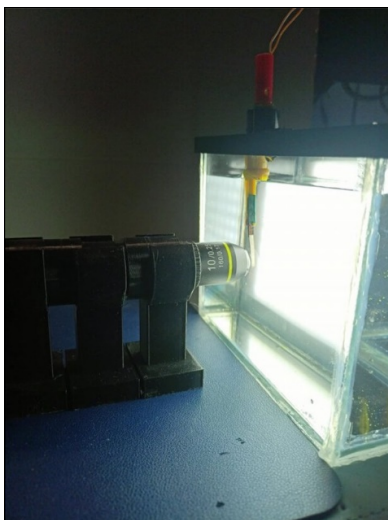


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάπτυξη οπτικού μικροσκοπικού
συστήματος μέτρησης»



Του φοιτητή
Δημήτριου Μηνά
Αρ. Μητρώου: 2021089

Επιβλέπων
Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης
Επικ. Καθηγητής

Ιούνιος 2026

Τίτλος Δ.Ε. : Μελέτη και ανάπτυξη οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης

Κωδικός Δ.Ε. : **26227**

Ονοματεπώνυμο φοιτητή : Δημήτριος Μηνάς

Ονοματεπώνυμο εισηγητή : Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. : 26-03-2026

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. : 31-05-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Δημήτριου Μηνά που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στον πατέρα μου, που υπήρξε η αφορμή να ξεκινήσει αυτή η διαδρομή

και

στη μητέρα μου, που με στήριξε μέχρι την ολοκλήρωσή της»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη και ανάπτυξη ενός οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης, με στόχο την εξαγωγή ποσοτικής πληροφορίας από μικροσκοπικές εικόνες. Η κύρια πειραματική εφαρμογή επικεντρώνεται στη μέτρηση μικρομετατοπίσεων ενεργοποιητή Ιοντικού Πολυμερικού Μεταλλικού Σύνθετου Υλικού (Ionic Polymer Metal Composite - IPMC) σε υδάτινο περιβάλλον. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε διάταξη που συνδυάζει σωληνωτό μικροσκόπιο, αντικειμενικό φακό 10×, ψηφιακή κάμερα, γυάλινη δεξαμενή, ομοιόμορφο οπίσθιο φωτισμό και ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης και απόκτησης δεδομένων. Η επεξεργασία εικόνας βασίστηκε σε προεπεξεργασία των καρέ, δημιουργία δυαδικής μάσκας, ανίχνευση ακμών Canny, εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων Harris, γεωμετρικό περιορισμό σταθερού μήκους και προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα. Μέσω της διαδικασίας αυτής εντοπίζεται το ελεύθερο άκρο του IPMC σε διαδοχικά καρέ και εξάγεται χρονοσειρά μετατόπισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν χωρική δειγματοληψία της τάξης του υπομικρομέτρου, περιορισμένη παραμόρφωση φακού, χαμηλό χρόνο επεξεργασίας και δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο για χαμηλές συχνότητες διέγερσης. Επιπλέον, η εργασία παρουσιάζει την υλοποιημένη επέκταση της μικροσκοπικής διάταξης σε σύστημα μέτρησης και οπτικής παρακολούθησης αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Η επέκταση περιλαμβάνει θάλαμο συλλογής, χοάνη, ανεμιστήρα, κολλητική ταινία συλλογής, μηχανισμό μετακίνησης ταινίας και μικροσκόπιου, καθώς και σύστημα ελέγχου βασισμένο σε Raspberry Pi, μικροελεγκτή ESP32-S3 και οδηγούς βηματικών κινητήρων TMC2225. Τα μικροσωματίδια συλλέγονται σε χρονικά παράθυρα δειγματοληψίας και στη συνέχεια η ταινία σαρώνεται μικροσκοπικά για λήψη εικόνων και οπτική αναγνώριση. Με τον τρόπο αυτό, η ίδια αρχιτεκτονική αξιοποιείται τόσο για μέτρηση μετατόπισης όσο και για ανάλυση μικροσκοπικών δειγμάτων. Η εργασία αναδεικνύει τη σημασία του συνδυασμού οπτικής απεικόνισης, ηλεκτρονικού ελέγχου, μηχανικής κίνησης και αλγοριθμικής επεξεργασίας σε ένα ενιαίο σύστημα. Συμπερασματικά, δείχνει ότι ένα χαμηλού κόστους οπτικό μικροσκοπικό σύστημα μπορεί να αποτελέσει ευέλικτη πλατφόρμα μέτρησης, παρακολούθησης και ανάλυσης μικροσκοπικών φαινομένων, με δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικές εφαρμογές. Η προσέγγιση αυτή υποστηρίζει τη δημιουργία αναπαραγωγίμων εργαστηριακών διατάξεων και ενισχύει τη σύνδεση της μικροσκοπικής μέτρησης με συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης και αυτοματοποιημένης ανάλυσης εικόνας.

«Study and Development of an Optical Microscopic Measurement System»

«Dimitrios Minas»

Abstract

This diploma thesis concerns the study and development of an optical microscopic measurement system aimed at extracting quantitative information from microscopic images. The main experimental application focuses on the measurement of micro-displacements of an Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) actuator operating in an aqueous environment. For this purpose, a system was developed combining a tubular microscope, a 10× objective lens, a digital camera, a glass tank, uniform backlighting, and an electronic driving and data acquisition circuit. Image processing was based on frame preprocessing, binary mask generation, Canny edge detection, Harris feature point detection, a constant-length geometric constraint, and grid-based adaptive search. Through this procedure, the free tip of the IPMC is detected in successive frames, allowing the extraction of a displacement time series. The results showed submicrometer-level spatial sampling, limited lens distortion, low processing time, and real-time monitoring capability for low-frequency actuation. In addition, the thesis presents the implemented extension of the microscopic setup into a system for the measurement and optical monitoring of airborne microparticles. This extension includes a collection chamber, funnel, fan, adhesive collection tape, tape and microscope motion mechanisms, as well as a control system based on a Raspberry Pi, an ESP32-S3 microcontroller, and TMC2225 stepper motor drivers. The microparticles are collected during defined sampling time windows, after which the tape is microscopically scanned for image acquisition and optical recognition. In this way, the same architecture is used both for displacement measurement and for the analysis of microscopic samples. The work highlights the importance of combining optical imaging, electronic control, mechanical motion, and algorithmic processing within a unified system. Overall, it demonstrates that a low-cost optical microscopic system can serve as a flexible platform for the measurement, monitoring, and analysis of microscopic phenomena, with the potential to be adapted to different applications. This approach supports the development of reproducible laboratory setups and strengthens the connection between microscopic measurement, environmental monitoring systems, and automated image analysis.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κυριάκο Τσιακμάκη, για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την ουσιαστική υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε ιδιαίτερα σημαντική τόσο σε επιστημονικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, καθώς με βοήθησε να οργανώσω την εργασία, να αντιμετωπίσω τεχνικές δυσκολίες και να εξελίξω την ερευνητική μου σκέψη.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρουσία τους υπήρξε σημαντική σε όλη αυτή την πορεία και συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων για τη γνώση, την υποστήριξη και τα εφόδια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την ακαδημαϊκή και προσωπική μου εξέλιξη.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2ο: Υλικά και Μέθοδοι.....	7
2.1 Πειραματική διάταξη του οπτικού μικροσκοπικού συστήματος.....	7
2.2 Ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης και απόκτησης δεδομένων	10
2.3 Κύκλωμα προστασίας και ανίχνευσης σφαλμάτων.....	15
2.3.1 Ανίχνευση υπέρτασης και υπότασης.....	15
2.3.2 Παρακολούθηση εξόδου της βαθμίδας push-pull μέσω ADC	17
2.3.3 Ανίχνευση ανοικτού κυκλώματος	17
2.3.4 Ανίχνευση βραχυκυκλώματος.....	18
2.4 Απόκτηση εικόνας και αλγόριθμος παρακολούθησης άκρου	18
2.4.1 Απόκτηση εικόνας και προεπεξεργασία.....	19
2.4.2 Ανίχνευση ακμών και χαρακτηριστικών σημείων	22
2.4.3 Γεωμετρικός περιορισμός σταθερού μήκους	24
2.4.4 Προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα.....	26
2.4.5 Εξαγωγή χρονοσειράς μετατόπισης	28
Κεφάλαιο 3ο: Πειραματική Αξιολόγηση του Οπτικού Μικροσκοπικού Συστήματος.....	29
3.1 Χωρική ανάλυση του συστήματος	29
3.2 Παραμόρφωση φακού και σταθερότητα μεγέθυνσης.....	30
3.3 Χρόνος επεξεργασίας και δυνατότητα πραγματικού χρόνου	31
3.4 Ακρίβεια εντοπισμού του άκρου	32
3.5 Αξιολόγηση κυκλώματος προστασίας	34
3.6 Περιορισμοί της προτεινόμενης διάταξης.....	35
Κεφάλαιο 4ο: Μικροσκοπικό Σύστημα για Μέτρηση Αερομεταφερόμενων Μικροσωματιδίων	37
4.1 Σκοπός και βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος.....	37
4.2 Μικροελεγκτικό υποσύστημα ελέγχου κίνησης.....	39

4.3	Θάλαμος συλλογής και κολλητική επιφάνεια δειγματοληψίας.....	43
4.4	Μηχανισμός μετακίνησης ταινίας και μικροσκοπίου.....	45
4.5	Διαδικασία μικροσκοπικής σάρωσης και λήψης εικόνων.....	48
4.6	Οπτική αναγνώριση, διακρίβωση και επεξεργασία δεδομένων	50
4.7	Σύνδεση με τη φιλοσοφία κόμβου αισθητήρων και επεξεργασίας πραγματικού χρόνου	52
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα.....		55
5.1	Κύρια συμπεράσματα.....	55
5.2	Τεχνική συμβολή της εργασίας	57
5.3	Προοπτικές αξιοποίησης	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας παραγωγής σήματος και απόκτησης μετρήσεων μέσω ADC.....		65
A.1	Περιγραφή λειτουργίας του κώδικα	65
A.2	Ανάλυση βασικών τμημάτων του κώδικα.....	65
A.3	Πλήρης κώδικας παραγωγής σήματος και απόκτησης μετρήσεων	66

