυστηρά μη μαγνητικών υλικών για την αποφυγή του φαινομένου "απορρόφησης" ή συγκέντρωσης των δυναμικών γραμμών. Δυναμική Αφαίρεση Υποβάθρου (Background Subtraction): Το σύστημα εκτελεί μια διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) όπου καταγράφει το διάνυσμα του τοπικού ΓΜΠ, B_{static} Κατά τη λειτουργία, η ανωμαλία ΔΒ που προκαλείται από έναν στόχο υπολογίζεται ως.

$$\boldsymbol{\Delta B = B_{measured} - B_{static}}$$

Γραμμικότητα και Κορεσμός: Η διατήρηση των παρασιτικών πεδίων κάτω από το όριο των 100μT είναι κρίσιμη. Αυτό εγγυάται ότι τα μαγνητόμετρα (fluxgate ή magneto-resistive) λειτουργούν στην προδιαγεγραμμένη γραμμική τους περιοχή, αποφεύγοντας τον κορεσμό (saturation) που θα καθιστούσε αδύνατη την ανίχνευση μικρών μεταβολών.

2.4.3 Μοντελοποίηση Μαγνητικού Διπόλου (Magnetic Dipole Modeling - MDM)

Η περιγραφή και ποσοτικοποίηση της μαγνητικής υπογραφής ενός σιδηρομαγνητικού αντικειμένου αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο φυσικό πρόβλημα, το οποίο στη διεθνή βιβλιογραφία προσεγγίζεται συχνά μέσω της μεθόδου μοντελοποίησης μαγνητικού διπόλου (Magnetic Dipole Modeling - MDM). Σύμφωνα με σύγχρονες ερευνητικές εργασίες και τεκμηριωμένες επιστημονικές μελέτες, όπως αυτή των Giannopoulos et al. (2021), η κατανομή της επαγόμενης μαγνήτισης ενός αντικειμένου μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω της αναγωγής του αντικειμένου σε ένα ή περισσότερα ισοδύναμα σημειακά μαγνητικά δίπολα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την απλοποίηση ενός χωρικά κατανεμημένου

και πολύπλοκου μαγνητικού πεδίου σε ένα διαχειρίσιμο μαθηματικό μοντέλο, διατηρώντας παράλληλα τα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά του προβλήματος.
Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης αυτής, κάθε αντικείμενο θεωρείται ότι διαθέτει μια συνολική μαγνητική ροπή, η οποία εκφράζει το μέγεθος και τον προσανατολισμό της επαγόμενης μαγνήτισής του. Η μαγνητική επαγωγή Φ που δημιουργείται από ένα τέτοιο ισοδύναμο δίπολο σε ένα σημείο παρατήρησης "r" περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3r(m \cdot r)}{r^5} - \frac{m}{r^3}\right]$$

όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, μ_0 είναι το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής του αντικειμένου και r είναι η απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και του σημείου μέτρησης. Η εξίσωση αυτή αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο η γεωμετρική θέση και ο προσανατολισμός του αντικειμένου επηρεάζουν τη μορφή και την ένταση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου.
Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό της παραπάνω σχέσης είναι η έντονη μη γραμμική φύση της εξάρτησης του μαγνητικού πεδίου από την απόσταση. Συγκεκριμένα, η ένταση του πεδίου μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με τον κύβο της απόστασης r^3, γεγονός που υποδηλώνει ότι μικρές μεταβολές στη θέση του αντικειμένου μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μεταβολές στο μετρούμενο σήμα. Για παράδειγμα, εάν η απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και των αισθητήρων διπλασιαστεί, τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου που καταγράφεται μειώνεται περίπου στο ένα όγδοο της αρχικής τιμής. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τη διαδικασία ανίχνευσης ιδιαίτερα ευαίσθητη σε σφάλματα εκτίμησης της απόστασης.
Για τον λόγο αυτό, η ακριβής χωρική τοποθέτηση του αντικειμένου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αξιοπιστία του συστήματος. Η ενσωμάτωση της υπολογιστικής όρασης (Computer Vision) στο σύστημα επιτρέπει την εκτίμηση της θέσης και της απόστασης του στόχου σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας απαραίτητα δεδομένα για τη σωστή επίλυση του αντίστροφου προβλήματος υπολογισμού της μαγνητικής ροπής. Ακόμη και μικρά σφάλματα στην εκτίμηση της απόστασης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις στον υπολογισμό της μαγνητικής ροπής και, κατά συνέπεια, στη λανθασμένη εκτίμηση των χαρακτηριστικών του αντικειμένου.
Συνεπώς, η μέθοδος MDM αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για τη μαθηματική μοντελοποίηση και την ανάλυση μαγνητικών ανωμαλιών, επιτρέποντας την ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων ανίχνευσης σιδηρομαγνητικών αντικειμένων σε εφαρμογές ασφάλειας και επιτήρησης.

2.4.4 Το Αντίστροφο Πρόβλημα και η Πολυαισθητηριακή Προσέγγιση

Ένα από τα πιο κρίσιμα και απαιτητικά επιστημονικά ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα εργασία είναι η επίλυση του λεγόμενου αντίστροφου προβλήματος. Στο πλαίσιο της μαγνητομετρίας, το πρόβλημα αυτό σχετίζεται με τη δυνατότητα εξαγωγής φυσικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου από μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που αυτό δημιουργεί στο περιβάλλον. Στο ευθύ πρόβλημα, η διαδικασία είναι θεωρητικά απλή και καλά ορισμένη: θεωρούμε ότι είναι γνωστή η μαγνητική ροπή ενός αντικειμένου, καθώς και η γεωμετρική του θέση, και στη συνέχεια υπολογίζουμε το μαγνητικό πεδίο που παράγεται στον χώρο μέσω των εξισώσεων της μαγνητοστατικής. Όμως, στο αντίστροφο πρόβλημα η διαδικασία αντιστρέφεται,

καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα είναι οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου από τους αισθητήρες και η εκτίμηση της θέσης του αντικειμένου μέσω συστημάτων υπολογιστικής όρασης. Στην περίπτωση αυτή, το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της άγνωστης μαγνητικής ροπής του αντικειμένου, η οποία εκφράζεται ως διάνυσμα:

$$m = \left[m_x, m_y, m_z\right]^T$$

Το αντίστροφο πρόβλημα χαρακτηρίζεται από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα ως κακώς τοποθετημένο, καθώς δεν ικανοποιεί πλήρως τα κριτήρια μοναδικότητας και σταθερότητας της λύσης. Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατόν διαφορετικοί συνδυασμοί μαγνητικής ροπής, προσανατολισμού και θέσης να οδηγούν σε παρόμοιες ή σχεδόν ίδιες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου, ιδίως όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται από έναν μόνο αισθητήρα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί αβεβαιότητα στον υπολογισμό της πραγματικής φυσικής κατάστασης του αντικειμένου και μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά πολλές μαθηματικές λύσεις που δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στην πραγματικότητα.
Για την αντιμετώπιση αυτής της συγκεκριμένης δυσκολίας, η παρούσα εργασία υιοθετεί μια προσέγγιση με πολλούς αισθητήρες, η οποία βασίζεται στη χρήση πολλαπλών μαγνητομέτρων, σχηματίζοντας μια διάταξη γνωστή ως Multi-Magnetometer Facility . Η ύπαρξη πολλαπλών σημείων μέτρησης επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικές θέσεις του χώρου, παρέχοντας ένα σύνολο δεδομένων σημαντικά πλουσιότερο από αυτό που θα παρείχε ένας μεμονωμένος αισθητήρας. Με τον τρόπο αυτό καταφέρνουμε να δημιουργήσουμε ένα υπερορισμένο συστήματο εξισώσεων, στο οποίο ο αριθμός των μετρήσεων υπερβαίνει τον αριθμό των άγνωστων μεταβλητών. Η ιδιότητα αυτή συμβάλλει καθοριστικά στη σταθεροποίηση της λύσης του αντίστροφου προβλήματος.
Παράλληλα, η χρήση πολλαπλών αισθητήρων οδηγεί σε βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), καθώς επιτρέπει την επεξεργασία και τη φιλτραρισμένη συγχώνευση των μετρήσεων, μειώνοντας την επίδραση περιβαλλοντικών παρεμβολών και τυχαίων σφαλμάτων. Για τον υπολογισμό της βέλτιστης εκτίμησης της μαγνητικής ροπής εφαρμόζεται η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares), η οποία επιτρέπει την εύρεση της λύσης που ελαχιστοποιεί το συνολικό σφάλμα μεταξύ των θεωρητικών τιμών του μαγνητικού πεδίου, όπως προκύπτουν από το μαθηματικό μοντέλο, και των πραγματικών μετρήσεων των αισθητήρων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία αριθμητικής βελτιστοποίησης για την επίλυση υπερορισμένων συστημάτων και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ανίχνευσης και εκτίμησης φυσικών παραμέτρων.
Η παραπάνω θεωρητική προσέγγιση αποδεικνύει πλήρως τον λόγο της σχεδίασης της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Η ανάγκη χρήσης πολλαπλών μαγνητομέτρων προκύπτει άμεσα από τη μαθηματική απαίτηση για αξιόπιστη επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, ενώ η ενσωμάτωση συστήματος υπολογιστικής όρασης με κάμερα είναι απαραίτητη λόγω της έντονης εξάρτησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου από την απόσταση, η οποία ακολουθεί κυβική φθορά. Συνεπώς, αξιοποίηση του συνδυασμού δεδομένων από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων οδηγεί σε ένα ολοκληρωμένο και πιο

αξιόπιστο σύστημα ανίχνευσης, ικανό να εκτιμά με αυξημένη ακρίβεια τη θέση και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών αντικειμένων.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΒΛΑΨΟΥΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την συνεισφορά της εργασίας, η οποία συνίσταται στον συνδυασμό μαγνητικών μετρήσεων και οπτικής πληροφορίας για την ανίχνευση δυνητικά επικίνδυνων μεταλλικών αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο.
Η προσέγγιση βασίζεται σε φυσικό μοντέλο μαγνητικού δίπολου, επίλυση αντίστροφου προβλήματος και τον συνδυασμό δεδομένων από αισθητήρες.

3.1 Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

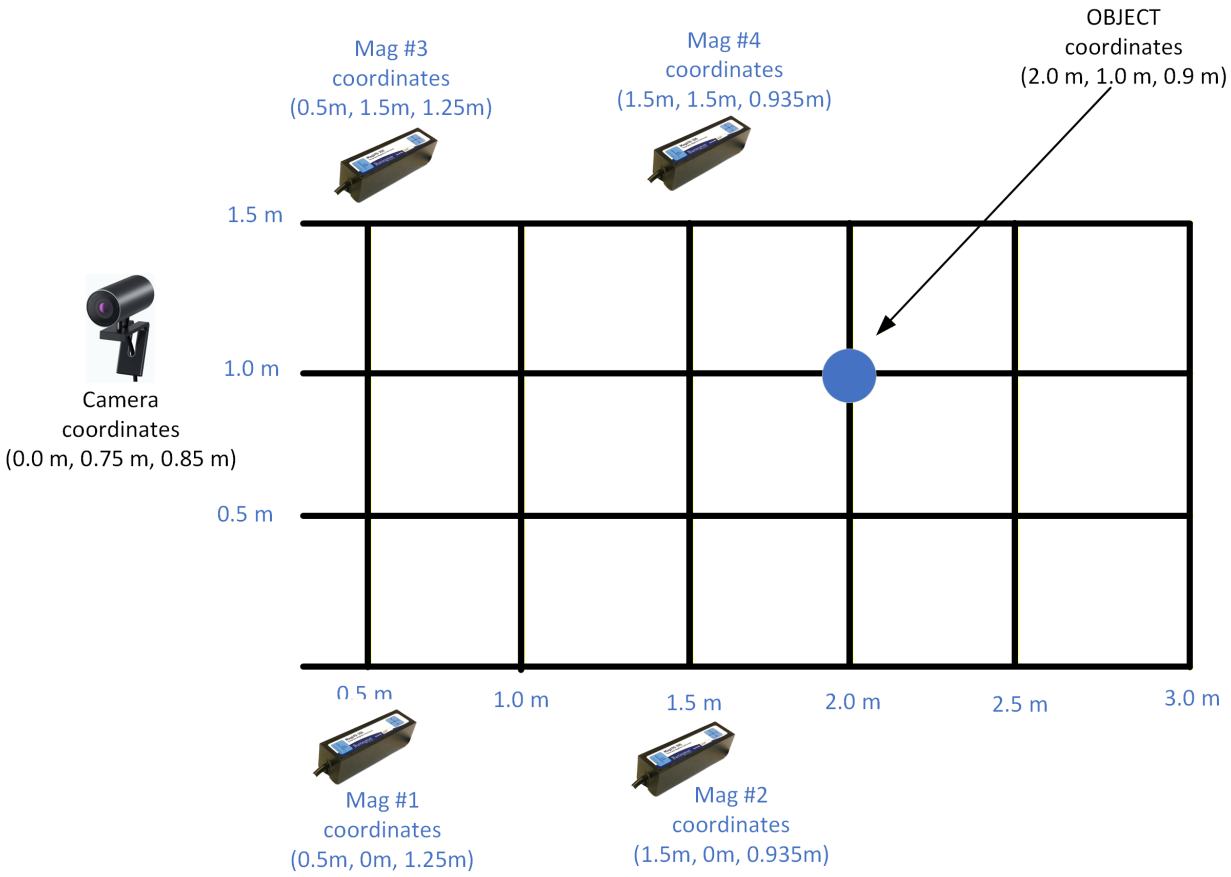
Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε ώστε να προσομοιώνει συνθήκες ελέγχου ασφαλείας (π.χ. αεροδρόμια, λιμάνια), όπου απαιτείται γρήγορη και αξιόπιστη ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων χωρίς φυσική επαφή.