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Εικόνα πειραματικής διάταξης.	8
Σχήμα 2.2: Εικόνα διάταξης μικροσκοπίου.	9
Σχήμα 2.3: Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος μέτρησης.	11
Σχήμα 2.4: Κύκλωμα Οδήγησης IPMC.	12
Σχήμα 2.5: Κύκλωμα ελέγχου ADC που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή σήματος. Πανομοιότυπο κύκλωμα χρησιμοποιείται για τα κανάλια ADC CH0 και CH1.	14
Σχήμα 2.6: Κύκλωμα ανίχνευσης υπέρτασης με χρήση συγκριτών LM393 και τάσης αναφοράς TL431 για την επιτήρηση της εξόδου του LM7805.	16
Σχήμα 2.7: Κύκλωμα ανίχνευσης υπότασης με χρήση συγκριτών LM393 και τάσης αναφοράς TL431 για την επιτήρηση της εξόδου του LM7805.	16
Σχήμα 2.8: Αντιπροσωπευτική λήψη του βασισμένου σε Nafion και επικαλυμμένου με πλατίνα δείγματος IPMC μέσω του μικροσκοπικού συστήματος απεικόνισης, όπου διακρίνονται καθαρά η γεωμετρία του ενεργοποιητή, η βάση πάκτωσης και το ελεύθερο κάτω άκρο.	19
Σχήμα 2.9: Ενδεικτική απεικόνιση του αλγορίθμου πρόβλεψης βάσει πλέγματος και ανίχνευσης ακμών για το άκρο του IPMC. Η εικόνα παρουσιάζει τη διαίρεση της περιοχής ενδιαφέροντος σε πλέγμα, την εκτιμώμενη θέση του άκρου, καθώς και τα υποψήφια κελιά αναζήτησης που ορίζονται από τον αλγόριθμο για το επόμενο καρέ.	19
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του συστήματος συλλογής, σάρωσης και αναγνώρισης μικροσωματιδίων.	38
Σχήμα 4.2: Συνολική διάταξη του μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων.	39
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής ελέγχου των αξόνων κίνησης.	40
Σχήμα 4.4: Ηλεκτρονικό σχηματικό του μικροελεγκτικού υποσυστήματος βασισμένου σε ESP32-S3.	42
Σχήμα 4.5: Σχεδίαση πλακέτας PCB του μικροελεγκτικού υποσυστήματος.	42
Σχήμα 4.6: Υλοποιημένη πλακέτα ESP32-S3 για το μικροελεγκτικό υποσύστημα ελέγχου κίνησης.	43
Σχήμα 4.7: Διάταξη εστίασης και λήψης μικροσκοπικών εικόνων πάνω στην κολλητική ταινία συλλογής.	45
Σχήμα 4.8: Αξονες κίνησης του συστήματος για εστίαση, κατακόρυφη σάρωση και μετακίνηση της ταινίας.	48
Σχήμα 4.9: Διάταξη εστίασης και λήψης μικροσκοπικών εικόνων πάνω στην κολλητική ταινία συλλογής.	50

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βασικά εξαρτήματα της οπτικής μικροσκοπικής διάταξης.	10
Πίνακας 3.1: Παράμετροι απεικόνισης και χωρική δειγματοληψία του μικροσκοπικού συστήματος.	30

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η ακριβής μέτρηση μικρών μετατοπίσεων και μικροσκοπικών φαινομένων αποτελεί βασική ανάγκη σε πολλούς τομείς της σύγχρονης μηχανικής, όπως τα ευφυή υλικά, η μικρορομποτική, οι βιοϊατρικές διατάξεις, οι αισθητήρες και τα αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης. Σε εφαρμογές όπου οι μεταβολές της θέσης, της μορφής ή της γεωμετρίας ενός δείγματος πραγματοποιούνται σε μικρομετρική ή ακόμη και υπομικρομετρική κλίμακα, οι συμβατικές μέθοδοι παρατήρησης και μέτρησης δεν είναι πάντοτε επαρκείς. Για τον λόγο αυτό, τα οπτικά μικροσκοπικά συστήματα μέτρησης αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπουν την απευθείας απεικόνιση του υπό μελέτη αντικειμένου και την εξαγωγή ποσοτικών πληροφοριών μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης και επεξεργασίας εικόνας.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη ψηφιακών καμερών υψηλής ανάλυσης και η ευρεία χρήση αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας έχουν ενισχύσει σημαντικά τον ρόλο των οπτικών μεθόδων στη μετρολογία μικρής κλίμακας. Σε αντίθεση με αρκετές συμβατικές τεχνικές, οι οπτικές μέθοδοι μπορούν να παρέχουν πληροφορία χωρίς άμεση μηχανική επαφή με το δείγμα, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν το υπό μελέτη αντικείμενο είναι μαλακό, εύκαμπτο, μικρού μεγέθους ή ευαίσθητο σε εξωτερικές παρεμβολές. Επιπλέον, η δυνατότητα καταγραφής διαδοχικών εικόνων επιτρέπει όχι μόνο τη στατική παρατήρηση ενός φαινομένου, αλλά και τη μελέτη της χρονικής του εξέλιξης. Έτσι, ένα κατάλληλα βαθμονομημένο οπτικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο μέτρησης, παρακολούθησης και ανάλυσης δυναμικών φαινομένων.

Η χρήση μικροσκοπικής απεικόνισης σε συστήματα μέτρησης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς μηχανική επαφή με το δείγμα, αποφεύγοντας έτσι την αλλοίωση της φυσικής του κίνησης ή παραμόρφωσης. Παράλληλα, η σύνδεση μικροσκοπίου με ψηφιακή κάμερα επιτρέπει την καταγραφή διαδοχικών εικόνων ή βίντεο, από τα οποία μπορούν να εξαχθούν χρονοσειρές μετατόπισης, ταχύτητας ή άλλων χαρακτηριστικών. Ωστόσο, η αξιοπιστία μιας τέτοιας μεθόδου εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως η σταθερότητα της οπτικής διάταξης, η ποιότητα του φωτισμού, η χωρική ανάλυση ή χωρική δειγματοληψία (spatial resolution / spatial sampling), η βαθμονόμηση μετατροπής εικονοστοιχείων σε πραγματικές διαστάσεις (pixel-to-length calibration), το πεδίο θέασης (field of view - FOV), η παραμόρφωση του φακού (lens distortion) και η ακρίβεια των αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας.

Στην περίπτωση της μικροσκοπικής απεικόνισης, η έννοια της μέτρησης βασίζεται στη μετατροπή της εικόνας από ποιοτική οπτική πληροφορία σε ποσοτικό δεδομένο. Η κάμερα καταγράφει το αντικείμενο σε εικονοστοιχεία (pixels), όμως μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης μετατροπής εικονοστοιχείων σε πραγματικές διαστάσεις (pixel-to-length calibration) είναι δυνατόν να υπολογιστούν πραγματικές αποστάσεις, μετατοπίσεις και γεωμετρικές μεταβολές. Με αυτόν τον τρόπο,

η μικροσκοπική εικόνα δεν χρησιμοποιείται μόνο για παρατήρηση, αλλά μετατρέπεται σε μετρητικό σήμα. Η ακρίβεια αυτής της διαδικασίας εξαρτάται τόσο από την ποιότητα της οπτικής διάταξης όσο και από την αξιοπιστία του αλγορίθμου που εντοπίζει το σημείο ή την περιοχή ενδιαφέροντος.

Ένα χαρακτηριστικό πεδίο εφαρμογής τέτοιων μεθόδων είναι η μέτρηση της μετατόπισης ενεργοποιητών Ιοντικών Πολυμερικών Μεταλλικών Σύνθετων Υλικών (Ionic Polymer Metal Composites IPMCs). Τα IPMCs ανήκουν στην κατηγορία των μαλακών ηλεκτροενεργών πολυμερών (soft electroactive polymers) και παρουσιάζουν κάμψη όταν διεγείρονται με χαμηλή ηλεκτρική τάση, λόγω της μετακίνησης ενυδατωμένων κατιόντων στο εσωτερικό της ιοντικής τους μήτρας [1], [2]. Η ιδιαίτερη αυτή συμπεριφορά κάμψης συχνά παρομοιάζεται με τη λειτουργία βιολογικών μυών, καθώς η μηχανική παραμόρφωση προκύπτει από τη συνδυασμένη δράση κινητών ιόντων, διόγκωσης του υλικού και επιφανειακών ηλεκτροδίων [3],[4]. Λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, της υψηλής ευκαμψίας και της συμβατότητάς τους με υγρά περιβάλλοντα, τα IPMCs έχουν μελετηθεί εκτενώς σε εφαρμογές μαλακής ρομποτικής (soft robotics), βιομιμητικών ενεργοποιητών (biomimetic actuators), βιοϊατρικών διατάξεων και υποβρύχιων συστημάτων αισθητήρων [5]-[9].

Η κατανόηση και η βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς ενεργοποίησης των IPMCs απαιτεί ακριβείς και αξιόπιστες τεχνικές μέτρησης της μετατόπισής τους. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμη πιο έντονη όταν τα δείγματα λειτουργούν μέσα σε υδατικό περιβάλλον, όπου η παρουσία νερού, η διάθλαση, οι πιθανές μικροφυσαλίδες, οι ηλεκτρικές παρεμβολές και οι μηχανικές διαταραχές μπορούν να δυσκολέψουν σημαντικά τη διαδικασία μέτρησης. Επομένως, η ανάπτυξη ενός οπτικού μικροσκοπικού συστήματος που μπορεί να καταγράφει με ακρίβεια την κίνηση του IPMC, χωρίς επαφή και με δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (real-time monitoring), αποτελεί σημαντικό τεχνικό και ερευνητικό αντικείμενο [10], [11].

Οι τεχνικές που βασίζονται σε λέιζερ, και κυρίως η Δονησιομέτρηση Doppler με Λέιζερ (*Laser Doppler Vibrometry - LDV*), θεωρούνται από τις πιο ακριβείς μεθόδους μέτρησης μετατόπισης σε ευφυή υλικά και μικροενεργοποιητές. Τα σύγχρονα συστήματα LDV μπορούν να επιτύχουν υπομικρομετρική ανάλυση και να καταγράψουν δονήσεις ή μετατοπίσεις υψηλής συχνότητας σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα για τον χαρακτηρισμό της δυναμικής απόκρισης ενεργοποιητών IPMC [12], [13]. Η βασική αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στη μεταβολή Doppler της ανακλώμενης ή οπισθοσκεδαζόμενης δέσμης λέιζερ, από την οποία υπολογίζεται η ταχύτητα και στη συνέχεια η μετατόπιση του υπό μελέτη αντικειμένου. Με αυτόν τον τρόπο, η μέτρηση πραγματοποιείται χωρίς φυσική επαφή και με υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, η χρήση τέτοιων συστημάτων σε υδατικό περιβάλλον παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, καθώς η διάθλαση στα όρια διαφορετικών μέσων, η σκέδαση από μικροσωματίδια ή μικροφυσαλίδες και οι αυστηρές απαιτήσεις ευθυγράμμισης μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ακρίβεια της μέτρησης [14]. Επιπλέον, τα συστήματα LDV είναι συνήθως ακριβά, ογκώδη και απαιτούν σταθερές εργαστηριακές συνθήκες, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε μικρές ή χαμηλού κόστους πειραματικές διατάξεις [15].