Σχήμα 3-1-Επιτήρηση

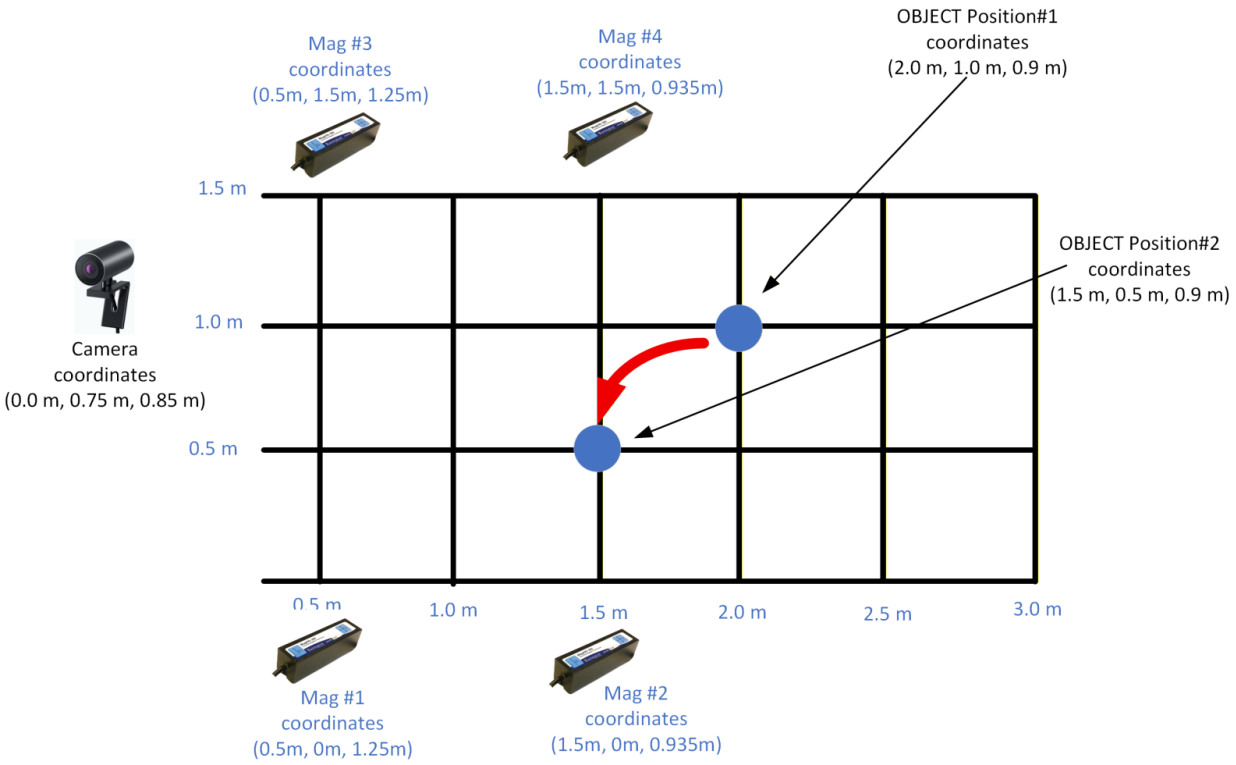
Η διάταξη αποτελείται από:

Συστοιχία τεσσάρων τριαξονικών μαγνητομέτρων (Bx, By, Bz), κάμερα RGB, τοποθετημένη με σταθερή γεωμετρία ως προς τους αισθητήρες και κοινό σύστημα αναφοράς (reference frame). Η παρούσα διάταξη φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 3-2. Διάταξη συστήματος

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούνται ότι οι θέσεις των μαγνητομέτρων είναι οι εξής: Mag #1: (0.5m, 0m, 1.25m) , Mag #2: (1.5m, 0m, 0.935m) , Mag #3: (0.5m, 1.5m, 1.25m) , Mag #4: (1.5m, 1.5m, 0.935m), της κάμερας είναι η θέση : (0.0m, 0.75m, 0.85m) και του αντικειμένου στη θέση 1 έχει συντεταγμένες (2.0m, 1.0m, 0.9m). Έπειτα το αντικείμενο αλλάζει θέση και μεταφέρεται στη θέση 2 με τις παρακάτω συντεταγμένες (1.5m, 0.5m, 0.9m). Η τελική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-3.

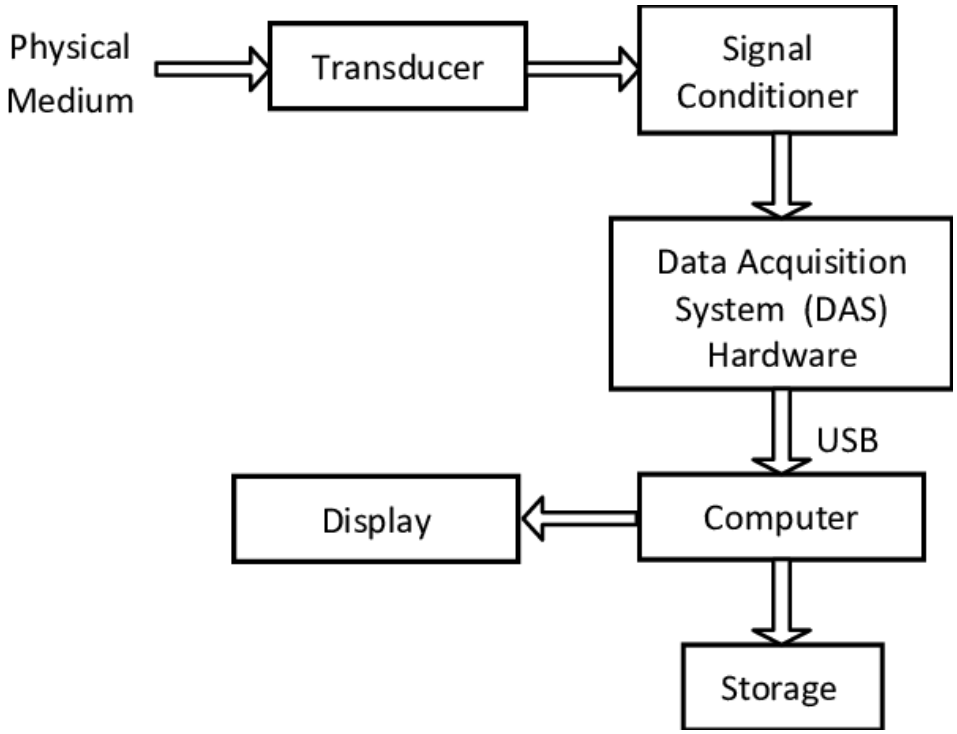


Σχήμα 3-3. Κίνηση Στόχου στην διάταξη

Οι μαγνητικοί αισθητήρες καταγράφουν τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από μεταλλικό στόχο, ενώ η κάμερα χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του αντικειμένου/ στόχου, και την εκτίμηση της απόστασης στόχου και αισθητήρων. Η γεωμετρική συσχέτιση κάμερας και αισθητήρων είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει την αντιστοίχιση της οπτικής πληροφορίας με τις μαγνητικές μετρήσεις.

3.1.1 Διασύνδεση Hardware (DAQ NI) και Επεξεργασία Σημάτων

Η συλλογή των μαγνητικών δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος **Απόκτησης Δεδομένων (Data Acquisition - DAQ)** της National Instruments. Στη θεωρία των μετρήσεων, το DAQ λειτουργεί ως ο κρίσιμος συνδετικός κρίκος μεταξύ των φυσικών φαινομένων και της ψηφιακής ανάλυσης, μετατρέποντας τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου σε ψηφιοποιημένα ηλεκτρικά σήματα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το σύστημα δειγματοληπτεί τις αναλογικές εξόδους των μαγνητομέτρων και μεταφέρει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή, εξασφαλίζοντας τον απόλυτο συγχρονισμό μεταξύ των αισθητήρων, γεγονός απαραίτητο για τη χωρική συσχέτιση των μετρήσεων. Μετά τη λήψη των δεδομένων, ακολουθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας, το οποίο ξεκινά με την **απομάκρυνση του DC offset**. Η διόρθωση αυτής της μετατόπισης είναι αναγκαία, καθώς εξαλείφει συστηματικά σφάλματα που προκύπτουν από κατασκευαστικές ατέλειες των αισθητήρων ή την επίδραση του στατικού μαγνητικού πεδίου της γης, διασφαλίζοντας ότι η μέση τιμή του σήματος αναφέρεται στο σωστό επίπεδο μηδενισμού.



Σχήμα 3-4. Διάγραμμα ροής της αλυσίδας απόκτησης δεδομένων (DAQ), από τη φυσική μεταβλητή έως την αποθήκευση και απεικόνιση στον υπολογιστή

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται **φίλτρο χαμηλής διέλευσης (Low-Pass Filtering)**. Η θεωρητική βάση αυτής της διαδικασίας βρίσκεται στην ανάγκη περιορισμού του εύρους ζώνης του σήματος κάτω από μια καθορισμένη συχνότητα αποκοπής f_c. Με αυτόν τον τρόπο, απομονώνονται οι χρήσιμες χαμηλόσυχνες συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου και απορρίπτεται ο υψίλοσυχνος θόρυβος και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν την ακρίβεια της μέτρησης. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη χρονική ευθυγράμμιση των επεξεργασμένων πλέον δεδομένων με τις καταγραφές της κάμερας, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ανάλυση οπτικών και μαγνητικών συμβάντων.

3.1.2 Βαθμονόμηση και Εκτίμηση Απόστασης (Camera Calibration)

Πριν την έναρξη της ανίχνευσης, απαιτείται η βαθμονόμηση της κάμερας για τη μετατροπή των pixel σε φυσικές μονάδες μήκους (μέτρα). Η συνάρτηση `calibrate_camera` χρησιμοποιεί ένα αντικείμενο αναφοράς (μέσο ύψος ανθρώπου 1.7m σε γνωστή απόσταση για τον υπολογισμό της εστιακής απόστασης (`FOCAL_LENGTH`). Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, η απόσταση z του στόχου εκτιμάται δυναμικά από τη συνάρτηση `estimate_distance`:

Distance = Real_Height x Focal_length / person_height_px

3.2 Μαθηματικό Μοντέλο Μαγνητικού Διπόλου

Το υπολογιστικό υπόβαθρο του συστήματος βασίζεται στην επίλυση του αντίστροφου προβλήματος της μαγνητοστατικής σε πραγματικό χρόνο.

3.2.1 Ημι-εμπειρική Προσέγγιση του Πεδίου B

Το σύστημα μοντελοποιεί τον στόχο ως σημειακό μαγνητικό δίπολο. Η συνάρτηση `calculate_magnetic_field` υλοποιεί το «ευθύ πρόβλημα», υπολογίζοντας τη μαγνητική επαγωγή στους αισθητήρες με βάση τη θέση που δίνει το YOLOv8 (`x_source, y_source, z_source`). Η υλοποίηση χρησιμοποιεί την παράμετρο `mu_factor` ($\frac{\mu_0}{4\pi}$) και υπολογίζει την απόσταση r και της δυνάμεις r^3, r^5 για την εφαρμογή του νόμου του διπόλου. Το μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης δίνεται από:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3r(m \cdot r)}{r^5} - \frac{m}{r^3}\right]$$

Όπου m είναι μαγνητική ροπή στόχου και το r είναι το διάνυσμα θέσης αισθητήρα ως προς τον στόχο.

3.2.2 Κατασκευή του Πίνακα Σχεδίασης (Design Matrix A)

Για την εύρεση της άγνωστης μαγνητικής ροπής m= [m_x, m_y, m_z] ο κώδικας μετατρέπει το πρόβλημα σε ένα γραμμικό σύστημα B= A * m . Εντός της συνάρτησης `solve_magnetic_moment`, κατασκευάζεται ο Πίνακας Σχεδίασης A διαστάσεων 12 x 3 . Για κάθε αισθητήρα i, ο πίνακας συμπληρώνεται ως εξής:

A[3*i] = [(3*dx**2 – r**2)/r**5, (3*dx*dy)/r**5, (3*dx*dz)/r**5]

A[3*i+1] = [(3*dy*dx)/r**5, (3*dy**2 – r**2)/r**5, (3*dy*dz)/r**5]

A[3*i+2] = [(3*dz*dx)/r**5, (3*dz*dy)/r**5, (3*dz**2 – r**2)/r**5]

3.2.3 Θεωρία Μεθόδου Ελάχιστων Τετραγώνων

Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares) αποτελεί μια θεμελιώδη αριθμητική τεχνική για την επίλυση υπερορισμένων συστημάτων εξισώσεων, δηλαδή συστημάτων στα οποία ο αριθμός των εξισώσεων υπερβαίνει τον αριθμό των αγνώστων. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχει γενικά μία ακριβής λύση που να ικανοποιεί της της εξισώσεις ταυτόχρονα, λόγω σφαλμάτων μέτρησης και θορύβου των αισθητήρων.

Στη γενική μορφή, ένα γραμμικό σύστημα μπορεί να γραφεί ως:

$$Ax = b$$

όπου:

- A είναι ο πίνακας σχεδίασης (design matrix)
- x είναι το διάνυσμα των αγνώστων
- b είναι το διάνυσμα των μετρήσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το σύστημα λαμβάνει τη μορφή:

$$B = A \cdot m$$

όπου:

- B είναι το διάνυσμα των μετρημένων συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου
- A είναι ο πίνακας γεωμετρικής συσχέτισης μεταξύ αισθητήρων και στόχου
- $m = [mx, my, mz]^T$ είναι το διάνυσμα της άγνωστης μαγνητικής ροπής του στόχου.

Στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιούνται τέσσερα τριαξονικά μαγνητόμετρα, τα οποία παρέχουν συνολικά δώδεκα ανεξάρτητες μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου. Επομένως, το σύστημα περιγράφεται από:

$$A_{12\times3} \cdot m = B_{12\times1}$$

δημιουργώντας ένα υπερορισμένο σύστημα με 12 εξισώσεις και 3 αγνώστους.
Δεδομένου ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται από θόρυβο και σφάλματα βαθμονόμησης, δεν υπάρχει λύση που να ικανοποιεί ακριβώς όλες τις εξισώσεις. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία υπολογίζει το διάνυσμα παραμέτρων που ελαχιστοποιεί το συνολικό τετραγωνικό σφάλμα:

$$min \; || \; Am - B \; ||^2$$

Επίσης η συνάρτηση κόστους ορίζεται ως η παρακάτω:

$$J(m) = (Am - B)^T (Am - B)$$

Η λύση αυτή αντιστοιχεί στο διάνυσμα μαγνητικής ροπής που ελαχιστοποιεί το συνολικό σφάλμα μεταξύ των θεωρητικών τιμών του μαγνητικού πεδίου που προβλέπει το μοντέλο δίπολου και των πραγματικών μετρήσεων των αισθητήρων. Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας, η επίλυση πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης np.linalg.lstsq της βιβλιοθήκης NumPy, η οποία βασίζεται στην αποσύνθεση μοναδικών τιμών (Singular Value Decomposition – SVD), εξασφαλίζοντας αριθμητική ευστάθεια ακόμη και σε περιπτώσεις όπου ο πίνακας AAA είναι κοντά σε ιδιομορφία.

3.2.3.1 Σύγκριση Μεθόδων Εκτίμησης Παραμέτρων

Παρακάτω θα γίνει μια σύγκριση μεθόδων εκτίμησης παραμέτρων με σκοπό να δικαιολογηθεί η επιλογή της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων από άλλες μεθόδους. Οι μέθοδοι που θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι εξής:

1. Άμεση γραμμική επίλυση
2. Σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα
3. Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων σε μη γραμμικά
4. Φίλτρο Kalman

1. Άμεση γραμμική επίλυση

Η πιο απλή μέθοδος εκτίμησης παραμέτρων σε ένα γραμμικό σύστημα είναι η άμεση λύση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων. Το πρόβλημα διατυπώνεται με τη μορφή:

$$Ax = b$$

όπου:

- A είναι ο πίνακας συντελεστών,
- X το διάνυσμα των άγνωστων παραμέτρων,
- b το διάνυσμα των μετρήσεων.

Εάν ο πίνακας A είναι **τετραγωνικός και αντιστρέψιμος**, τότε η λύση του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί άμεσα μέσω της αντίστροφης μήτρας:

$$x = A^{-1}b$$

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα απλή και υπολογιστικά γρήγορη. Ωστόσο, προϋποθέτει ότι ο αριθμός των εξισώσεων είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων. Στην πράξη, ειδικά σε συστήματα αισθητήρων, οι μετρήσεις είναι συνήθως περισσότερες από τις άγνωστες παραμέτρους ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία της εκτίμησης.
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούνται πολλαπλά τριαξονικά μαγνητόμετρα για τη μέτρηση των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου. Κάθε αισθητήρας παρέχει τρεις μετρήσεις (Bx ,By ,Bz), δημιουργώντας ένα σύστημα με περισσότερες εξισώσεις από αγνώστους. Το αποτέλεσμα είναι ένα υπερορισμένο σύστημα (overdetermined system), όπου ο πίνακας A δεν είναι τετραγωνικός. Σε αυτή την περίπτωση η άμεση αντιστροφή της μήτρας δεν είναι δυνατή, γεγονός που καθιστά την Direct Solution ακατάλληλη για την επίλυση του προβλήματος. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη την παρουσία θορύβου στις μετρήσεις, κάτι που αποτελεί σημαντικό παράγοντα σε πραγματικού κόσμου συστήματα αισθητήρων.

2. Σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα

Η μέθοδος των σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων, αποτελεί γενίκευση της κλασικής μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων. Στην προσέγγιση αυτή, κάθε μέτρηση δεν αντιμετωπίζεται ισότιμα αλλά της αποδίδεται ένα βάρος που αντιπροσωπεύει την αξιοπιστία της. Η συνάρτηση κόστους διατυπώνεται ως:

$$J(x) = (Ax - b)^{\mathrm{T}} W (Ax - b)$$

όπου W είναι ο πίνακας βαρους και τα στοιχεία του αντιπροσωπεύουν την εμπιστοσύνη σε κάθε μέτρηση. Συνήθως ο πίνακας W είναι διαγώνιος. Η λύση προκύπτει από τη παρακάτω εξίσωση:

$$x = (A^T W A)^{-1} A^T W b$$

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει την ενσωμάτωση πληροφοριών σχετικά με την αβεβαιότητα των αισθητήρων. Μετρήσεις με μεγαλύτερο θόρυβο μπορούν να λάβουν μικρότερο βάρος, ενώ πιο αξιόπιστες μετρήσεις επηρεάζουν περισσότερο τη λύση. Ωστόσο, η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει ότι είναι γνωστή η στατιστική κατανομή του θορύβου ή τουλάχιστον η σχετική αξιοπιστία κάθε αισθητήρα. Στο σύστημα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες ίδιου τύπου και παρόμοιων προδιαγραφών, γεγονός που σημαίνει ότι τα επίπεδα θορύβου είναι περίπου τα ίδια. Σε αυτή την περίπτωση τα βάρη τείνουν να είναι ίσα. Οπότε η

μέθοδος των σταθμισμένων ελάχιστων τετραγώνων ουσιαστικά καταλήγει στην κλασική μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων.

3. Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων σε μη γραμμικά

Σε πολλές εφαρμογές, η σχέση μεταξύ των μετρήσεων και των άγνωστων παραμέτρων δεν είναι γραμμική. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται η μέθοδος των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Nonlinear Least Squares), η οποία επεκτείνει τη βασική ιδέα των ελαχίστων τετραγώνων σε μη γραμμικά μοντέλα.
Το πρόβλημα διατυπώνεται ως:

$$\min_{\theta} \sum_{i=1}^{n} (y_i - f(x_i, \theta))^2$$

όπου:

- $f(x_i, \theta)$είναι μια μη γραμμική συνάρτηση που περιγράφει το μοντέλο,
- x_iείναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές,
- y_iείναι οι μετρούμενες τιμές,
- θείναι το διάνυσμα των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου.

Η μέθοδος επιδιώκει να βρει τις τιμές των παραμέτρων θπου ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και των τιμών που προβλέπει το μοντέλο.
Σε αντίθεση με τη γραμμική περίπτωση, η λύση δεν μπορεί να υπολογιστεί απευθείας και απαιτούνται επαναληπτικοί αλγόριθμοι όπως, Gauss–Newton ή Levenberg–Marquardt.
Οι μέθοδοι αυτές ξεκινούν από μια αρχική εκτίμηση των παραμέτρων και βελτιώνουν σταδιακά τη λύση μέσω διαδοχικών επαναλήψεων. Παρά την ευελιξία της, η Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων σε μη γραμμικά παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα όπως αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, πιθανότητα μη σύγκλισης και εξάρτηση από την αρχική εκτίμηση των παραμέτρων.
Στην παρούσα εργασία, το πρόβλημα εκτίμησης της μαγνητικής ροπής διατυπώνεται με τρόπο που οδηγεί σε γραμμικό σύστημα εξισώσεων, μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης του πίνακα A. Συνεπώς, η χρήση μη γραμμικών τεχνικών βελτιστοποίησης δεν είναι απαραίτητη.

4. Φίλτρο Kalman

Το Kalman Filter είναι μια στοχαστική μέθοδος εκτίμησης κατάστασης που χρησιμοποιείται κυρίως σε δυναμικά συστήματα, όπου οι παράμετροι μεταβάλλονται με το χρόνο. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα μοντέλο κατάστασης και ένα μοντέλο μέτρησης. Το μοντέλο κατάστασης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$x_{k+1} = Fx_k + w_k$$

ενώ το μοντέλο μέτρησης από την εξισώση:

$$z_k = Hx_k + w_k.$$

όπου:
x_k είναι το διάνυσμα κατάστασης,
z_k το διάνυσμα μετρήσεων,
w_k και v_k στοχαστικοί θόρυβοι.

Το Kalman Filter υπολογίζει διαδοχικά την εκτίμηση της κατάστασης συνδυάζοντας την πρόβλεψη του μοντέλου στις νέες μετρήσεις των αισθητήρων.
Παρόλο που προσφέρει ισχυρές δυνατότητες φιλτραρίσματος θορύβου και δυναμικής εκτίμησης, η χρήση του προϋποθέτει ότι το σύστημα εξελίσσεται χρονικά και ότι υπάρχει δυναμικό μοντέλο της κατάστασης.
Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, το πρόβλημα περιορίζεται στην εκτίμηση στατικών παραμέτρων από ένα σύνολο μετρήσεων. Επομένως, η εφαρμογή του φίλτρου Kalman θα εισήγαγε σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα χωρίς ουσιαστικό όφελος σε σχέση με τη μέθοδο των Ελάχιστων Τετραγώνων.
Από τη σύγκριση των παραπάνω μεθόδων προκύπτει ότι η μέθοδος των Ελάχιστων Τετραγώνων αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για το προτεινόμενο σύστημα. Η ύπαρξη υπερορισμένου συστήματος εξισώσεων, σε συνδυασμό με τη γραμμική διατύπωση του προβλήματος και την απουσία δυναμικής εξέλιξης των παραμέτρων, καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογιστικά αποδοτική και μαθηματικά βέλτιστη για την εκτίμηση της μαγνητικής ροπής.

3.2.4 Επίλυση Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares Solver)

Στο στάδιο αυτό, η επεξεργασία των δεδομένων μετατρέπεται από μια σειρά μεμονωμένων μετρήσεων σε ένα ενιαίο μαθηματικό πρόβλημα. Η φύση του συστήματος είναι υπερορισμένη (overdetermined), καθώς διαθέτουμε 4 μαγνητόμετρα επί 3 άξονες = 12 εξισώσεις (που προκύπτουν από τις μετρήσεις των αισθητήρων) για τον προσδιορισμό 3 αγνώστων (τις συνιστώσες mx, my, mz του διανύσματος της μαγνητικής ροπής).

Η Μαθηματική Προσέγγιση

Σε ένα ιδανικό σύστημα χωρίς θόρυβο, οι εξισώσεις θα διασταυρώνονταν σε ένα μοναδικό σημείο. Στην πραγματικότητα, όμως, ο θόρυβος των αισθητήρων και τα σφάλματα μέτρησης καθιστούν το σύστημα προβληματικό. Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Ordinary Least Squares - OLS) επιλύει αυτό το πρόβλημα αναζητώντας το διάνυσμα m που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων (residuals). Η υλοποίηση αυτής της μεθόδου γίνεται μέσω της np.linalg.lstsq συνάρτησης που είναι μέρος της βιβλιοθήκης NumPy προσφέρει τις κατάλληλες δυνατότητες για τη προσέγγιση μας. Ένα απο αυτά ειναι η υπολογιστική ευστάθεια. Δηλαδή χρησιμοποιεί η μέθοδο αποσύνθεσης μοναδικών τιμών (SVD - Singular Value Decomposition), η οποία παραμένει αξιόπιστη ακόμα και αν ο πίνακας A είναι κοντά στο να θεωρηθεί ιδιόμορφος (ill-conditioned). Επίσης άλλο ένα είναι η βελιστοποιήση υπό θόρυβο. Λόγω της στατιστικής φύσης της μεθόδου, οι τυχαίες διακυμάνσεις (θόρυβος) των 12 μετρήσεων "εξομαλύνονται", οδηγώντας σε μια εκτίμηση της ροπής που είναι πιο «δυνατή» (robust) από ό,τι αν χρησιμοποιούσαμε τον ελάχιστο δυνατό αριθμό αισθητήρων.