Μια άλλη διαδεδομένη κατηγορία τεχνικών είναι οι χωρητικοί αισθητήρες μετατόπισης (*capacitive displacement sensors*). Οι αισθητήρες αυτοί εκτιμούν τη μετατόπιση μέσω των μεταβολών της χωρητικότητας που προκαλούνται από την αλλαγή της απόστασης μεταξύ αγώγιμων επιφανειών. Σε καλά ελεγχόμενες συνθήκες, με κατάλληλη γείωση, θωράκιση και θερμική σταθερότητα, μπορούν να επιτύχουν υψηλή ευαισθησία και υπομικρομετρική ακρίβεια [16]. Το μικρό τους μέγεθος, η γρήγορη απόκριση και το σχετικά μέτριο κόστος τους έχουν οδηγήσει στη χρήση τους σε εφαρμογές μικροενεργοποιητών και αισθητήρων εγγύτητας [17]. Παρ' όλα αυτά, η λειτουργία τους σε υγρά ή βυθισμένα περιβάλλοντα είναι προβληματική, καθώς η υγρασία και το νερό μπορούν να προκαλέσουν διαρροές, ηλεκτρικές παρεμβολές και αστάθεια στο σήμα [18]. Επιπλέον, επειδή η γεωμετρία τους απαιτεί συνήθως επαφή ή πολύ μικρή απόσταση από το δείγμα, υπάρχει κίνδυνος να επηρεαστεί η φυσική κίνηση ενός μαλακού ενεργοποιητή, όπως το IPMC [19].

Για την αποφυγή ηλεκτρικών παρεμβολών έχουν προταθεί επίσης αισθητήρες μετατόπισης οπτικών ινών (*fiber-optic displacement sensors*). Οι αισθητήρες αυτοί μετατρέπουν τη μετατόπιση σε μεταβολές της οπτικής έντασης, της φάσης ή των κροσσών συμβολής μέσα στην οπτική ίνα [20], [21]. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η υψηλή ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (*electromagnetic interference - EMI*) και η δυνατότητα λειτουργίας σε περιβάλλοντα όπου η υγρασία, ο ηλεκτρικός θόρυβος ή οι περιορισμοί χώρου καθιστούν δύσκολη τη χρήση συμβατικών αισθητήρων [22]-[24]. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, οι διατάξεις οπτικών ινών απαιτούν προσεκτική ευθυγράμμιση, εξειδικευμένα οπτικά εξαρτήματα και συχνά ακριβό εξοπλισμό ανάγνωσης. Επιπλέον, μηχανικές μεταβολές ή θερμική ολίσθηση μπορούν να επηρεάσουν τη βαθμονόμηση κατά τη διάρκεια μακροχρόνιων πειραμάτων.

Οι υπερηχητικές και ακουστικές τεχνικές (*ultrasonic and acoustic techniques*) αποτελούν μια ακόμη εναλλακτική λύση, κυρίως σε περιπτώσεις όπου η οπτική επαφή με το δείγμα είναι περιορισμένη. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην ανάλυση ανακλάσεων ή μεταδόσεων ακουστικών κυμάτων, ώστε να υπολογιστούν μεταβολές χρόνου πτήσης (*time-of-flight*), φάσης ή συχνότητας [25], [26]. Η λειτουργία τους σε υποβρύχιο περιβάλλον είναι σε αρκετές περιπτώσεις πλεονεκτική, επειδή τα ακουστικά κύματα επηρεάζονται λιγότερο από οπτικές παραμορφώσεις. Ωστόσο, η χωρική τους ανάλυση είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή των οπτικών τεχνικών, γεγονός που δυσκολεύει την ανίχνευση πολύ μικρών, μικρομετρικών ή υπομικρομετρικών μετατοπίσεων. Για τον λόγο αυτό, οι ακουστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνότερα συμπληρωματικά και όχι ως κύρια τεχνική για τη λεπτομερή μέτρηση της κίνησης IPMC.

Αντίστοιχα, λύσεις που βασίζονται σε μαγνητικό πεδίο, όπως οι αισθητήρες Hall (*Hall-effect sensors*) και τα επίπεδα μαγνητικά πλέγματα (*planar magnetic grids*), έχουν χρησιμοποιηθεί για μέτρηση μετατόπισης σε μηχανικές διατάξεις και συστήματα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας [27]-[30]. Οι μέθοδοι αυτές είναι ανθεκτικές, σχετικά εύκολες στην ενσωμάτωση και λιγότερο ευαίσθητες σε μικρά σφάλματα ευθυγράμμισης. Παρ' όλα αυτά, η ακρίβεια και η ανάλυσή τους δεν είναι συνήθως επαρκείς για την αξιόπιστη μέτρηση πολύ μικρών παραμορφώσεων, όπως αυτές που εμφανίζονται σε

ενεργοποιητές IPMC. Έτσι, είναι περισσότερο κατάλληλες για πιο αδρές κινηματικές μετρήσεις ή για εφαρμογές δομικής βαθμονόμησης.

Τέλος, η Ψηφιακή Συσχέτιση Εικόνας (*Digital Image Correlation - DIC*) αποτελεί μια ισχυρή οπτική τεχνική πλήρους πεδίου (*full-field technique*), η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση της παραμόρφωσης ενός επιφανειακού μοτίβου μεταξύ διαδοχικών εικόνων. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν να εξαχθούν πεδία μετατόπισης και παραμόρφωσης με υψηλή χωρική πληροφορία [31]-[33]. Η DIC είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε σύνθετες γεωμετρίες και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ανάλυση ολόκληρης της επιφάνειας του δείγματος και όχι μόνο ενός σημείου. Ωστόσο, η εφαρμογή της σε υποβρύχια IPMC παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις, καθώς χρειάζεται σταθερό και υψηλής αντίθεσης επιφανειακό μοτίβο, ομοιόμορφος φωτισμός, κάμερα υψηλής ανάλυσης και διόρθωση των φαινομένων διάθλασης στα όρια αέρα, γυαλιού και νερού. Αυτές οι απαιτήσεις αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος της διάταξης, περιορίζοντας την πρακτική εφαρμογή της σε συμπαγή ή χαμηλού κόστους πειραματικά συστήματα.

Συνολικά, οι παραπάνω τεχνικές αναδεικνύουν έναν κοινό συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας, κόστους, πολυπλοκότητας και καταλληλότητας για απαιτητικά περιβάλλοντα. Η Δονησιομέτρηση Doppler με Λέιζερ (*Laser Doppler Vibrometry - LDV*) παρέχει πολύ υψηλή ακρίβεια, όμως επηρεάζεται από φαινόμενα διάθλασης, σκέδασης και ευθυγράμμισης σε υδάτινο περιβάλλον, ενώ παράλληλα απαιτεί ακριβό και εξειδικευμένο εξοπλισμό [12]-[15]. Οι χωρητικοί αισθητήρες μπορούν να αποδώσουν πολύ καλά σε ξηρές και ελεγχόμενες συνθήκες, όμως η παρουσία υγρασίας ή νερού δημιουργεί προβλήματα ηλεκτρικής αστάθειας και πιθανής αλληλεπίδρασης με το ίδιο το δείγμα [16]-[18]. Οι αισθητήρες οπτικών ινών παρουσιάζουν υψηλή ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, αλλά συχνά απαιτούν σύνθετη ευθυγράμμιση, εξειδικευμένους αναλυτές και αυξημένο κόστος [20]-[23]. Οι υπερηχητικές και ακουστικές τεχνικές είναι κατάλληλες για ορισμένες υποβρύχιες εφαρμογές, αλλά η χωρική τους ανάλυση δεν είναι πάντοτε επαρκής για την καταγραφή πολύ μικρών μετατοπίσεων [25], [26]. Αντίστοιχα, οι μαγνητικές μέθοδοι είναι χρήσιμες για πιο αδρές κινηματικές μετρήσεις, αλλά δεν αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή για μικρομετατοπίσεις υψηλής ακρίβειας [27]-[30]. Τέλος, η Ψηφιακή Συσχέτιση Εικόνας (*Digital Image Correlation - DIC*) μπορεί να προσφέρει πλούσια πληροφορία πλήρους πεδίου, όμως απαιτεί κατάλληλο επιφανειακό μοτίβο, υψηλής ποιότητας απεικόνιση και επιπλέον βαθμονόμηση, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε υδάτινα περιβάλλοντα [31]-[33].

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη για ένα οικονομικό, αναπαραγώγιμο και υψηλής ανάλυσης οπτικό μικροσκοπικό σύστημα μέτρησης, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εργαστηριακές διατάξεις μικρής κλίμακας και να παρέχει αξιόπιστη πληροφορία μετατόπισης χωρίς επαφή με το δείγμα. Μια τέτοια προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου απαιτείται άμεση οπτική παρατήρηση, λειτουργία σε υγρό ή απαιτητικό περιβάλλον και δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (*real-time monitoring*). Η χρήση ενός σωληνωτού μικροσκοπίου, μιας ψηφιακής κάμερας και κατάλληλου οπίσθιου φωτισμού (*backlighting*) μπορεί να

προσφέρει μια πιο απλή και οικονομικά προσιτή εναλλακτική λύση σε σχέση με ακριβότερες ή πιο σύνθετες τεχνικές μέτρησης.

Επομένως, η ανάπτυξη ενός οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης δεν αφορά μόνο την επιλογή ενός φακού ή μιας κάμερας, αλλά τη συνολική σχεδίαση μιας ολοκληρωμένης μετρητικής αλυσίδας. Η αλυσίδα αυτή περιλαμβάνει τη μηχανική σταθερότητα της διάταξης, τον φωτισμό, τη βαθμονόμηση, την απόκτηση εικόνας, την ηλεκτρονική υποστήριξη του πειράματος και την αλγοριθμική επεξεργασία των δεδομένων. Η ολοκληρωμένη αυτή προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε συστήματα όπου απαιτείται παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο ή περαιτέρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και ανάπτυξη ενός οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης. Το σύστημα βασίζεται σε μια προσαρμοσμένη οπτική διάταξη, η οποία συνδυάζει σωληνωτό μικροσκόπιο, αντικειμενικό φακό, ψηφιακή κάμερα, ομοιόμορφο οπίσθιο φωτισμό και αλγοριθμική επεξεργασία εικόνας για την εξαγωγή ποσοτικών μετρήσεων. Ως βασική πειραματική εφαρμογή χρησιμοποιείται η μέτρηση της μετατόπισης του ελεύθερου άκρου ενός ενεργοποιητή IPMC σε υδάτινο περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία δεν περιορίζεται μόνο στην κατασκευή μιας οπτικής διάταξης, αλλά αντιμετωπίζει το σύστημα μέτρησης ως ολοκληρωμένη αλυσίδα που περιλαμβάνει οπτική απεικόνιση, ηλεκτρονική οδήγηση, απόκτηση δεδομένων, επεξεργασία εικόνας και εξαγωγή μετατόπισης.