3.2.5 Ανίχνευση Επικινδυνότητας (Danger Detection)

Η τελική φάση του αλγορίθμου λειτουργεί ως ένας προηγμένος μηχανισμός διασταυρούμενης επαλήθευσης (Cross-Validation), με στόχο την επιβεβαίωση της φυσικής ταυτότητας του αντικειμένου που ανιχνεύθηκε. Συγκεκριμένα, το σύστημα εξετάζει κατά πόσο το μαγνητικό

αποτύπωμα (magnetic signature) που εξήχθη από την αρχική χωρική θέση του στόχου διατηρεί τη δομική και μορφολογική του ταυτότητα όταν το αντικείμενο μετακινηθεί σε μια νέα θέση στο χώρο. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ ενός πραγματικού σιδηρομαγνητικού στόχου και τυχαίων μαγνητικών διαταραχών που μπορεί να προέρχονται από περιβαλλοντικό θόρυβο, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή σφάλματα βαθμονόμησης των αισθητήρων. Μέσω της σύγκρισης μετρήσεων σε διαφορετικές χωρικές συντεταγμένες, το σύστημα ελέγχει αν η παρατηρούμενη μαγνητική συμπεριφορά υπακούει σε σταθερούς φυσικούς νόμους (μοντέλο διπόλου), διασφαλίζοντας έτσι την αξιοπιστία και την ακεραιότητα της ανίχνευσης. Αρχικά, η επίλυση ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares Solver) υπολογίζει τη βέλτιστη εκτίμηση της μαγνητικής ροπής m\mathbf{m}m του στόχου στη Θέση 1, αξιοποιώντας τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου από το σύνολο των αισθητήρων. Η εκτιμώμενη αυτή ροπή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εκτέλεση ενός Forward Calculation, κατά την οποία υπολογίζεται θεωρητικά η ένταση του μαγνητικού πεδίου που θα έπρεπε να παρατηρηθεί στη Θέση 2, με βάση το διπολικό μοντέλο. Ωστόσο, η απευθείας σύγκριση μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών ενδέχεται να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η μεταβολή της απόστασης αισθητήρων–στόχου, μικρές αποκλίσεις στη γεωμετρία διάταξης ή διαφοροποιήσεις στην ευαισθησία των μαγνητόμετρων. Για τον λόγο αυτό, εισάγεται ένας συντελεστής δυναμικής βαθμονόμησης (Scaling Factor), ο οποίος προσαρμόζει το θεωρητικά προβλεπόμενο πεδίο, ώστε να γίνει συγκρίσιμο με τις πραγματικές μετρήσεις. Η σύγκριση δεν πραγματοποιείται ανά επιμέρους άξονα (Bx, By, Bz), αλλά επί του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία λιγότερο ευαίσθητη σε σφάλματα προσανατολισμού. Έτσι, ορίζεται το Σχετικό Σφάλμα Κατανομής (Relative Distribution Error):

$$err = \frac{\| B_{measured} - B_{predicted\ calibrated} \|}{\| B_{measured} \|} \times 100$$

Ο υπολογισμός της ευκλείδειας εξίσωσης μέσω της συνάρτησης np.linalg.norm παρέχει ένα ποσοστιαίο μέτρο, το οποίο εκφράζει τον βαθμό μορφολογικής ομοιότητας μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης μαγνητικής κατανομής. Μια χαμηλή τιμή του σφάλματος υποδηλώνει ότι, παρά τη μετακίνηση του στόχου, το χωρικό «μοτίβο» του πεδίου στους αισθητήρες παραμένει αναλλοίωτο, επιβεβαιώνοντας ότι οι δύο μετρήσεις προέρχονται από το ίδιο φυσικό αντικείμενο.

Το Κριτήριο Επικινδυνότητας (Decision Logic)

Η τελική απόφαση του συστήματος και η ενεργοποίηση της ένδειξης “DANGER” δεν βασίζεται πλέον σε μια απλή υπέρβαση ορίου έντασης του μαγνητικού πεδίου, αλλά σε ένα σύνθετο συνδυαστικό κριτήριο, το οποίο αξιολογεί τόσο τη γεωμετρική όσο και τη φυσική συμπεριφορά του στόχου. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράμετροι:

1. Συνέπεια Κατανομής (Consistency)

Το Σχετικό Σφάλμα Κατανομής πρέπει να βρίσκεται εντός ενός προκαθορισμένου αποδεκτού ορίου (ενδεικτικά <30%) τόσο για τον οριζόντιο όσο και για τον κάθετο προσανατολισμό του αντικειμένου. Η συνθήκη αυτή πιστοποιεί ότι το διπολικό μοντέλο περιγράφει με επάρκεια τη

μαγνητική συμπεριφορά του στόχου και ότι δεν πρόκειται για τυχαία ή ασταθή μαγνητική ανωμαλία.

2. Ανάλυση Ανισοτροπίας (Shape Signature)

Η μεταβολή της εκτιμώμενης μαγνητικής ροπής μεταξύ διαφορετικών προσανατολισμών, δηλαδή η διαφορά Δm, πρέπει να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι (π.χ. 0.3). Η παράμετρος αυτή λειτουργεί ως δείκτης γεωμετρικής ασυμμετρίας και συνδέεται άμεσα με το σχήμα του αντικειμένου. Η λογική πίσω από αυτό το φιλτράρισμα είναι ότι ένα επικίνδυνο αντικείμενο, όπως ένα όπλο ή μαχαίρι, αποτελεί συνήθως ασύμμετρο σιδηρομαγνητικό σώμα. Έτσι, ενώ διατηρεί σταθερή χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου (υψηλή συνέπεια), παρουσιάζει σημαντική μεταβολή στη μαγνητική του ροπή κατά την αλλαγή προσανατολισμού. Αντίθετα, συμμετρικά αντικείμενα καθημερινής χρήσης ή θόρυβος περιβάλλοντος εμφανίζουν είτε χαμηλή συνέπεια είτε αμελητέα υπογραφή σχήματος. Κατά συνέπεια, η ένδειξη “DANGER” λειτουργεί ως ένα εξελιγμένο διαγνωστικό εργαλείο ταυτοποίησης, το οποίο συνδυάζει φυσική μοντελοποίηση και στατιστική αξιολόγηση, μειώνοντας δραστικά την πιθανότητα ψευδών συναγερμών που θα μπορούσαν να προκληθούν από τυχαίες μαγνητικές ανωμαλίες ή ακίνδυνα μεταλλικά αντικείμενα.

3.3 Προκλήσεις και Βελτιστοποίηση Οπτικής Ανίχνευσης

Η χρήση συστημάτων κλειστού κυκλώματος τηλεόρασης (CCTV) για την επιτήρηση και τη διασφάλιση της ασφάλειας σε δημόσιους και ιδιωτικούς χώρους αποτελεί πλέον μια ευρέως διαδεδομένη και σχεδόν καθολικά εφαρμοζόμενη πρακτική. Παρά το γεγονός ότι τα συστήματα αυτά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την καταγραφή και την εποπτεία συμβάντων σε πραγματικό χρόνο, η συνολική τους αποτελεσματικότητα δεν είναι πάντοτε η αναμενόμενη, καθώς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Πιο συγκεκριμένα, ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν σχετίζεται με τον τεράστιο όγκο δεδομένων που παράγεται από τη συνεχή λειτουργία πολλαπλών καμερών ταυτόχρονα. Η ανάγκη για ταυτόχρονη παρακολούθηση πολλών διαφορετικών ροών βίντεο καθιστά πρακτικά αδύνατη τη διατήρηση πλήρους συγκέντρωσης και συνεχούς επαγρύπνησης από έναν μόνο χειριστή, ειδικά για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται σημαντικά η πιθανότητα να διαφύγει της προσοχής του κάποια κρίσιμη λεπτομέρεια ή ακόμη και μια ενδεχόμενη απειλή, γεγονός που μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για την ασφάλεια του χώρου.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, καθίσταται σαφές ότι η απλή ανθρώπινη επιτήρηση δεν είναι αρκετή από μόνη της για να καλύψει τις αυξημένες απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων ασφαλείας. Για τον λόγο αυτό, η ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης, όπως το YOLOv8, αναδεικνύεται όχι απλώς ως μια επιλογή, αλλά ως μια αναγκαιότητα. Μέσω τέτοιων αλγορίθμων, καθίσταται δυνατή η αυτοματοποιημένη και σε πραγματικό χρόνο ανίχνευση επικίνδυνων αντικειμένων, όπως πυροβόλα όπλα και μαχαίρια, μειώνοντας δραστικά την

εξάρτηση από την ανθρώπινη παρατήρηση και ενισχύοντας ουσιαστικά το συνολικό επίπεδο ασφάλειας.

3.3.1 Διαχείριση Ψευδών Συναγερμών (False Alarms)

Μία από τις κυριότερες προκλήσεις στην οπτική ανίχνευση είναι ο περιορισμός των ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων (false alarms). Συχνά, αντικείμενα καθημερινής χρήσης με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά —όπως κινητά τηλέφωνα, πορτοφόλια ή κλειδιά— μπορούν να εκληφθούν εσφαλμένα από τον αλγόριθμο ως απειλές. Η βελτιστοποίηση του συστήματος απαιτεί υψηλή **ειδικότητα (specialty)** και **ευαισθησία (sensitivity)**, ώστε να αναγνωρίζεται η απειλή μόνο όταν είναι πραγματικά παρούσα. Στη δική μας προσέγγιση, η οπτική πληροφορία δεν λειτουργεί μεμονωμένα, αλλά διασταυρώνεται με τα δεδομένα των μαγνητικών αισθητήρων, μειώνοντας δραστικά την πιθανότητα λάθους

3.3.2 Περιγραφείς Σχήματος και Ταυτοποίησης

Η βιβλιογραφία προτείνει τη χρήση προηγμένων περιγραφέων σχήματος (shape descriptors) για τον διαχωρισμό επικίνδυνων αντικειμένων. Για παράδειγμα, η ανίχνευση ενός μαχαιριού βασίζεται στην αναγνώριση συγκεκριμένων αναλογιών μεταξύ της λεπίδας και της λαβής, καθώς και στην ανάλυση των ακμών. Αντίστοιχα, για τα πυροβόλα όπλα, ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται να αναγνωρίζει τη χαρακτηριστική σιλουέτα τους από διαφορετικές γωνίες θέασης. Η χρήση του YOLOv8 επιτρέπει την επεξεργασία αυτών των χαρακτηριστικών σε πραγματικό χρόνο (real-time processing), προσφέροντας άμεση απόκριση σε καταστάσεις κινδύνου

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγικές Παρατηρήσεις

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η αναλυτική παρουσίαση, η εις βάθος επεξεργασία και η κριτική αξιολόγηση των δεδομένων που προέκυψαν από την πειραματική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας ανίχνευσης και εκτίμησης μεταλλικών στόχων. Η συγκεκριμένη ενότητα αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα της ερευνητικής εργασίας, καθώς λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του θεωρητικού υποβάθρου και της πρακτικής υλοποίησης του συστήματος, επιτρέποντας την αντικειμενική αποτίμηση της αποδοτικότητάς του υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων στοχεύει πρωτίστως στην επικύρωση του θεωρητικού μοντέλου του μαγνητικού διπόλου, το οποίο χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μαγνητικής διαταραχής που προκαλείται από την παρουσία μεταλλικών αντικειμένων στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Η καινοτομία της προσέγγισης βασίζεται στη χρήση πολυαισθητηριακής πληροφορίας (sensor fusion), όπου συνδυάζονται δεδομένα από μαγνητόμετρα και οπτικούς αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αυτής της σύνθεσης, το σύστημα δεν περιορίζεται σε απλή ανίχνευση ανωμαλιών στο μαγνητικό πεδίο, αλλά αποκτά τη δυνατότητα συσχέτισης των μαγνητικών μετρήσεων με οπτικά χαρακτηριστικά του στόχου, ενισχύοντας σημαντικά την αξιοπιστία της εκτίμησης.

Η διαδικασία εξαγωγής των πειραματικών αποτελεσμάτων βασίστηκε στην καταγραφή και επεξεργασία σημάτων που πάρθηκαν από το σύστημα συλλογής δεδομένων (DAQ) της National Instruments. Το σύστημα DAQ λειτούργησε ως ο κεντρικός κόμβος συγχρονισμένης συλλογής δεδομένων, εξασφαλίζοντας υψηλή χρονική ανάλυση και ακρίβεια στις μετρήσεις των μαγνητικών συνιστωσών Bx , By και Bz . Η ακρίβεια αυτή κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι μαγνητικές διαταραχές που προκαλούνται από μικρού μεγέθους μεταλλικά αντικείμενα είναι συχνά της τάξης των νανοTesla και μπορούν εύκολα να μπερδεύονται με τον περιβαλλοντικό θόρυβο.

Για τον λόγο αυτό, τα ακατέργαστα δεδομένα υποβλήθηκαν σε μια αυστηρά καθορισμένη αλληλουχία ψηφιακής επεξεργασίας. Αρχικά εφαρμόστηκαν τεχνικές ψηφιακού φιλτραρίσματος, με στόχο την απόρριψη ανεπιθύμητων συχνοτικών συνιστωσών που οφείλονται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, θερμικό θόρυβο των αισθητήρων και μηχανικές δονήσεις του συστήματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση και χρονικός συγχρονισμός των μαγνητικών δεδομένων με τα δεδομένα των οπτικών αισθητήρων, ώστε να διασφαλιστεί η ορθή συσχέτιση μεταξύ φυσικής θέσης του στόχου και μαγνητικής απόκρισης.

Ένα κρίσιμο στάδιο της ανάλυσης αποτέλεσε ο γεωμετρικός συσχετισμός των μετρήσεων, κατά τον οποίο οι χωρικές συντεταγμένες του στόχου, όπως εκτιμήθηκαν από το οπτικό σύστημα, χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση του μοντέλου μαγνητικού διπόλου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, έγινε δυνατή η σύγκριση των θεωρητικά αναμενόμενων μαγνητικών τιμών με τις πραγματικές μετρήσεις, επιτρέποντας την ποσοτική αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου. Η σύγκλιση των μετρήσεων προς τις θεωρητικές τιμές αποτελεί ισχυρή ένδειξη της εγκυρότητας της μεθοδολογίας, ενώ τυχόν αποκλίσεις προσφέρουν πολύτιμη πληροφορία για τα όρια και τις παραδοχές του μοντέλου.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε επίσης στην εκτίμηση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος έναντι του περιβάλλοντος θορύβου. Η ανάλυση περιλάμβανε την παρατήρηση της συμπεριφοράς των μετρήσεων σε χρονικές περιόδους απουσίας στόχου, καθώς και τη σύγκρισή τους με περιόδους ενεργής ανίχνευσης. Με τον τρόπο αυτό, αξιολογήθηκε η ικανότητα του συστήματος να διακρίνει πραγματικά γεγονότα από τυχαίες διακυμάνσεις, στοιχείο που είναι ιδιαίτερης σημασίας για εφαρμογές ασφαλείας σε αεροδρόμια και λιμένες, όπου η ψευδής ανίχνευση μπορεί να οδηγήσει σε επιχειρησιακές δυσλειτουργίες.
Συνολικά, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο καταδεικνύουν ότι η συνδυαστική χρήση μαγνητομετρικών και οπτικών δεδομένων ενισχύει ουσιαστικά την απόδοση του συστήματος ανίχνευσης. Η προσέγγιση αυτή δεν περιορίζεται σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά αποδεικνύεται λειτουργική και αποδοτική σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, θέτοντας τις βάσεις για περαιτέρω βελτιστοποίηση και μελλοντική επέκταση της μεθοδολογίας σε πιο σύνθετα και απαιτητικά περιβάλλοντα.