Η βασική λογική της προτεινόμενης προσέγγισης είναι ότι η εικόνα δεν χρησιμοποιείται μόνο για απλή παρατήρηση, αλλά ως μετρητικό σήμα. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται κατάλληλη βαθμονόμηση του συστήματος, ώστε οι μεταβολές σε εικονοστοιχεία (*pixels*) να μετατρέπονται σε πραγματικές διαστάσεις. Παράλληλα, απαιτείται αξιόπιστος εντοπισμός του σημείου ενδιαφέροντος, στην προκειμένη περίπτωση του ελεύθερου άκρου του IPMC, μέσα από τεχνικές επεξεργασίας εικόνας όπως ανίχνευση ακμών (*edge detection*), εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων (*feature point detection*) και προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα (*grid-based adaptive search*). Με αυτόν τον τρόπο, το οπτικό μικροσκοπικό σύστημα μετατρέπεται σε εργαλείο ποσοτικής μέτρησης μικρομετατοπίσεων.

Οι κύριες συνεισφορές της παρούσας εργασίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής. Πρώτον, παρουσιάζεται η μελέτη και υλοποίηση μιας προσαρμοσμένης οπτικής μικροσκοπικής διάταξης χαμηλού κόστους για μέτρηση μικρομετατοπίσεων. Δεύτερον, το σύστημα εφαρμόζεται σε ενεργοποιητή IPMC που λειτουργεί σε υδάτινο περιβάλλον, επιτρέποντας πλευρική απεικόνιση και παρακολούθηση της κίνησής του. Τρίτον, ενσωματώνεται αλγοριθμική διαδικασία επεξεργασίας εικόνας για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση του ελεύθερου άκρου του δείγματος. Τέταρτον, το σύστημα συνδυάζεται με ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης, απόκτησης δεδομένων και προστασίας, ώστε η οπτική μέτρηση να υποστηρίζεται από ελεγχόμενη και ασφαλή πειραματική λειτουργία. Τέλος, παρουσιάζεται η επέκταση της διάταξης σε αυτοματοποιημένο μικροσκοπικό σύστημα για τη συλλογή και οπτική παρακολούθηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων.

Η υπόλοιπη εργασία οργανώνεται ως εξής. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα υλικά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, συμπεριλαμβανομένης της οπτικής διάταξης, της βαθμονόμησης, του ηλεκτρονικού κυκλώματος και του αλγορίθμου παρακολούθησης. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η συζήτηση σχετικά με τη χωρική ανάλυση, την παραμόρφωση του φακού, τον χρόνο επεξεργασίας, την ακρίβεια εντοπισμού και την αξιολόγηση του κυκλώματος προστασίας. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η επέκταση της μικροσκοπικής διάταξης σε σύστημα συλλογής και οπτικής παρακολούθησης αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων, με έμφαση στον θάλαμο συλλογής, στην κολλητική επιφάνεια δειγματοληψίας, στον μηχανισμό μετακίνησης ταινίας και μικροσκοπίου, καθώς και στη διαδικασία διαδοχικής μικροσκοπικής απεικόνισης και επεξεργασίας δεδομένων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα, η τεχνική συμβολή της εργασίας και οι προοπτικές αξιοποίησης του συστήματος.

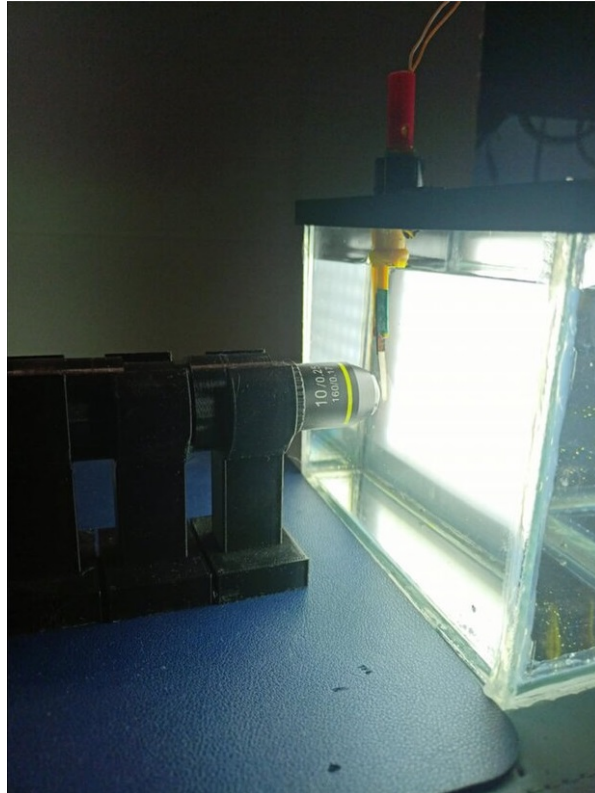
Κεφάλαιο 2ο: Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Πειραματική διάταξη του οπτικού μικροσκοπικού συστήματος

Το οπτικό μικροσκοπικό σύστημα που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε με σκοπό τη μέτρηση μικρομετατοπίσεων μέσω ψηφιακής απεικόνισης και επεξεργασίας εικόνας. Η γενική αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται στη συνδυασμένη λειτουργία οπτικής διάταξης, ψηφιακής κάμερας, ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης και υπολογιστικής επεξεργασίας. Ως βασική πειραματική εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ενεργοποιητής Ιοντικού Πολυμερικού Μεταλλικού Σύνθετου Υλικού (Ionic Polymer Metal Composite - IPMC), ο οποίος λειτουργούσε μέσα σε υδατικό περιβάλλον και παρατηρούνταν πλευρικά μέσω μικροσκοπίου.

Η συνολική λογική λειτουργίας της διάταξης μπορεί να περιγραφεί ως μια αλυσίδα μέτρησης, στην οποία η μηχανική κίνηση του δείγματος μετατρέπεται αρχικά σε οπτική πληροφορία, στη συνέχεια καταγράφεται ως ψηφιακή εικόνα και τελικά επεξεργάζεται αλγοριθμικά για την εξαγωγή ποσοτικής μετατόπισης. Το IPMC διεγείρεται ηλεκτρικά μέσω ειδικού κυκλώματος οδήγησης και παρουσιάζει κάμψη. Η κάμψη αυτή καταγράφεται από το μικροσκοπικό σύστημα, ενώ η εικόνα του δείγματος μεταφέρεται σε ψηφιακή μορφή μέσω κάμερας. Στη συνέχεια, τα δεδομένα εικόνας υποβάλλονται σε επεξεργασία με σκοπό τον εντοπισμό και την παρακολούθηση του ελεύθερου άκρου του δείγματος.

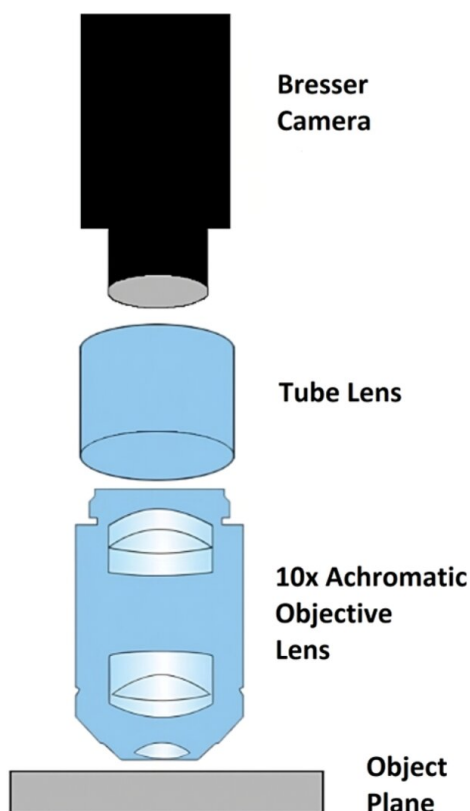
Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει γυάλινη δεξαμενή, σωληνωτό μικροσκόπιο (tubular microscope), αντικειμενικό φακό (objective lens), ψηφιακή κάμερα και σύστημα οπίσθιου φωτισμού (backlighting). Το IPMC τοποθετήθηκε μέσα σε διαφανή γυάλινη δεξαμενή γεμάτη με απιονισμένο νερό, ώστε να προσομοιωθούν συνθήκες λειτουργίας σε υγρό περιβάλλον, περιορίζοντας παράλληλα την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τις οπτικές παρεμβολές. Οι εξωτερικές διαστάσεις της δεξαμενής ήταν 12 cm ύψος, 7 cm πλάτος και 15 cm μήκος. Το δείγμα στερεώθηκε με ειδικά κατασκευασμένο στήριγμα, το οποίο επέτρεπε τόσο τη μηχανική συγκράτηση του IPMC όσο και την ηλεκτρική επαφή μέσω ενσωματωμένων χάλκινων ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο, το δείγμα μπορούσε να διεγερθεί ηλεκτρικά, ενώ ταυτόχρονα παρέμενε ορατό από την πλευρά της δεξαμενής για την καταγραφή της πλευρικής του μετατόπισης.



Σχήμα 2.1: Εικόνα πειραματικής διάταξης.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Για την απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε ειδικά σχεδιασμένο σωληνωτό μικροσκόπιο (tubular microscope) με συνολικό μήκος σωλήνα περίπου 84 mm. Η επιλογή σωληνωτής διάταξης έγινε λόγω της συμπαγούς μορφής της και της ευκολίας ευθυγράμμισης κατά μήκος ενός ενιαίου οπτικού άξονα. Το μικροσκόπιο ήταν εξοπλισμένο με αχρωματικό αντικειμενικό φακό 10× (achromatic objective lens), ο οποίος προσέφερε επαρκή μεγέθυνση, περιορίζοντας ταυτόχρονα χρωματικές και σφαιρικές εκτροπές. Η απόσταση μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του δείγματος διατηρήθηκε στην περιοχή των 7,5-10mm, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το πάχος του γυάλινου τοιχώματος της δεξαμενής, περίπου 4 mm, όσο και την περιοχή εστίασης του φακού.



Σχήμα 2.2: Εικόνα διάταξης μικροσκοπίου.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Στο άνω άκρο του σωληνωτού μικροσκοπίου ενσωματώθηκε ψηφιακή κάμερα USB Bresser, κατάλληλη για απευθείας σύνδεση σε μικροσκοπική διάταξη χωρίς χρήση προσοφθάλμιου φακού. Η κάμερα επέτρεπε την ψηφιακή καταγραφή της μεγεθυμένης εικόνας του δείγματος σε πραγματικό χρόνο. Το μικροσκόπιο τοποθετήθηκε πλευρικά στη δεξαμενή, σε πολύ μικρή απόσταση από το εξωτερικό της τοίχωμα, περίπου 1 mm, ώστε να διατηρηθεί όσο το δυνατόν πιο σταθερή και καθαρή η οπτική διαδρομή και να μειωθούν οι παραμορφώσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την εστίαση και τη γεωμετρία της εικόνας.

Στην απέναντι πλευρά της δεξαμενής τοποθετήθηκε ειδικά σχεδιασμένο πάνελ οπίσθιου φωτισμού, ευθυγραμμισμένο με το δείγμα και την κάμερα. Το πάνελ κάλυπτε την εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής με διαστάσεις περίπου 7 cm × 12 cm και αποτελούνταν από διάταξη 15 × 9 λευκών LED. Ο οπίσθιος φωτισμός ήταν απαραίτητος για τη λειτουργία της μικροσκοπικής απεικόνισης, καθώς ο συγκεκριμένος τύπος αντικειμενικού φακού απαιτεί διερχόμενο φως από την πίσω πλευρά του αντικειμένου. Χωρίς τον φωτισμό αυτό, η εικόνα που καταγράφεται από την κάμερα θα ήταν ιδιαίτερα σκοτεινή και δεν θα επέτρεπε αξιόπιστο εντοπισμό του περιγράμματος του IPMC.

Πριν από κάθε πειραματική μέτρηση ελεγχόταν η ποιότητα της απεικόνισης, ώστε το περίγραμμα του IPMC και τα σημεία ενδιαφέροντος να είναι ευδιάκριτα. Η σταθερότητα του φωτισμού και η καθαρή αντίθεση μεταξύ δείγματος και υποβάθρου ήταν σημαντικές προϋποθέσεις για την αξιόπιστη

λειτουργία των αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας. Αν οι συνθήκες ορατότητας δεν ήταν επαρκείς, η μέτρηση δεν πραγματοποιούνταν, καθώς η ανίχνευση ακμών και ο εντοπισμός του άκρου θα μπορούσαν να επηρεαστούν.

Η συνολική διάταξη μπορεί να χωριστεί σε βασικά υποσυστήματα: το οπτικό υποσύστημα, το ηλεκτρονικό υποσύστημα οδήγησης και μέτρησης, το υποσύστημα προστασίας και το υπολογιστικό/αλγοριθμικό υποσύστημα. Το οπτικό υποσύστημα περιλαμβάνει τη δεξαμενή, το μικροσκόπιο, τον αντικειμενικό φακό, την κάμερα και τον οπίσθιο φωτισμό. Το ηλεκτρονικό υποσύστημα παράγει το σήμα διέγερσης, οδηγεί το IPMC και συλλέγει ηλεκτρικές μετρήσεις. Το υποσύστημα προστασίας παρακολουθεί πιθανές καταστάσεις σφάλματος, όπως υπέρταση, υπόταση, ανοικτό κύκλωμα και βραχυκύκλωμα. Τέλος, το υπολογιστικό υποσύστημα αναλαμβάνει την καταγραφή εικόνας, την επεξεργασία δεδομένων και την εξαγωγή της τελικής μετατόπισης.

Πίνακας 2.1: Βασικά εξαρτήματα της οπτικής μικροσκοπικής διάταξης

Υποσύστημα	Εξάρτημα	Ρόλος
Δεξαμενή	Γυάλινη δεξαμενή $12 \times 7 \times 15$ cm	Υδάτινο περιβάλλον και οπτική πρόσβαση
Οπτικό σύστημα	Σωληνωτό μικροσκόπιο	Πλευρική μικροσκοπική απεικόνιση
Φακός	Αχρωματικός αντικειμενικός φακός 10×	Μεγέθυνση με περιορισμό εκτροπών
Κάμερα	USB Bresser camera	Ψηφιακή καταγραφή εικόνας
Φωτισμός	Πάνελ 15×9 λευκών LED	Ομοιόμορφος οπίσθιος φωτισμός
Δείγμα	IPMC	Πειραματικός ενεργοποιητής
Στήριξη	Custom clip με χάλκινα ηλεκτρόδια	Μηχανική συγκράτηση και ηλεκτρική επαφή

2.2 Ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης και απόκτησης δεδομένων

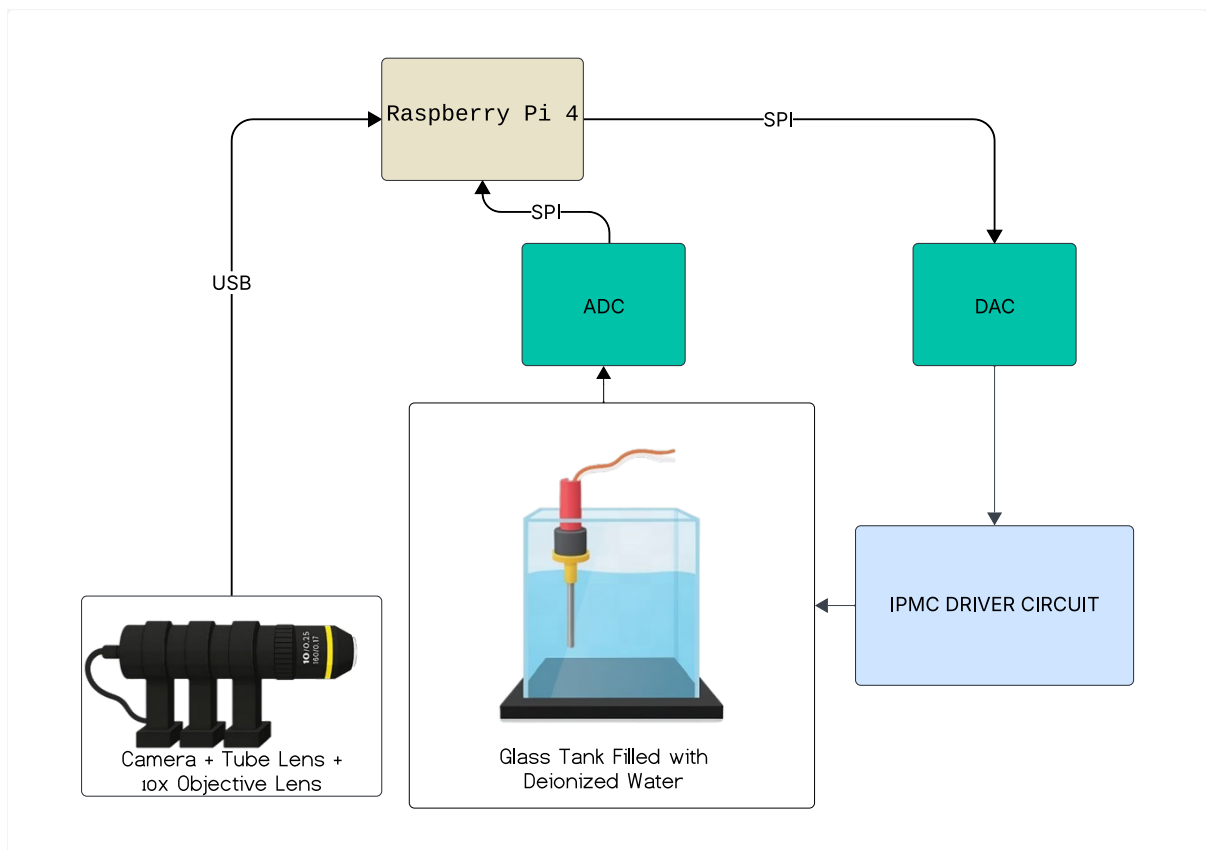
Η συνολική διάταξη του συστήματος σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη ηλεκτρική διέγερση του ενεργοποιητή IPMC, την καταγραφή της μηχανικής του απόκρισης μέσω της οπτικής διάταξης και την απόκτηση των αντίστοιχων ηλεκτρικών μεγεθών. Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται στη συνεργασία μιας υπολογιστικής μονάδας ελέγχου, ενός κυκλώματος παραγωγής και ενίσχυσης σήματος, ενός κυκλώματος μέτρησης ρεύματος και τάσης, καθώς και της ψηφιακής κάμερας που καταγράφει την κίνηση του δείγματος.

Στο κέντρο της διάταξης βρίσκεται το Raspberry Pi 4 Model B με μνήμη RAM 8 GB, το οποίο λειτουργεί ως η βασική μονάδα ελέγχου και συντονισμού. Μέσω σειριακής περιφερειακής διεπαφής (Serial Peripheral Interface - SPI), το Raspberry Pi επικοινωνεί με τον μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (Digital-to-Analog Converter - DAC) για την παραγωγή του σήματος διέγερσης, καθώς και με τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog-to-Digital Converter - ADC) για την

καταγραφή των ηλεκτρικών μετρήσεων. Παράλληλα, η ψηφιακή κάμερα είναι απευθείας συνδεδεμένη στο Raspberry Pi και καταγράφει την κίνηση του IPMC μέσα από το τοίχωμα της γυάλινης δεξαμενής.

Η λειτουργική ροή της διάταξης ξεκινά με την παραγωγή ενός ελεγχόμενου ημιτονοειδούς σήματος από τον DAC. Το σήμα αυτό οδηγείται σε κατάλληλες βαθμίδες προσαρμογής και ενίσχυσης, ώστε να μετατραπεί σε διπολική κυματομορφή κατάλληλη για την ηλεκτρική διέγερση του IPMC. Η μηχανική κάμψη που προκαλείται στο δείγμα καταγράφεται ταυτόχρονα από την κάμερα, ενώ η ηλεκτρική απόκριση του κυκλώματος παρακολουθείται μέσω αντίστασης μέτρησης ρεύματος (shunt resistor) και ADC. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα συλλέγει οπτικά και ηλεκτρικά δεδομένα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς του ενεργοποιητή.

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων (block diagram) της συνολικής διάταξης, όπου φαίνεται η διασύνδεση του Raspberry Pi με τον DAC, τον ενισχυτή οδήγησης, το IPMC, την αντίσταση μέτρησης ρεύματος, τον ADC και την ψηφιακή κάμερα. Το διάγραμμα αποτυπώνει τη βασική ροή σήματος και δεδομένων του συστήματος, από την παραγωγή της ηλεκτρικής διέγερσης έως την καταγραφή της οπτικής και ηλεκτρικής απόκρισης.



Σχήμα 2.3: Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος μέτρησης.