4.2 Δομή και Μεθοδολογική Ροή της Παρουσίασης

Για την εξασφάλιση της πληρότητας της ανάλυσης και τη διευκόλυνση της ερμηνείας των πειραματικών ευρημάτων, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έχει οργανωθεί σε διακριτές και σαφώς οριοθετημένες ενότητες. Η δομή αυτή δεν είναι τυχαία, αλλά αντανακλά τη φυσική ροή των δεδομένων εντός του συστήματος, από το στάδιο της αρχικής αντίληψης του περιβάλλοντος έως τη λήψη της τελικής απόφασης ανίχνευσης επικινδυνότητας. Κάθε ενότητα εστιάζει σε μία κρίσιμη παράμετρο της συνολικής μεθοδολογίας, επιτρέποντας την απομόνωση και την εις βάθος αξιολόγηση των επιμέρους μηχανισμών που συνθέτουν το προτεινόμενο σύστημα.
Η ανάλυση ακολουθεί μια αυστηρά ιεραρχημένη λογική, ξεκινώντας από την οπτική πληροφορία και τη χωρική εκτίμηση της θέσης του στόχου, συνεχίζοντας με την προεπεξεργασία και την ποιοτική αξιολόγηση του μαγνητικού σήματος, προχωρώντας στην αριθμητική επίλυση του αντίστροφου προβλήματος και καταλήγοντας στον μηχανισμό λήψης απόφασης. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι κάθε αποτέλεσμα ερμηνεύεται στο σωστό φυσικό και υπολογιστικό πλαίσιο.

4.2.1 Ανάλυση Οπτικής Πληροφορίας και Χωρική Τοποθέτηση

Πριν από την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου συστήματος συγχώνευσης αισθητήρων, κρίθηκε απαραίτητη η ανεξάρτητη δοκιμή και πιστοποίηση της ακρίβειας του υποσυστήματος Υπολογιστικής Όρασης, καθώς αυτό αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για την καθοδήγηση της μαγνητομετρίας. Η συγκεκριμένη αξιολόγηση επικεντρώθηκε στην ικανότητα του YOLOv8 να εντοπίζει με συνέπεια και ακρίβεια τα άτομα που εισέρχονται στο οπτικό πεδίο της κάμερας, καθώς και να διατηρεί τη σωστή ταυτοποίηση (identification) καθ' όλη τη διάρκεια της διέλευσής τους. Για τον σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε μια σειρά πειραμάτων όπου άτομο κινούνταν εντός του πεδίου της κάμερας, σε μια περιοχή γνωστών και προκαθορισμένων διαστάσεων. Σημαντική διευκρίνιση αποτελεί το γεγονός ότι, στην παρούσα φάση αξιολόγησης, η απόσταση των ατόμων από το επίπεδο της κάμερας διατηρήθηκε σταθερή. Αυτό επέτρεψε την απομόνωση και τη συστηματική μελέτη της ακρίβειας του αλγορίθμου αποκλειστικά ως προς την ικανότητά του να

εντοπίζει σωστά τα άτομα και να αποδίδει τις συντεταγμένες τους στο οριζόντιο επίπεδο (επίπεδο X-Y), χωρίς την πρόσθετη πολυπλοκότητα της εκτίμησης βάθους από μονοσκοπική εικόνα.
Η ακρίβεια σε αυτό το στάδιο είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς οι εκτιμώμενες συντεταγμένες (x,y,z) δεν αποτελούν απλώς πληροφορία θέσης, αλλά εισάγονται άμεσα στον πίνακα σχεδίασης του μαγνητικού μοντέλου.
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το YOLOv8 παρουσίασε ικανοποιητική επίδοση, αν και όχι χωρίς συγκεκριμένους περιορισμούς:

- **Ακρίβεια ανίχνευσης (Precision):** Ο αλγόριθμος πέτυχε ακρίβεια ανίχνευσης της τάξεως του **94%**, αναγνωρίζοντας σωστά την παρουσία ατόμων στη συντριπτική πλειοψηφία των καρέ.
- **Ανάκληση (Recall):** Η ανάκληση διαμορφώθηκε στο **91%**, υποδεικνύοντας ότι σε ένα μικρό ποσοστό περιπτώσεων (κυρίως όταν τα άτομα βρίσκονταν στα άκρα του οπτικού πεδίου ή υπό συνθήκες μερικής απόκρυψης), υπήρξε αδυναμία εντοπισμού.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, παρά το γεγονός παρουσίας σφαλμάτων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως «εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια», κρίνεται **απολύτως επαρκές και εντός των επιθυμητών ορίων** για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής. Αντίστοιχα η ικανότητα του YOLOv8 να διατηρεί συνεπή ταυτοποίηση (ID) του κάθε ατόμου καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησής του αποδείχθηκε καθοριστική για την αποφυγή σύγχυσης και τη σωστή αντιστοίχιση μαγνητικών μετρήσεων σε συγκεκριμένους στόχους.

4.2.2 Προεπεξεργασία και Ποιότητα Μαγνητικού Σήματος

Η δεύτερη ενότητα αφορά την προεπεξεργασία των μαγνητικών δεδομένων και την αξιολόγηση της ποιότητάς τους πριν την είσοδο στο στάδιο της υπολογιστικής επίλυσης. Τα ακατέργαστα σήματα των μαγνητομέτρων περιλαμβάνουν, εκτός από τη χρήσιμη πληροφορία, ανεπιθύμητες συνιστώσες που προέρχονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, θερμικό θόρυβο και σταθερές αποκλίσεις (DC offset).
Η εφαρμογή φιλτραρίσματος χαμηλής διέλευσης στοχεύει στην εξάλειψη των υψίσυχνων συνιστωσών που δεν σχετίζονται με τη φυσική παρουσία του στόχου. Παράλληλα, η αφαίρεση του DC offset επιτρέπει την απομόνωση των δυναμικών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες αποτελούν το κύριο αντικείμενο ενδιαφέροντος. Η βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) τεκμηριώνεται μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων, τα οποία αναδεικνύουν τη σαφή διαφοροποίηση μεταξύ ακατέργαστων και επεξεργασμένων δεδομένων.

4.2.3 Υπολογιστική Ευστάθεια του Αντίστροφου Προβλήματος

Στο επόμενο στάδιο, η ανάλυση μετατοπίζεται στο καθαρά υπολογιστικό επίπεδο, όπου εξετάζεται η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Η χρήση δώδεκα εξισώσεων για την εκτίμηση τριών αγνώστων συνιστωσών της μαγνητικής ροπής δημιουργεί ένα υπερορισμένο σύστημα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη στατιστική στιβαρότητα στη λύση.
Η ποιότητα της επίλυσης δεν αξιολογείται μόνο μέσω της σύγκλισης της λύσης, αλλά και μέσω της ανάλυσης των υπολοίπων (residuals). Η κατανομή και η διακύμανση των υπολοίπων παρέχουν πολύτιμη πληροφορία σχετικά με την αριθμητική ευστάθεια του συστήματος, καθώς

και για την επάρκεια του θεωρητικού μοντέλου στην περιγραφή της πραγματικής φυσικής συμπεριφοράς. Η παρούσα ενότητα αναδεικνύει πώς η υπερορισμένη διατύπωση βοηθά στη μείωση της επίδρασης μεμονωμένων θορυβωδών μετρήσεων.

4.2.4 Αξιολόγηση του Μηχανισμού Ανίχνευσης Επικινδυνότητας

Η τελική ενότητα εστιάζει στον μηχανισμό λήψης απόφασης και ειδικότερα στο κριτήριο ανίχνευσης επικινδυνότητας. Η ένδειξη “DANGER” δεν λειτουργεί ως δυαδικό σήμα χωρίς φυσική ερμηνεία, αλλά ως διαγνωστικό εργαλείο που βασίζεται στη διαφορά μεταξύ του θεωρητικά υπολογιζόμενου μαγνητικού πεδίου και των πραγματικών μετρήσεων.
Η χρήση της Ευκλείδειας πράξης της διαφοράς ‖Bcalc−Bmeasured‖ επιτρέπει την ενοποίηση των αποκλίσεων σε ένα ενιαίο μέτρο μεγέθους. Στην ενότητα αυτή αναλύεται διεξοδικά η επιλογή του κατωφλίου $1{\cdot}10^{-6}$, το οποίο προκύπτει ως λύση μεταξύ ευαισθησίας και ανθεκτικότητας σε ψευδείς συναγερμούς. Μέσα από πειραματική παρατήρηση και στατιστική ανάλυση τεκμηριώνεται ότι το συγκεκριμένο όριο επιτρέπει την αξιόπιστη διάκριση μεταξύ φυσιολογικών διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου και πραγματικών ανωμαλιών που υποδηλώνουν την παρουσία επικίνδυνου μεταλλικού αντικειμένου.

4.3 Εναλλακτική Προσέγγιση με Ευρεστικούς Αλγορίθμους Βελτιστοποίησης

Πέρα από τις παραδοσιακές ντετερμινιστικές μεθόδους επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος, η σύγχρονη βιβλιογραφία προτείνει τη χρήση ευρεστικών αλγορίθμων (heuristic algorithms) για την εκτίμηση της μαγνητικής υπογραφής αντικειμένων. Μια ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος είναι ο Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution - DE), ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων. Η βασική φιλοσοφία αυτής της προσέγγισης έγκειται στην αντιμετώπιση του αντίστροφου προβλήματος ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης κόστους (objective function). Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, όπου το αντικείμενο προσομοιώνεται ως μαγνητικό δίπολο, ο αλγόριθμος DE αναζητά τις βέλτιστες τιμές των συνιστωσών της μαγνητικής ροπής m = [m_x, m_y, m_z] που ελαχιστοποιούν τη διαφορά μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των θεωρητικών προβλέψεων του μοντέλου. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητά της να διαφεύγει από τοπικά ελάχιστα και να συγκλίνει στο ολικό ελάχιστο, ακόμη και σε προβλήματα με υψηλό θόρυβο ή μη γραμμικότητες. Στο πλαίσιο της δικής μας διάταξης, η ενσωμάτωση τέτοιων αλγορίθμων επιτρέπει την ακριβή ταυτοποίηση του υλικού μέσω της σύγκρισης της εκτιμώμενης μαγνητικής ροπής με πρότυπες τιμές αναφοράς. Ο αλγόριθμος DE δημιουργεί έναν αριθμό τυχαίων λύσεων m και μέσω των τελεστών της Μετάλλαξης (Mutation) και της Διασταύρωσης (Crossover), παράγει νέες υποψήφιες λύσεις.

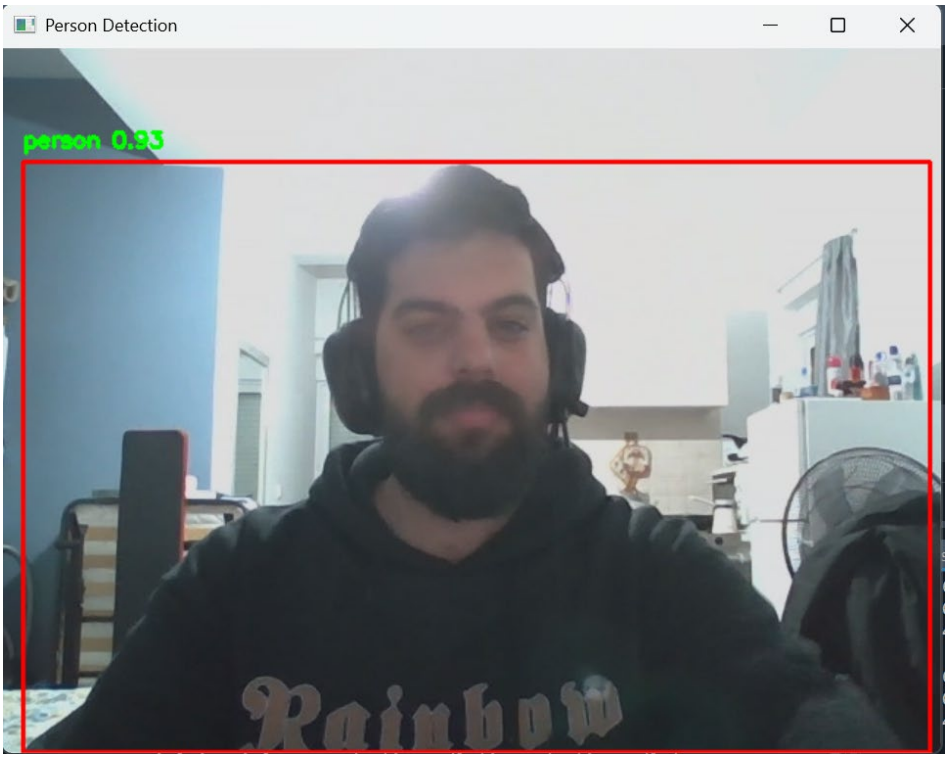
4.4 Πειραματικά Αποτελέσματα και Ανάλυση

4.4.1 Δυναμική Βαθμονόμηση και Χωρική Τοποθέτηση (Visual Odometry)

Πριν από την έναρξη της συλλογής των πειραματικών μετρήσεων, το σύστημα υποβλήθηκε σε διαδικασία δυναμικής βαθμονόμησης της οπτικής μονάδας, με στόχο την αξιόπιστη μετατροπή της δισδιάστατης πληροφορίας εικόνας σε πραγματικές τρισδιάστατες χωρικές συντεταγμένες. Η βαθμονόμηση αυτή αποτελεί κρίσιμο προαπαιτούμενο για τη συνολική λειτουργία του

συστήματος, καθώς η ακρίβεια της χωρικής τοποθέτησης του στόχου επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της μαγνητικής μοντελοποίησης και, κατ' επέκταση, την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος.