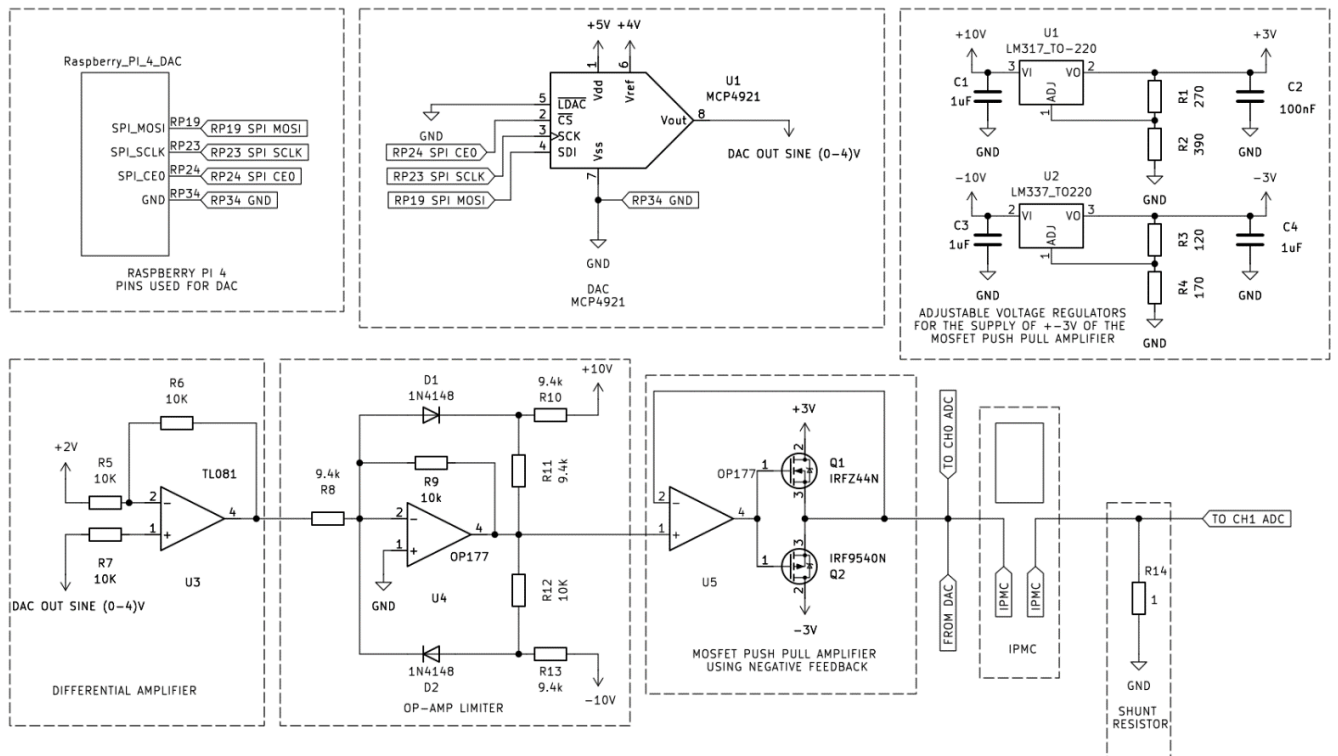
Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Για την ηλεκτρική διέγερση του ενεργοποιητή IPMC και την ταυτόχρονη παρακολούθηση της ηλεκτρικής του συμπεριφοράς, αναπτύχθηκε ειδικό κύκλωμα παραγωγής σήματος, οδήγησης και απόκτησης δεδομένων. Η λειτουργία του κυκλώματος βασίζεται στην παραγωγή ελεγχόμενου

Κεφάλαιο 2

ημιτονοειδούς σήματος, στην κατάλληλη μετατροπή του σε διπολική κυματομορφή, στην ενίσχυσή του ώστε να μπορεί να οδηγήσει το IPMC και στην καταγραφή των ηλεκτρικών μεγεθών που σχετίζονται με τη λειτουργία του δείγματος.

Το Raspberry Pi επικοινωνούσε μέσω SPI με τον MCP4921, έναν DAC ανάλυσης 12 bit. Ο DAC διαμορφώθηκε ώστε να παράγει ημιτονοειδές σήμα στην περιοχή 0-4 V, ενώ η τάση αναφοράς του (reference voltage - VREF) παρέχεται από κύκλωμα χαμηλού θορύβου, με σκοπό τη σταθερότητα του παραγόμενου σήματος.



Σχήμα 2.4: Κύκλωμα Οδήγησης IPMC.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Το μονοπολικό ημιτονοειδές σήμα που παραγόταν από τον DAC μετατρεπόταν στη συνέχεια σε διπολικό σήμα με κέντρο τα 0 V, μέσω διαφορικού ενισχυτή (differential amplifier). Με αυτόν τον τρόπο προέκυπτε κυματομορφή στην περιοχή -2 V έως +2 V, κατάλληλη για τη διέγερση του IPMC. Το σήμα αυτό οδηγούνταν σε βαθμίδα ενίσχυσης τύπου push-pull (push-pull amplifier), η οποία αποτελούνταν από συμπληρωματικά MOSFETs, το IRFZ44N για τη θετική ημιπερίοδο και το IRF9540N για τη αρνητική ημιπερίοδο. Η βαθμίδα αυτή τροφοδοτούνταν από συμμετρική τροφοδοσία ± 3 V, ώστε να μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα στο δείγμα.

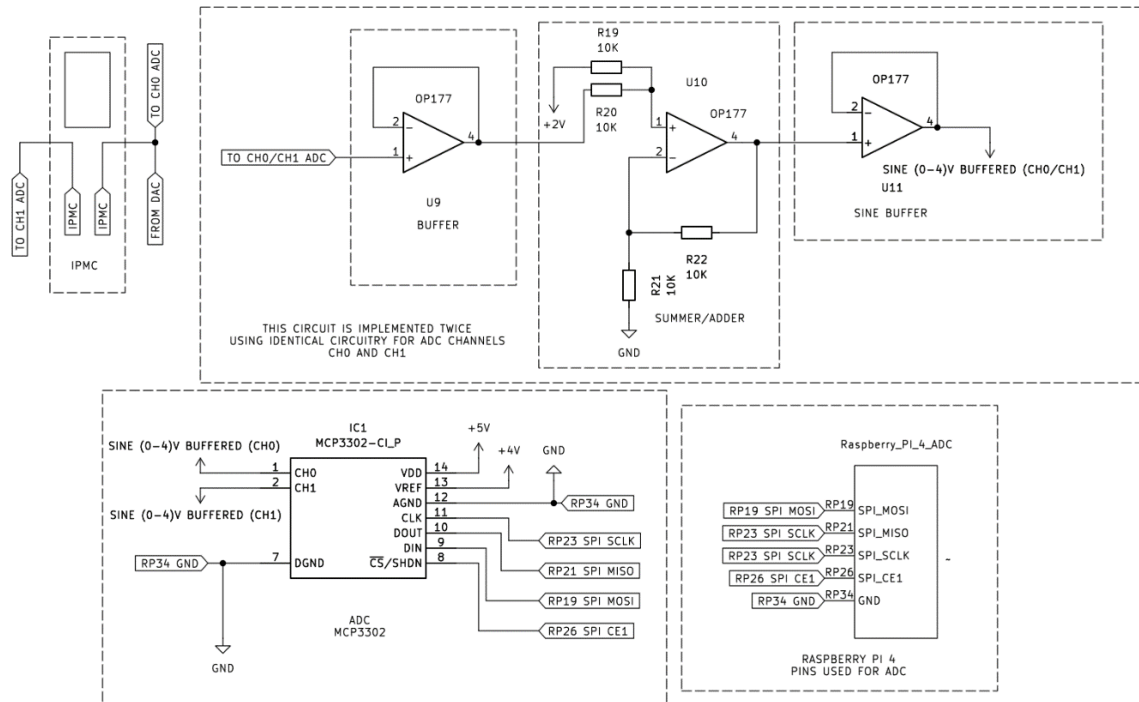
Για την προστασία του IPMC από ανεπιθύμητες υπερτάσεις, το κύκλωμα οδήγησης περιλάμβανε βαθμίδα περιορισμού τάσης ακριβείας βασισμένη σε τελεστικό ενισχυτή (op-amp-based precision limiter). Η βαθμίδα αυτή υλοποιήθηκε με τελεστικό ενισχυτή OP177, δύο διόδους 1N4148 και

κατάλληλο δίκτυο αντιστάσεων ανάδρασης. Σε αντίθεση με απλές διατάξεις περιορισμού που βασίζονται μόνο σε διόδους Zener, η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει πιο ακριβή και συμμετρικό περιορισμό της τάσης γύρω από το επιθυμητό όριο, μειώνοντας παράλληλα την παραμόρφωση στην κανονική γραμμική περιοχή λειτουργίας. Ο περιοριστής μειώνει την πιθανότητα να φτάσουν επικίνδυνες τάσεις στη βαθμίδα ισχύος και, κατ' επέκταση, στο IPMC.

Η τροφοδοσία $\pm 3\text{ V}$ της βαθμίδας push-pull προήλθε από αρχική συμμετρική τροφοδοσία $\pm 10\text{ V}$, μέσω ρυθμιζόμενων σταθεροποιητών τάσης LM317 και LM337. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε η βαθμίδα ισχύος να λειτουργεί σε ασφαλή όρια τάσης και να προστατεύεται το δείγμα ακόμη και σε περίπτωση αστοχίας του κυκλώματος περιορισμού. Με τον τρόπο αυτό, η ίδια η τροφοδοσία λειτουργεί ως πρόσθετο επίπεδο προστασίας για το IPMC και το κύκλωμα οδήγησης.

Η έξοδος του ενισχυτή push-pull συνδέθηκε απευθείας στον έναν ακροδέκτη του IPMC, ενώ ο δεύτερος ακροδέκτης συνδέθηκε στη γείωση μέσω αντίστασης μέτρησης ρεύματος (shunt resistor) $1\ \Omega / 5\text{ W}$. Η αντίσταση αυτή χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του ρεύματος που διαρρέει το IPMC, μέσω της μέτρησης της πτώσης τάσης στα άκρα της. Παράλληλα, οι δύο ακροδέκτες του IPMC συνδέθηκαν σε ξεχωριστά κανάλια εισόδου, CH0 και CH1, ενός μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog-to-Digital Converter - ADC) τύπου MCP3302, ανάλυσης 13 bit, ώστε να είναι δυνατή η διαφορική παρακολούθηση της τάσης στο δείγμα.

Πριν οδηγηθούν στον ADC, τα σήματα υποβάλλονταν σε κατάλληλη προσαρμογή στάθμης (signal conditioning). Κάθε κανάλι περιλάμβανε αρχικά βαθμίδα ακολουθητή τάσης (buffer stage) και στη συνέχεια αθροιστικό ενισχυτή (summing amplifier), ο οποίος μετέτρεπε το διπολικό σήμα $\pm 2\text{ V}$ σε μονοπολικό σήμα $0\text{--}4\text{ V}$. Η μετατροπή αυτή ήταν απαραίτητη, επειδή ο ADC λειτουργεί μόνο με θετικές τάσεις εισόδου. Πριν από τη δειγματοληψία, το προσαρμοσμένο σήμα περνούσε από τελική βαθμίδα buffer, ώστε να εξασφαλιστεί προσαρμογή εμπίδησης και σταθερότητα του σήματος στην είσοδο του ADC.



Σχήμα 2.5: Κύκλωμα ελέγχου ADC που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή σήματος. Πανομοιότυπο κύκλωμα χρησιμοποιείται για τα κανάλια ADC CH0 και CH1.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Οι τελεστικοί ενισχυτές του αναλογικού κυκλώματος τροφοδοτήθηκαν με συμμετρική τροφοδοσία $\pm 10\text{ V}$, ενώ τα ψηφιακά ολοκληρωμένα, δηλαδή ο MCP4921 DAC και ο MCP3302 ADC, τροφοδοτήθηκαν με $+5\text{ V}$. Η τάση αυτή σταθεροποιήθηκε με ρυθμιστή τάσης LM7805, ώστε να παρέχονται σταθερά επίπεδα τροφοδοσίας στα ψηφιακά και αναλογικά τμήματα της διάταξης.