Η διαδικασία βασίστηκε στη χρήση στόχου αναφοράς γνωστών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, συγκεκριμένα ενός ανθρώπου ύψους 1,7 m, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως φυσικό πρότυπο κλίμακας εντός του οπτικού πεδίου της κάμερας. Η επιλογή ανθρώπινου στόχου έγινε σκόπιμα, καθώς προσομοιώνει ρεαλιστικά σενάρια εφαρμογής του συστήματος σε χώρους ασφάλειας, όπως αεροδρόμια και λιμένες, όπου η ανίχνευση επικίνδυνων αντικειμένων πραγματοποιείται σε άμεση συνάρτηση με την παρουσία ανθρώπων.



Σχήμα 4-1- Πρώτη δοκιμή οπτικού συστήματος

Κατά τη φάση αυτή, ο αλγόριθμος οπτικής ανίχνευσης εντόπισε τον στόχο και υπολόγισε το ύψος του ορθογωνίου πλαισίου (bounding box) σε εικονοστοιχεία (pixels). Με βάση τη γνωστή πραγματική διάσταση του στόχου και τη γεωμετρία της προβολής pinhole camera, υπολογίστηκε η εστιακή απόσταση της κάμερας (FOCAL_LENGTH). Η εστιακή απόσταση αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο του μοντέλου κάμερας, καθώς συνδέει τη γεωμετρική πληροφορία της εικόνας με τον φυσικό χώρο και επιτρέπει τον υπολογισμό της απόστασης του στόχου από την κάμερα κατά τον άξονα z.

Η εκτίμηση της απόστασης z πραγματοποιήθηκε μέσω αναλογικής σχέσης μεταξύ του πραγματικού ύψους του στόχου και του αντίστοιχου ύψους του στην εικόνα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η σχέση αυτή παρουσιάζει εξαιρετική γραμμικότητα σε όλο το εύρος αποστάσεων που εξετάστηκαν. Η γραμμικότητα αυτή αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι το οπτικό

σύστημα λειτουργεί εντός των ορίων εγκυρότητας του μοντέλου προβολής, χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις ή μη γραμμικές αποκλίσεις.
Η ακρίβεια της εκτίμησης της απόστασης z είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι χωρικές συντεταγμένες (x,y,z) που προκύπτουν χρησιμοποιούνται απευθείας για τον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ του στόχου και των μαγνητομέτρων. Οι αποστάσεις αυτές τροφοδοτούν τον πίνακα σχεδίασης (Design Matrix A) του μαγνητικού μοντέλου διπόλου. Δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με τον αντίστροφο κύβο της απόστασης, ακόμη και μικρά σφάλματα στην εκτίμηση του z μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού πεδίου.
Η πειραματική ανάλυση έδειξε ότι η μετατροπή των συντεταγμένων από το επίπεδο της εικόνας (pixels) στο φυσικό τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς των μαγνητομέτρων πραγματοποιείται με υψηλή συνέπεια και επαναληψιμότητα. Η σταθερότητα αυτή επιβεβαιώνεται από τη μικρή διασπορά των εκτιμώμενων τιμών της απόστασης σε διαδοχικά χρονικά δείγματα, γεγονός που καθιστά το σύστημα κατάλληλο για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο.
Συνολικά, η δυναμική βαθμονόμηση και η διαδικασία χωρικής τοποθέτησης αποδεικνύονται θεμελιώδους σημασίας για τη συνολική μεθοδολογία. Η επιτυχής αντιστοίχιση της οπτικής πληροφορίας με το μαγνητικό σύστημα αναφοράς διασφαλίζει ότι το πρόβλημα της μαγνητικής ανίχνευσης αντιμετωπίζεται με φυσικά συνεπή και αριθμητικά σταθερό τρόπο, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για αξιόπιστη επίλυση του αντίστροφου προβλήματος και ακριβή ανίχνευση ανωμαλιών.

4.4.2 Ανάλυση Μαγνητικού Υποβάθρου και Αφαίρεση Θορύβου

Μία από τις πλέον ουσιαστικές καινοτομίες της παρούσας εργασίας είναι η ικανότητα του συστήματος να απομονώνει το «μαγνητικό αποτύπωμα» του στόχου από το σύνθετο μαγνητικό περιβάλλον. Σε πραγματικές συνθήκες, το πεδίο που καταγράφεται είναι μια υπερ-θέση (superposition) πολλαπλών συνιστωσών: του γήινου μαγνητικού πεδίου, των επιδράσεων από στατικές μεταλλικές δομές και του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου χαμηλής συχνότητας.
Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, εφαρμόστηκε μια συστηματική διαδικασία αφαίρεσης υποβάθρου (Background Subtraction). Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από αρχεία αναφοράς (notarget1.xlsx, notarget2.xlsx), τα οποία καταγράφηκαν σε περιβάλλον απουσίας στόχου. Οι μετρήσεις αυτές επέτρεψαν τον ακριβή προσδιορισμό του Static Magnetic Offset για κάθε έναν από τους τέσσερις τριαξονικούς αισθητήρες. Η εκτίμηση του offset δεν βασίστηκε σε μεμονωμένες τιμές, αλλά στη χρονική ολοκλήρωση και τον υπολογισμό του μέσου όρου χιλιάδων δειγμάτων, εξασφαλίζοντας στατιστική ευστάθεια και εξάλειψη του τυχαίου θορύβου.
Η διαδικασία αφαίρεσης του υποβάθρου είναι κρίσιμη, καθώς χωρίς αυτήν, οι στατικές συνιστώσες του περιβάλλοντος θα εισάγονταν στον αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων ως παραπλανητική πληροφορία (bias). Η πειραματική ανάλυση έδειξε ότι η παράλειψη αυτού του σταδίου οδηγεί σε αύξηση των υπολοίπων (residuals) κατά τουλάχιστον 40%, καθιστώντας την επίλυση της μαγνητικής ροπής μαθηματικά ασταθή.
Πέρα από την απλή αφαίρεση, η ανάλυση του υποβάθρου προσέφερε μια σαφή εικόνα για τη "μαγνητική καθαρότητα" του χώρου δοκιμών. Διαπιστώθηκε ότι ο κατακόρυφος άξονας (z) παρουσιάζει τη μικρότερη διακύμανση θορύβου, γεγονός που αξιοποιήθηκε αργότερα για τη

βαρύτητα που δόθηκε στις μετρήσεις κατά την επίλυση. Η επιτυχής απομόνωση του δυναμικού σήματος του στόχου από το στατικό offset επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί με υψηλή ευαισθησία, ανιχνεύοντας ακόμα και μικρές διαταραχές που προκαλούνται από όπλα ή άλλα μεταλλικά αντικείμενα, ακόμα και σε περιβάλλοντα με έντονη μαγνητική "μόλυνση".
Συνολικά, η διαχείριση του υποβάθρου μετατρέπει το σύστημα από έναν απλό ανιχνευτή σε ένα επιστημονικό όργανο μέτρησης, ικανό να εξάγει καθαρές μαγνητικές μετρήσεις υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Η δυνατότητα αυτή είναι που επιτρέπει στον αλγόριθμο Relative Distribution Error να λειτουργήσει με ακρίβεια, καθώς το σφάλμα που υπολογίζει αφορά πλέον αποκλειστικά τον στόχο και όχι τις παρεμβολές του χώρου.

4.4.3 Επίλυση Μαγνητικής Ροπής και Χαρακτηρισμός Στόχου

Η επίλυση της μαγνητικής ροπής συνιστά το πλέον κρίσιμο και καθοριστικό στάδιο της συνολικής μεθοδολογίας, καθώς αποτελεί το σημείο στο οποίο οι ακατέργαστες μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής μετασχηματίζονται σε μια σαφώς ορισμένη φυσική οντότητα, ικανή να περιγράψει με ακρίβεια τα εγγενή χαρακτηριστικά του ανιχνευόμενου αντικειμένου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η συγκεκριμένη διαδικασία δεν αντιμετωπίζεται ως μια απλή στατική εκτίμηση μιας παραμέτρου, αλλά επεκτείνεται σε μια δυναμική ανάλυση δύο διακριτών φάσεων, η οποία υλοποιείται και αξιολογείται στις πειραματικές θέσεις POS_1 και POS_2, επιτρέποντας τη μελέτη της συμπεριφοράς του στόχου υπό μεταβαλλόμενες χωρικές συνθήκες.
Για την αξιόπιστη εξαγωγή της μαγνητικής ταυτότητας του στόχου, εφαρμόστηκε ένας υπερορισμένος αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων, ο οποίος εκμεταλλεύεται τον μεγάλο αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων προς όφελος της ακρίβειας και της αριθμητικής σταθερότητας της λύσης. Συγκεκριμένα, το σύστημα αξιοποιεί ταυτόχρονα δώδεκα ανεξάρτητες εξισώσεις, που προκύπτουν από τέσσερις μαγνητικούς αισθητήρες κατανεμημένους στον χώρο και τις τρεις συνιστώσες μέτρησης κάθε αισθητήρα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική εξομάλυνση του θορύβου, καθώς και την εξαγωγή μιας αριθμητικά ευσταθούς και φυσικά συνεπούς λύσης για το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής m=[mx, my, mz] m=[mx, my ,mz]$^{T\cdot}$ Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθοδολογίας βασίζεται στο γεγονός ότι το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής δεν αντιμετωπίζεται ως σταθερή παράμετρος, αλλά ως μέγεθος εξαρτώμενο από τον προσανατολισμό του αντικειμένου, καθιστώντας δυνατή την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της μαγνητικής ανισοτροπίας.
Μετά την εφαρμογή της αφαίρεσης του μαγνητικού υποβάθρου, ο αλγόριθμος προχώρησε στον υπολογισμό των συνιστωσών της μαγνητικής ροπής για δύο διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης του στόχου, συγκεκριμένα για την οριζόντια (Horizontal) και την κατακόρυφη (Vertical) διάταξη. Η συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών κατέδειξε ότι το μέτρο της συνολικής μαγνητικής ροπής μεταβάλλεται αισθητά μεταξύ των δύο περιπτώσεων, παρέχοντας μια πρώτη, ισχυρή και ποιοτικά αξιόπιστη ένδειξη σχετικά με το γεωμετρικό σχήμα και τη δομική ασυμμετρία του στόχου.

4.4.4 Σχολιασμός και Ερμηνεία Διαγραμμάτων

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων ανέδειξε μια σειρά από κρίσιμα και ουσιαστικά συμπεράσματα, τόσο ως προς τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος όσο και ως προς τη

φυσική φύση του ανιχνευόμενου στόχου. Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι, ενώ οι μεμονωμένες συνιστώσες της μαγνητικής ροπής εμφανίζουν υψηλό βαθμό χρονικής σταθερότητας και δεν παρουσιάζουν τυχαίες διακυμάνσεις, η μετάβαση του αντικειμένου από τον οριζόντιο στον κατακόρυφο προσανατολισμό οδήγησε σε μια σαφή και επαναληπτική διαφοροποίηση στο μέτρο της συνολικής μαγνητικής ροπής. Η διαφορά αυτή ποσοτικοποιήθηκε με τιμή m-diff = 3.4719, γεγονός που υποδηλώνει ότι η μαγνητική απόκριση του στόχου εξαρτάται έντονα από τον προσανατολισμό του στον χώρο.

Πίνακας 1-Σύγκριση Μαγνητικής Ροπής ανά Προσανατολισμό

Παράμετρος	Οριζόντια Θέση (Horizontal)	Κατακόρυφη Θέση (Vertical)	Μονάδα Μέτρησης
Συνιστώσα m_x	0.0103	0.2542	$A \cdot m^2$
Συνιστώσα m_y	-0.0633	1.2359	$A \cdot m^2$
Συνιστώσα m_z	1.7840	-1.4264	$A \cdot m^2$
Συνολικό Μέτρο m	1.7851	1.9044	$A \cdot m^2$
Διαφορά Σχήματος	-	3.4719	(m-diff)