Για τη μείωση της επίδρασης του ηλεκτρικού θορύβου (electrical noise) στη λειτουργία της διάταξης, εφαρμόστηκαν βασικές πρακτικές γείωσης (grounding) και απόζευξης (decoupling) στο κύκλωμα οδήγησης. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε σταθερός οπίσθιος φωτισμός (stable backlight illumination), ώστε οι μεταβολές της φωτεινότητας να μην επηρεάζουν την επεξεργασία εικόνας και τον εντοπισμό του άκρου του IPMC. Τυχόν υπολειπόμενος ηλεκτρικός θόρυβος, ακόμη και αν υπήρχε, αναμένεται να συγκεντρώνεται κυρίως σε υψηλότερες συχνότητες και να προκαλεί πολύ μικρές, πρακτικά αμελητέες μετατοπίσεις σε σχέση με τη χαμηλής συχνότητας ελεγχόμενη διέγερση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Με την παραπάνω αρχιτεκτονική, το κύκλωμα επέτρεπε την ταυτόχρονη ηλεκτρική διέγερση του IPMC και την καταγραφή της ηλεκτρικής του απόκρισης. Έτσι, η μηχανική μετατόπιση που καταγραφόταν οπτικά μπορούσε να συσχετιστεί με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά μεγέθη, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη πειραματική διάταξη για τη μελέτη της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς του δείγματος.

2.3 Κύκλωμα προστασίας και ανίχνευσης σφαλμάτων

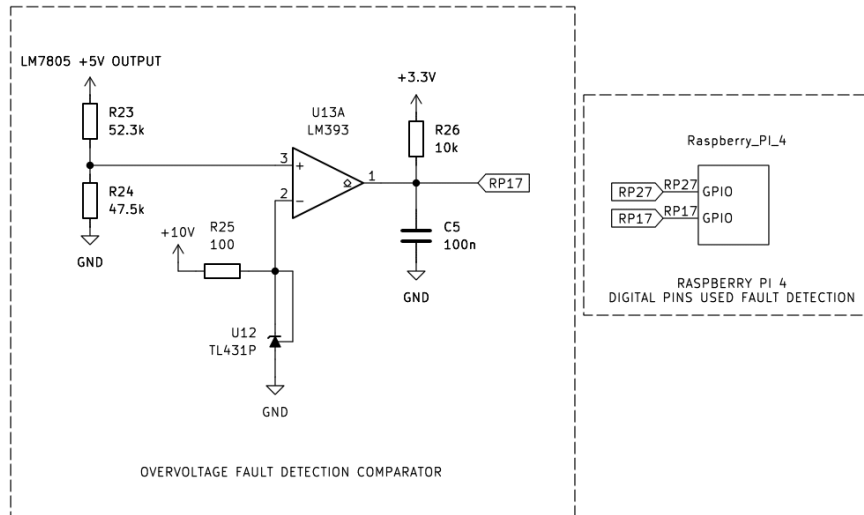
Η αξιόπιστη λειτουργία ενός συστήματος μέτρησης μικρομετατοπίσεων σε υδάτινο περιβάλλον απαιτεί όχι μόνο ακριβή οπτική παρακολούθηση, αλλά και κατάλληλη προστασία του δείγματος IPMC και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων οδήγησης. Σε τέτοιες πειραματικές διατάξεις, μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας, όπως υπέρταση τροφοδοσίας, υπόταση, κορεσμός της βαθμίδας ενίσχυσης, κακή ηλεκτρική επαφή ή βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες του δείγματος, μπορούν να οδηγήσουν είτε σε λανθασμένα δεδομένα μετατόπισης είτε ακόμη και σε μόνιμη βλάβη του ενεργοποιητή.

Για τον λόγο αυτό, το κύκλωμα ελέγχου του IPMC ενσωματώνει ειδικό υποσύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων (fault detection subsystem), το οποίο παρακολουθεί βασικά ηλεκτρικά σημεία της διάταξης. Συγκεκριμένα, επιτηρούνται η τροφοδοσία των 5 V, η έξοδος της βαθμίδας push-pull, καθώς και το ρεύμα που διαρρέει το IPMC μέσω της αντίστασης μέτρησης ρεύματος (shunt resistor). Οι βασικές καταστάσεις σφάλματος που εξετάζονται είναι η υπέρταση, η υπόταση, η μη φυσιολογική έξοδος της βαθμίδας push-pull, το ανοικτό κύκλωμα και το βραχυκύκλωμα.

2.3.1 Ανίχνευση υπέρτασης και υπότασης

Για την ανίχνευση υπέρτασης και υπότασης στην τροφοδοσία των 5 V, χρησιμοποιήθηκαν δύο βαθμίδες συγκριτή τάσης (voltage comparator) βασισμένες στο ολοκληρωμένο LM393. Η σταθερή τάση αναφοράς δημιουργήθηκε με χρήση του TL431, ο οποίος λειτουργεί ως ακριβής αναφορά τάσης (precision shunt reference) στα 2,495 V. Η έξοδος του ρυθμιστή LM7805 παρακολουθείται μέσω κατάλληλων διαιρετών τάσης, ώστε η τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο κάθε συγκριτή να μπορεί να συγκριθεί με την τάση αναφοράς.

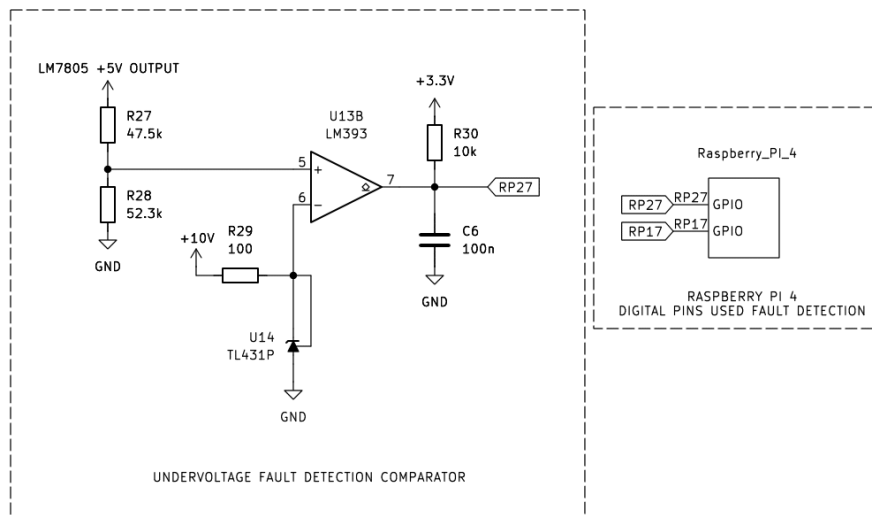
Στην περίπτωση της υπέρτασης, η έξοδος των 5 V του LM7805 παρακολουθείται μέσω διαιρέτη τάσης 52,5 k Ω / 47,5 k Ω . Όταν η τάση εξόδου υπερβεί το όριο των 5,25 V, η τάση στην έξοδο του διαιρέτη γίνεται μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς των 2,495 V. Τότε, η έξοδος ανοικτού συλλέκτη (open-collector output) του LM393 οδηγείται μέσω αντίστασης έλξης (pull-up resistor) στα 3,3 V, δημιουργώντας λογικό HIGH προς την ψηφιακή είσοδο του Raspberry Pi. Με αυτόν τον τρόπο δηλώνεται κατάσταση υπέρτασης.



Σχήμα 2.6: Κύκλωμα ανίχνευσης υπέρτασης με χρήση συγκριτών LM393 και τάσης αναφοράς TL431 για την επιτήρηση της εξόδου του LM7805.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Αντίστοιχα, για την ανίχνευση υπότασης, η ίδια τροφοδοσία παρακολουθείται μέσω διαφορετικού διαιρέτη τάσης, αποτελούμενου από αντιστάσεις 47,5 kΩ και 52,3 kΩ. Όταν η έξοδος του LM7805 πέσει κάτω από το όριο των 4,75 V, η τάση στον διαιρέτη γίνεται μικρότερη από την τάση αναφοράς των 2,495 V. Ως αποτέλεσμα, ο συγκριτής LM393 ενεργοποιεί την έξοδό του και παράγεται λογικό LOW προς την αντίστοιχη ψηφιακή είσοδο. Οι έξοδοι των συγκριτών χρησιμοποιούν αντιστάσεις έλξης στα 3,3 V, ώστε να είναι συμβατές με τα λογικά επίπεδα των GPIO του Raspberry Pi.



Σχήμα 2.7: Κύκλωμα ανίχνευσης υπότασης με χρήση συγκριτών LM393 και τάσης αναφοράς TL431 για την επιτήρηση της εξόδου του LM7805.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα μπορεί να αναγνωρίζει αν η τροφοδοσία των 5 V βρίσκεται εκτός του επιτρεπτού εύρους λειτουργίας. Η υπέρταση μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα ψηφιακά ολοκληρωμένα και τα κυκλώματα μέτρησης, ενώ η υπόταση μπορεί να προκαλέσει ασταθή λειτουργία, λανθασμένες μετρήσεις ή απρόβλεπτη συμπεριφορά του συστήματος.

2.3.2 Παρακολούθηση εξόδου της βαθμίδας push-pull μέσω ADC

Ένας δεύτερος μηχανισμός ανίχνευσης σφαλμάτων υλοποιήθηκε μέσω της παρακολούθησης της εξόδου της βαθμίδας push-pull. Η παρακολούθηση αυτή πραγματοποιείται μέσω του καναλιού CH0 του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog-to-Digital Converter - ADC) MCP3302. Ο σκοπός της διαδικασίας είναι να ελέγχεται συνεχώς αν η έξοδος του ενισχυτή παραμένει μέσα στο αναμενόμενο εύρος λειτουργίας.

Η βαθμίδα push-pull τροφοδοτείται από συμμετρική τροφοδοσία ± 3 V και οδηγείται από διπολικό ημιτονοειδές σήμα περίπου ± 2 V. Επομένως, σε κανονική λειτουργία, η έξοδος του ενισχυτή αναμένεται να παραμένει εντός των ορίων της ονομαστικής περιοχής λειτουργίας. Αν η μετρούμενη τάση αποκλίνει σημαντικά από τα αναμενόμενα όρια, αυτό μπορεί να αποτελεί ένδειξη δυσλειτουργίας της βαθμίδας ενίσχυσης, υπερβολικού φορτίου, μη φυσιολογικής συμπεριφοράς του IPMC ή πιθανής συνθήκης βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες του δείγματος.