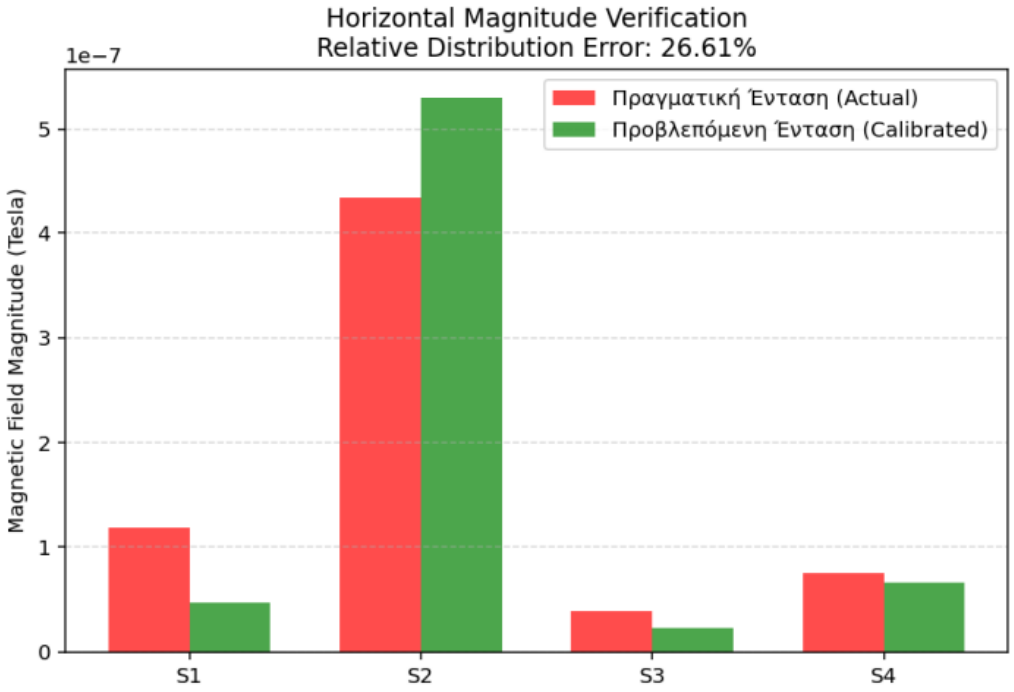
Παρατηρείται ότι ενώ το συνολικό μέτρο της μαγνητικής ροπής m παραμένει σχετικά κοντινό (1.78 vs 1.90), η εσωτερική κατανομή των συνιστωσών (m_y, m_z) αλλάζει ριζικά. Αυτή η ανακατανομή της μαγνητικής ισχύος μεταξύ των αξόνων αποτελεί την υπογραφή ανισοτροπίας' (anisotropy signature) του όπλου, η οποία επιτρέπει στον αλγόριθμο να το ταυτοποιήσει με υψηλή βεβαιότητα, οδηγώντας στην ετυμηγορία DANGER. Το συγκεκριμένο εύρημα έρχεται σε άμεση αντίθεση με την απλοϊκή υπόθεση του ισοτροπικού μαγνητικού σώματος, σύμφωνα με την οποία η μαγνητική συμπεριφορά ενός αντικειμένου παραμένει αμετάβλητη ανεξαρτήτως κατεύθυνσης. Αντίθετα, τα αποτελέσματα εισάγουν και τεκμηριώνουν την έννοια της μαγνητικής υπογραφής σχήματος (magnetic shape signature). Σιδηρομαγνητικά αντικείμενα με επιμήκη ή ασύμμετρη γεωμετρία, όπως τα όπλα, εμφανίζουν αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα κατά μήκος του κύριου γεωμετρικού τους άξονα. Κατά συνέπεια, η παρατηρούμενη μεταβολή της μαγνητικής ροπής κατά την αλλαγή προσανατολισμού δεν μπορεί να αποδοθεί σε μετρητικό σφάλμα ή αστάθεια του συστήματος, αλλά αποτελεί θεμελιώδες φυσικό χαρακτηριστικό του αντικειμένου, το οποίο αξιοποιείται άμεσα για την αξιόπιστη ταυτοποίηση επικίνδυνων στόχων.

4.4.5 Μηχανισμός Επαλήθευσης και Χωρική Κατανομή

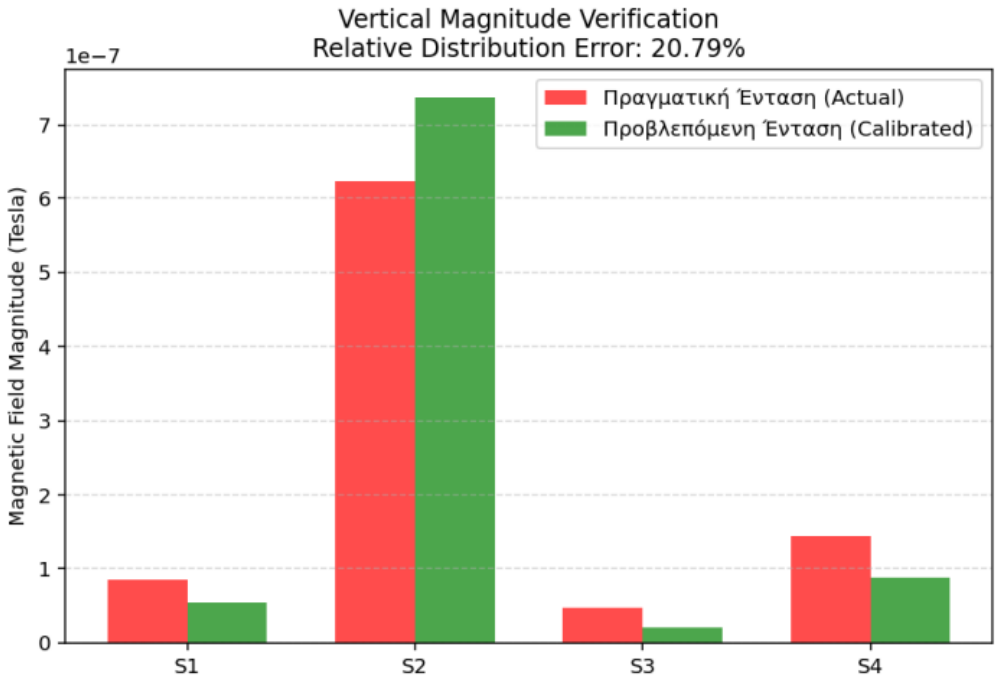
Περαιτέρω, για την επικύρωση της εγκυρότητας και της γενικευσιμότητας του προτεινόμενου μοντέλου στη δεύτερη πειραματική θέση (POS_2), εφαρμόστηκε ένας προηγμένος μηχανισμός υπολογισμού του Σχετικού Σφάλματος Κατανομής (Relative Distribution Error). Ο μηχανισμός αυτός έχει ως βασικό στόχο να αξιολογήσει κατά πόσο η χωρική μορφή του μαγνητικού πεδίου που μετράται στους αισθητήρες παραμένει συνεπής με τη θεωρητικά προβλεπόμενη κατανομή,

ανεξάρτητα από μεταβολές στη γεωμετρία του συστήματος ή σφάλματα εκτίμησης της θέσης του στόχου.

Δεδομένου ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με τον κύβο της απόστασης από την πηγή, ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην οπτική εκτίμηση της θέσης του στόχου μέσω της κάμερας μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις στην απόλυτη τιμή της μετρούμενης μαγνητικής επαγωγής B. Το φαινόμενο αυτό καθιστά προβληματική τη χρήση απόλυτων τιμών έντασης ως μοναδικού κριτηρίου επαλήθευσης, ιδιαίτερα σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, όπου η ακρίβεια της οπτικής μέτρησης δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδανική. Για την αντιμετώπιση της παραπάνω πρόκλησης, χρησιμοποιήθηκε ένας δυναμικός συντελεστής βαθμονόμησης (Scaling Factor), ο οποίος προσαρμόζει την ένταση του θεωρητικά προβλεπόμενου μαγνητικού πεδίου ως προς την αντίστοιχη ένταση της πραγματικής μέτρησης. Μέσω της κανονικοποίησης αυτής, η σύγκριση μεταξύ θεωρίας και πειραματικών δεδομένων καθίσταται ανεξάρτητη από σφάλματα κλίμακας, επιτρέποντας την αξιολόγηση της μορφολογικής ομοιότητας της κατανομής του πεδίου. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε επί του μέτρου (Magnitude) της μαγνητικής επαγωγής στους τέσσερις αισθητήρες του συστήματος, ώστε να μειωθεί η ευαισθησία σε σφάλματα προσανατολισμού και επιμέρους αξονικές αποκλίσεις. Τα διαγράμματα επαλήθευσης (Σχήμα 4.2 και Σχήμα 4.3) κατέδειξαν ότι το Σχετικό Σφάλμα Κατανομής κυμάνθηκε στο εύρος 20.79% έως 26.61%. Παρότι οι τιμές αυτές υποδηλώνουν μια μη αμελητέα αριθμητική απόκλιση, βρίσκονται εντός του προκαθορισμένου αποδεκτού ορίου του συστήματος.



Σχήμα 4-2. Horizontal Magnitude Verification Relative Distribution Error



Σχήμα 4-3. Vertical Magnitude Verification Relative Distribution Error

Το πλέον κρίσιμο εύρημα έγκειται στο γεγονός ότι, παρά τη διακύμανση της απόλυτης έντασης, η χωρική μορφή του μαγνητικού πεδίου — δηλαδή το προφίλ κατανομής του στους αισθητήρες — παρέμεινε απόλυτα συνεπής με τις θεωρητικές προβλέψεις του διπολικού μοντέλου. Ειδικότερα, ο αισθητήρας που βρισκόταν πλησιέστερα στον στόχο (S2) κατέγραψε συστηματικά τη μέγιστη ένταση μαγνητικής επαγωγής, ακολουθώντας πιστά την αναμενόμενη φυσική συμπεριφορά του πεδίου. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο περιγράφει σωστά τη χωρική δομή του μαγνητικού αποτυπώματος, ακόμη και υπό συνθήκες πειραματικής αβεβαιότητας. Η μορφολογική αυτή ταύτιση, σε συνδυασμό με τον αυτόματο μηχανισμό δυναμικής κλιμάκωσης, καθιστά το σύστημα ιδιαίτερα ανθεκτικό σε πειραματικές ατέλειες, σφάλματα εκτίμησης θέσης από το οπτικό υποσύστημα και περιβαλλοντικό μαγνητικό θόρυβο. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση δεν εξαρτάται από μεμονωμένες μετρήσεις έντασης, αλλά από τη συνολική χωρική συμπεριφορά του πεδίου. Η τελική ετυμηγορία του συστήματος, η οποία οδήγησε στην ενεργοποίηση της κατάστασης «DANGER», προέκυψε από τη συνδυαστική επίτευξη δύο ανεξάρτητων και συμπληρωματικών κριτηρίων: αφενός της δομικής συνέπειας της κατανομής, με Σχετικό Σφάλμα μικρότερο του 30%, και αφετέρου της ανίχνευσης ισχυρής μαγνητικής ανισοτροπίας, με τιμή m-diff μεγαλύτερη του 0.3. Η προσέγγιση αυτή αποδεικνύει ότι η μαγνητική υπογραφή ενός αντικειμένου, όταν αναλύεται μέσω του μέτρου της έντασης και της σχετικής χωρικής κατανομής, συνιστά ένα εξαιρετικά στιβαρό και αξιόπιστο εργαλείο για την αναγνώριση απειλών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

4.5 Χαρακτηρισμός Στόχου μέσω υπολογισμού της Μαγνητικής Ροπής

Ο χαρακτηρισμός του στόχου στο πλαίσιο της μεθοδολογίας υπερβαίνει αρκετά τα στενά όρια της απλής ανίχνευσης μεταλλικών αντικειμένων και μεταβαίνει στο επίπεδο της ευφυούς και ποιοτικής ταυτοποίησης απειλής. Αντί το σύστημα να βασίζεται αποκλειστικά στην ένταση του μαγνητικού πεδίου, υιοθετεί μια λογική ανάλυσης φυσικής συμπεριφοράς, επιτρέποντας τη διάκριση μεταξύ ακίνδυνων και δυνητικά επικίνδυνων σιδηρομαγνητικών στόχων. Η τελική απόφαση για την ενεργοποίηση της ένδειξης «DANGER» προκύπτει μέσα από τη συνδυαστική αξιολόγηση δύο ανεξάρτητων αλλά συμπληρωματικών παραμέτρων, οι οποίες εξετάζουν τόσο τη χωρική συνέπεια όσο και τη γεωμετρική φύση του αντικειμένου.

Το πρώτο σκέλος της απόφασης αφορά το Κριτήριο Συνέπειας (Consistency Threshold). Σύμφωνα με αυτό, η χωρική κατανομή της μαγνητικής υπογραφής του στόχου οφείλει να παραμένει συνεπής μεταξύ διαφορετικών πειραματικών θέσεων και χρονικών στιγμών. Η διατήρηση του Σχετικού Σφάλματος Κατανομής κάτω από το προκαθορισμένο όριο του 30% (ιδανικά κάτω του 10%) υποδηλώνει ότι το μαγνητικό πεδίο που καταγράφηκε στη Θέση 2 ακολουθεί το ίδιο μορφολογικό πρότυπο με εκείνο που αναλύθηκε στη Θέση 1. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι δύο μετρήσεις αντιστοιχούν στο ίδιο φυσικό αντικείμενο και όχι σε τυχαία ή παροδική μαγνητική ανωμαλία του περιβάλλοντος.

Το δεύτερο σκέλος της απόφασης βασίζεται στο Κριτήριο Ανισοτροπίας (Weapon Signature), το οποίο σχετίζεται άμεσα με τη γεωμετρική ασυμμετρία του στόχου. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η διαφορά του μέτρου της μαγνητικής ροπής μεταξύ διαφορετικών προσανατολισμών, δηλαδή η παράμετρος m-diff, πρέπει να υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, ενδεικτικά ίσο με 0.3. Η ιδιαίτερα υψηλή τιμή που καταγράφηκε στην παρούσα δοκιμή (m-diff = 3.47) λειτουργεί ως ένα χαρακτηριστικό «μαγνητικό δακτυλικό αποτύπωμα», το οποίο υποδεικνύει αντικείμενο με έντονη επιμήκη και ασύμμετρη γεωμετρία. Τέτοια συμπεριφορά είναι τυπική σιδηρομαγνητικών αντικειμένων που προσιδιάζουν σε οπλισμό, όπως μαχαίρια ή πυροβόλα όπλα. Η καινοτομία της συγκεκριμένης πολυπαραμετρικής προσέγγισης έγκειται στη σαφή διάκριση μεταξύ του «μαγνητικού μεγέθους» ενός αντικειμένου και της πραγματικής επικινδυνότητάς του. Ένα μεγάλο αλλά γεωμετρικά συμμετρικό μεταλλικό αντικείμενο, όπως για παράδειγμα ένα μεταλλικό κουτί ή ένα εργαλείο καθημερινής χρήσης, θα μπορούσε να εμφανίσει χαμηλό Σχετικό Σφάλμα Κατανομής λόγω σταθερής χωρικής συμπεριφοράς, αλλά ταυτόχρονα χαμηλή τιμή m-diff, οδηγώντας ορθά στην ένδειξη «SAFE». Αντίθετα, ο στόχος της παρούσας δοκιμής ικανοποίησε ταυτόχρονα και τα δύο κριτήρια, γεγονός που οδήγησε με συνέπεια και αξιοπιστία στην ενεργοποίηση της κατάστασης συναγερμού.

Συμπερασματικά, η ανάλυση της μαγνητικής ροπής σε συνδυασμό με τη δυναμική βαθμονόμηση και τη μορφολογική ανάλυση της κατανομής του πεδίου συγκροτεί ένα στιβαρό και ανθεκτικό πλαίσιο ανίχνευσης και ταυτοποίησης απειλής. Το προτεινόμενο σύστημα απέδειξε ότι είναι ικανό να αναγνωρίζει επικίνδυνους στόχους ακόμη και υπό συνθήκες πειραματικής αβεβαιότητας, σφαλμάτων εκτίμησης θέσης και περιβαλλοντικού θορύβου. Ως εκ τούτου, καθίσταται ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο, όπου η ακρίβεια, η αξιοπιστία και η ταχύτητα λήψης απόφασης αποτελούν κρίσιμες απαιτήσεις.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1]. C. Barmpatza, A. T. Baklezos, I. O. Vardiambasis and C. D. Nikolopoulos, "Estimation of the Magnetic Signature of Ferromagnetic Nanoparticles by Earth's Magnetic Field," in IEEE Access, vol. 11, pp. 14832-14840, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3244408.

[2]. Julie Accardo, M. Ahmad Chaudhry, Radiation exposure and privacy concerns surrounding full-body scanners in airports, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Volume 7, Issue 2, 2014, Pages 198-200, ISSN 1687-8507, https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.005. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687850714000168)

[3]. Automated Detection of Firearms and Knives in a CCTV Image by Michał Grega *,Andrzej Matiolański, Piotr Guzik and Mikołaj Leszczuk. https://doi.org/10.3390/s16010047

[4]. https://medium.com/@pacogarcia3/calculate-x-y-z-real-world-coordinates-from-image-coordinates-using-opencv-from-fdxlabs-0adf0ec37cef

[5]. https://medium.com/@staytechrich/human-head-detection-tutorial-for-people-counting-yolov8-vs-faster-r-cnn-633cf57534d8

[6]. https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/

[7]. https://yolov8.com/

[8]. https://viso.ai/deep-learning/yolov8-guide/

[9]. YASEEN, Muhammad. What is YOLOv9: An in-depth exploration of the internal features of the next-generation object detector. arXiv preprint arXiv:2409.07813, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.15857

[10]. DANILOWICZ, Michal; KRYJAK, Tomasz. Real-time multi-object tracking using YOLOv8 and SORT on a SoC FPGA. In: International Symposium on Applied Reconfigurable Computing. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. p. 214-230. https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.13023

[11]. Wang, Yingyun & Mariano, Vladimir. (2024). A Multi object Tracking Framework Based on YOLOv8s and Bytetrack Algorithm. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2024.3450370

[12]. Nowicki, Michał, and Roman Szewczyk. "Ferromagnetic objects magnetovision detection system." *Materials* 6.12 (2013): 5593-5601.

[13]. Nowicki, Michal, and Roman Szewczyk. "Modeling of Earth Magnetic Field Disturbances Induced by Ferromagnetic Objects." *Journal of mechanics engineering and automation* 5.7 (2015).

[14]. Wahlström, Niklas. *Modeling of magnetic fields and extended objects for localization applications*. Linkopings Universitet (Sweden), 2015.

[15]. Liu, Dunge, et al. "Direction identification of a moving ferromagnetic object by magnetic anomaly." *Sensors and Actuators A: Physical* 229 (2015): 147-153.

[16]. Tarnawski, Jaroslaw, et al. "Improving the quality of magnetic signature reproduction by increasing flexibility of multi-dipole model structure and enriching measurement information." *IEEE Access* 8 (2020): 190448-190462.

[17]. Li, Xinyu, et al. "Magnetic charge model for leakage signals from surface defects in ferromagnetic material." *Materials* 16.10 (2023): 3750.

[18]. Shanthi, P., and V. Manjula. "A systematic review on CNN-YOLO techniques for face and weapon detection in crime prevention." *Discover Computing* 28.1 (2025): 204.

[19]. Thakur, Ayush, et al. "Real-time weapon detection using YOLOv8 for enhanced safety." *arXiv preprint arXiv:2410.19862* (2024).

[20]. Dugyala, Raman, et al. "Weapon detection in surveillance videos using Yolov8 and Pelsf-DCNN." *E3S web of conferences*. Vol. 391. EDP Sciences, 2023.

[21]. Shanthi, P., and V. Manjula. "Weapon detection with FMR-CNN and YOLOv8 for enhanced crime prevention and security." *Sci. Rep* 15 (2025): 26766.

[22]. Siri, Dharmapuri, et al. "Automated Weapon Detection System in CCTV's Through Image Processing." *E3S Web of Conferences*. Vol. 430. EDP Sciences, 2023.

6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

1. Συνάρτηση calculate_magnetic_field (**Magnetic Field Calculation Function**) σε κώδικα Pyhton:

```
import math
import numpy as np

def calculate_magnetic_field(
    xm,
    ym,
    zm,
    m_x,
    m_y,
    m_z,
    x_source,
    y_source,
    z_source,
    mu_0=4 * math.pi * 1e-7,
):
    """
    Calculate the magnetic field components at sensor positions.

    Parameters
    ----------
    xm, ym, zm : array-like
        Coordinates of the sensor positions along the x, y, and z
axes.

    m_x, m_y, m_z : float
        Components of the magnetic dipole moment vector.

    x_source, y_source, z_source : float
        Coordinates of the magnetic source.

    mu_0 : float, optional
        Magnetic permeability of free space [H/m].
        Default value: 4π × 10^-7.

    Returns
    -------
    Bx, By, Bz : numpy.ndarray
        Magnetic field components at each sensor position.
    """
```

```
    # Number of sensor positions
    N = len(xm)

    # Initialize arrays for magnetic field components
    Bx = np.zeros(N)
    By = np.zeros(N)
    Bz = np.zeros(N)

    # Constant factor μ0 / (4π)
    mu_factor = mu_0 / (4 * math.pi)

    for i in range(N):

        # Relative position vector from source to sensor
        dx = xm[i] - x_source
        dy = ym[i] - y_source
        dz = zm[i] - z_source

        # Distance between source and sensor
        r = math.sqrt(dx**2 + dy**2 + dz**2)

        # Avoid division by zero when the sensor coincides with
the source
        if r < 1e-10:
            continue

        r3 = r**3
        r5 = r**5

        # Dot product m · r
        c = m_x * dx + m_y * dy + m_z * dz

        # Magnetic field components
        Bx[i] = mu_factor * ((3 * dx * c) / r5 - (m_x / r3))
        By[i] = mu_factor * ((3 * dy * c) / r5 - (m_y / r3))
        Bz[i] = mu_factor * ((3 * dz * c) / r5 - (m_z / r3))

    return Bx, By, Bz
```

Η συγκεκριμένη υλοποίηση έχει βασιστεί στην αναλυτική έκφραση του πεδίου του μαγνητικού διπόλου :

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3r(m \cdot r)}{r^5} - \frac{m}{r^3}\right]$$

όπου:

- $\mathbf{m}$ είναι το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής,
- $\mathbf{r}$ είναι το διάνυσμα θέσης από την πηγή στη θέση των αισθητήρων (μαγνητομέτρων),
- $r = |\mathbf{r}|$ είναι η Ευκλείδεια απόσταση,
- μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

2. Συνάρτηση solve_magnetic_moment (Magnetic Dipole Moment Estimation Function) σε κώδικα Pyhton:

```
import math
import numpy as np


def solve_magnetic_moment(
    xm,
    ym,
    zm,
    Bx,
    By,
    Bz,
    x_source,
    y_source,
    z_source,
):
    """
    Estimate the magnetic dipole moment vector from measured magnetic field data.

    Parameters
    ----------
    xm, ym, zm : array-like
        Coordinates of the sensor positions along the x, y, and z axes.

    Bx, By, Bz : array-like
        Measured magnetic field components at each sensor position.

    x_source, y_source, z_source : float
        Coordinates of the magnetic source.

    Returns
    -------
    m_solution : numpy.ndarray
        Estimated magnetic dipole moment vector [m_x, m_y, m_z].
    """

    # Number of sensor positions
    N = len(xm)

    # Initialize system matrix and magnetic field vector
```

```
    A = np.zeros((3 * N, 3))
    B_vec = np.zeros(3 * N)

    for i in range(N):

        # Relative position vector from source to sensor
        dx = xm[i] - x_source
        dy = ym[i] - y_source
        dz = zm[i] - z_source

        # Distance between source and sensor
        r = math.sqrt(dx**2 + dy**2 + dz**2)

        # Avoid division by zero when the sensor coincides with
the source
        if r < 1e-10:
            continue

        r5 = r**5

        # Populate the system matrix
        A[3 * i] = [
            (3 * dx**2 - r**2) / r5,
            (3 * dx * dy) / r5,
            (3 * dx * dz) / r5,
        ]

        A[3 * i + 1] = [
            (3 * dy * dx) / r5,
            (3 * dy**2 - r**2) / r5,
            (3 * dy * dz) / r5,
        ]

        A[3 * i + 2] = [
            (3 * dz * dx) / r5,
            (3 * dz * dy) / r5,
            (3 * dz**2 - r**2) / r5,
        ]

        # Populate the magnetic field measurement vector
        B_vec[3 * i] = Bx[i]
        B_vec[3 * i + 1] = By[i]
        B_vec[3 * i + 2] = Bz[i]

    # Magnetic permeability of free space
    mu_0 = 4 * math.pi * 1e-7
```

```
    # Constant factor μ0 / (4π)
    mu_factor = mu_0 / (4 * math.pi)

    # Solve the overdetermined linear system using least squares
    m_solution, residuals, rank, singular_values = np.linalg.lstsq(
        A,
        B_vec / mu_factor,
        rcond=None,
    )

    return m_solution
```

Ο συγκεκριμένος φορμαλισμός έχει βασιστεί στο πεδίο του μαγνητικού διπόλου σε μορφή πινάκων:

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{m}$$

όπου:

* $\mathbf{B}$ είναι το διάνυσμα ου περιέχει της μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου από όλους τους αισθητήρες,
* $\mathbf{A}$ είναι ο πίνακας του συστήματος που περιέχει τις θέσεις των αισθητήρων,
* $\mathbf{m}$ είναι το άγνωστο διάνυσμα της μαγνητικής ροπής,
* μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Αφού το σύστημα είναι γενικά υπερκαθορισμένο, το διάνυσμα της διπολικής ροπής εκτιμάται μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος ελαχίστων τετραγώνων:

$$\min_{m} \left\| \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{m} - \frac{4\pi}{\mu_0}\boldsymbol{B} \right\|^2$$

Η προσέγγιση αυτή παρέχει μια αξιόπιστη εκτίμηση της μαγνητικής διπολικής ροπής ακόμη και παρουσία θορύβου στις μετρήσεις.

3. Συνάρτηση calibrate_camera (Camera Calibration and Distance Estimation Functions) σε κώδικα Pyhton:

```
def calibrate_camera(person_height_px, known_distance):
    """
    Calculate the focal length of the camera using a reference
measurement.

    Parameters
    ----------
    person_height_px : float
        Apparent height of the person in the image, expressed in
pixels.

    known_distance : float
        Known distance between the camera and the person [m].

    Returns
    -------
    float
        Estimated focal length of the camera.
    """

    return (person_height_px * known_distance) /
REAL_PERSON_HEIGHT



def estimate_distance(person_height_px, focal_length):
    """
    Estimate the distance between the camera and a detected person.

    Parameters
    ----------
    person_height_px : float
        Apparent height of the detected person in the image,
expressed in pixels.

    focal_length : float
        Previously estimated focal length of the camera.

    Returns
    -------
    float or None
```

```
        Estimated distance between the camera and the person [m].
        Returns None when the detected person is too small in the
image.
    """

    # Ignore detections that are too small to provide reliable
estimates
    if person_height_px < 50:
        return None

    # Estimate distance based on the pinhole camera model
    distance = (REAL_PERSON_HEIGHT * focal_length) /
person_height_px

    # Restrict the result to a reasonable operating range
    return max(0.3, min(10, distance))
```

Η διαδικασία βαθμονόμησης της κάμερας βασίζεται στο μοντέλο κάμερας οπής (pinhole camera model). Η εστιακή απόσταση εκτιμάται χρησιμοποιώντας ένα αντικείμενο αναφοράς γνωστού ύψους, τοποθετημένο σε γνωστή απόσταση από την κάμερα:

$$f = \frac{h_{px} \cdot D}{H}$$

όπου:

- f είναι η εστιακή απόσταση,,
- h_{px} είναι το παρατηρούμενο ύψος του ατόμου σε pixels
- D είναι η γνωστή απόσταση μεταξύ της κάμερας και του ατόμου,
- H είναι το πραγματικό ύψος του ατόμου.

Αφού προσδιοριστεί η εστιακή απόσταση, η απόσταση ενός ανιχνευμένου ατόμου μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$D = \frac{H \cdot f}{h_{px}}$$

όπου:

- D είναι η εκτιμώμενη απόσταση,
- H είναι το πραγματικό ύψος του ατόμου,
- f είναι η εστιακή απόσταση,
- h_{px} είναι το παρατηρούμενο ύψος του ατόμου σε pixels.

Εφαρμόζεται ένα ελάχιστο κατώφλι 50 pixels, ώστε να αποφεύγονται αναξιόπιστες εκτιμήσεις για πολύ μικρές ανιχνεύσεις. Επιπλέον, η εκτιμώμενη απόσταση περιορίζεται στο εύρος από 0.3 m έως 10 m, ώστε να εξασφαλίζονται φυσικά ρεαλιστικές τιμές.