Η συνεχής παρακολούθηση της εξόδου μέσω του ADC επιτρέπει στο σύστημα να έχει άμεση ανατροφοδότηση σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος οδήγησης. Έτσι, δεν ελέγχεται μόνο αν το σήμα παράγεται σωστά, αλλά και αν η βαθμίδα ισχύος ανταποκρίνεται όπως αναμένεται κατά τη διάρκεια της διέγερσης του IPMC. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιοπιστία της πειραματικής διαδικασίας, καθώς τυχόν δυσλειτουργίες στην έξοδο του ενισχυτή θα μπορούσαν να επηρεάσουν τόσο την ηλεκτρική διέγερση όσο και την αντίστοιχη μηχανική απόκριση που καταγράφεται οπτικά.

2.3.3 Ανίχνευση ανοικτού κυκλώματος

Η τρίτη συνθήκη σφάλματος αφορά την περίπτωση ανοικτού κυκλώματος (open circuit) στους ακροδέκτες του IPMC. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν οι χάλκινες επαφές του στηρίγματος δεν ακουμπούν σωστά το δείγμα ή όταν η ηλεκτρική διαδρομή διακόπτεται. Σε αυτή την περίπτωση, το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται ουσιαστική πτώση τάσης στην αντίσταση μέτρησης ρεύματος.

Η ανίχνευση ανοικτού κυκλώματος βασίζεται στην παρακολούθηση της τάσης πάνω στην αντίσταση $1\ \Omega$ μέσω του καναλιού CH1 του MCP3302 ADC. Σε κανονική λειτουργία, η αντίσταση shunt εμφανίζει χρονικά μεταβαλλόμενη τάση, η οποία αντιστοιχεί στο ημιτονοειδές ρεύμα που διαρρέει το IPMC. Αν όμως οι επαφές είναι ανοικτές και το κύκλωμα δεν είναι συνεχές, η μετρούμενη τάση παραμένει κοντά στα 0 V.

Επειδή το σήμα διέγερσης είναι ημιτονοειδές και φυσιολογικά διέρχεται από το μηδέν σε κάθε περίοδο, μια στιγμιαία μέτρηση κοντά στη μηδενική διέλευση (zero-crossing) θα μπορούσε να οδηγήσει σε εσφαλμένη ένδειξη ανοικτού κυκλώματος. Για την αποφυγή αυτού του σφάλματος, χρησιμοποιήθηκε χρονικό παράθυρο 700 ms, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο μισό της περιόδου του σήματος διέγερσης στα 0,7 Hz ($T = \frac{1}{0.7} = 1.43s$). Αν μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα δεν ανιχνευθεί μετρήσιμη μεταβολή τάσης στην αντίσταση shunt, τότε ενεργοποιείται ένδειξη ανοικτού κυκλώματος, υποδηλώνοντας αποσύνδεση ή ανεπαρκή επαφή του δείγματος.

2.3.4 Ανίχνευση βραχυκυκλώματος

Η τέταρτη συνθήκη σφάλματος αφορά την περίπτωση βραχυκυκλώματος (short circuit), η οποία μπορεί να εμφανιστεί όταν οι χάλκινες επαφές του στηρίγματος έρθουν σε άμεση επαφή μεταξύ τους χωρίς να παρεμβάλλεται σωστά το IPMC. Σε αυτή την περίπτωση, το σήμα διέγερσης εφαρμόζεται σχεδόν απευθείας πάνω στην αντίσταση 1 Ω, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά υψηλό ρεύμα.

Για την ανίχνευση του βραχυκυκλώματος, το σύστημα παρακολουθεί συνεχώς την τάση στην αντίσταση shunt μέσω του καναλιού CH1 του ADC. Εφόσον η διέγερση είναι της τάξης των ± 2 V, η άμεση εφαρμογή της πάνω σε αντίσταση 1 Ω μπορεί να οδηγήσει σε ρεύμα περίπου 2 A, τιμή που είναι ενδεικτική άμεσου βραχυκυκλώματος μεταξύ των ακροδεκτών. Όταν το μετρούμενο ρεύμα υπερβεί το προκαθορισμένο όριο ασφαλείας, το σύστημα ενεργοποιεί ένδειξη βραχυκυκλώματος.

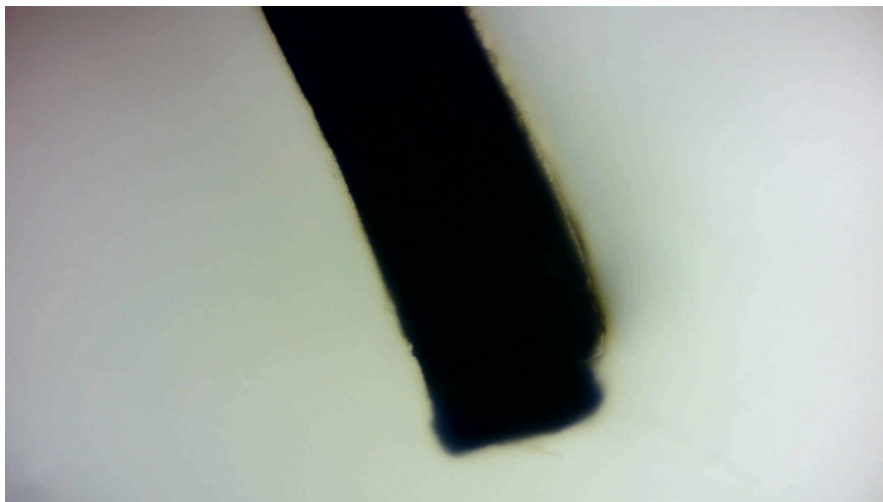
Ως πρόσθετο μέτρο προστασίας, όταν ανιχνευθεί βραχυκύκλωμα, απενεργοποιείται άμεσα ο DAC που παράγει το ημιτονοειδές σήμα διέγερσης. Με τον τρόπο αυτό σταματά η παροχή σήματος προς τη βαθμίδα ενίσχυσης, απομονώνεται η συνθήκη σφάλματος και μειώνεται ο κίνδυνος βλάβης στο κύκλωμα ή στο δείγμα IPMC.

Συνολικά, οι μηχανισμοί ανίχνευσης σφαλμάτων ενσωματώνονται σε μια ενιαία λογική παρακολούθησης της κατάστασης του συστήματος. Οι ενεργές συνθήκες σφάλματος μπορούν να εμφανίζονται στον χρήστη, επιτρέποντας την άμεση αναγνώριση υπέρτασης, υπότασης, μη φυσιολογικής εξόδου push-pull, ανοικτού κυκλώματος ή βραχυκυκλώματος. Μετά την αποκατάσταση του προβλήματος, η λειτουργία του DAC μπορεί να ενεργοποιηθεί ξανά, χωρίς να απαιτείται πλήρης επανεκκίνηση της διάταξης. Έτσι, το υποσύστημα προστασίας ενισχύει τόσο την ασφάλεια της πειραματικής διαδικασίας όσο και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

2.4 Απόκτηση εικόνας και αλγόριθμος παρακολούθησης άκρου

Η απόκτηση και επεξεργασία εικόνας αποτελεί βασικό στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας, καθώς η μετατόπιση του IPMC υπολογίζεται από τη διαδοχική ανάλυση των καρέ που καταγράφονται από το μικροσκοπικό σύστημα. Η εικόνα του δείγματος καταγράφεται σε πλευρική όψη, ώστε να είναι ορατή η γεωμετρία του ενεργοποιητή, η περιοχή πάκτωσης και το ελεύθερο άκρο του. Η καθαρή

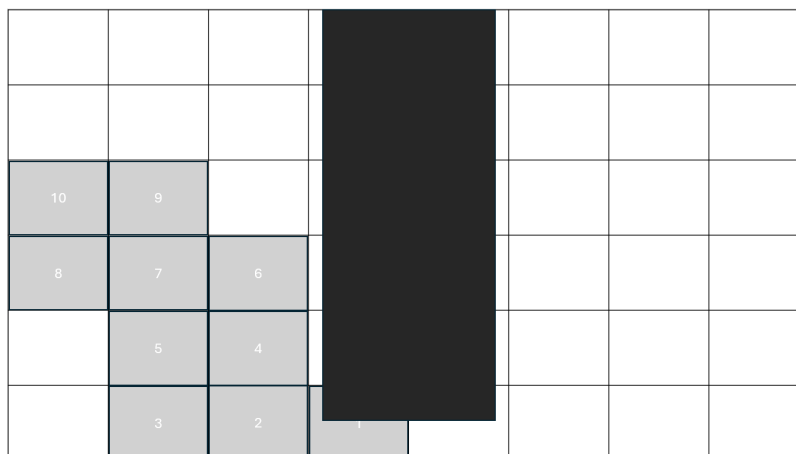
απεικόνιση του περιγράμματος του IPMC είναι απαραίτητη, επειδή η αλγοριθμική διαδικασία βασίζεται στον εντοπισμό ακμών και χαρακτηριστικών σημείων για τον υπολογισμό της μετατόπισης.



Σχήμα 2.8: Αντιπροσωπευτική λήψη του βασισμένου σε Nafion και επικαλυμμένου με πλατίνα δείγματος IPMC μέσω του μικροσκοπικού συστήματος απεικόνισης, όπου διακρίνονται καθαρά η γεωμετρία του ενεργοποιητή, η βάση πάκτωσης και το ελεύθερο κάτω άκρο.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

2.4.1 Απόκτηση εικόνας και προεπεξεργασία



Σχήμα 2.9: Ενδεικτική απεικόνιση του αλγορίθμου πρόβλεψης βάσει πλέγματος και ανίχνευσης ακμών για το άκρο του IPMC. Η εικόνα παρουσιάζει τη διαίρεση της περιοχής ενδιαφέροντος σε πλέγμα, την εκτιμώμενη θέση του άκρου, καθώς και τα υποψήφια κελιά αναζήτησης που ορίζονται από τον αλγόριθμο για το επόμενο καρέ.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Το σύστημα καταγράφει καρέ ανάλυσης 1920×1080 pixels σε μορφή εικόνας γκριζας κλίμακας 8-bit (8-bit grayscale). Η χρήση εικόνας γκριζας κλίμακας επιλέχθηκε επειδή, στη

συγκεκριμένη εφαρμογή, η βασική πληροφορία που ενδιαφέρει δεν είναι το χρώμα, αλλά η αντίθεση μεταξύ του δείγματος IPMC και του φωτεινού υποβάθρου. Με αυτόν τον τρόπο, η επεξεργασία απλοποιείται σημαντικά, καθώς κάθε εικονοστοιχείο περιγράφεται από μία μόνο τιμή φωτεινότητας αντί για τρία χρωματικά κανάλια. Αυτό μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο και επιτρέπει ταχύτερη επεξεργασία των καρτέ, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Πριν από την εφαρμογή των βασικών τεχνικών ανίχνευσης, κάθε καρτέ υποβάλλεται σε προεπεξεργασία με σκοπό τη βελτίωση της αντίθεσης, τη μείωση του θορύβου και τη δημιουργία μιας πιο καθαρής αναπαράστασης του δείγματος. Η προεπεξεργασία είναι απαραίτητη επειδή η εικόνα που καταγράφεται από την κάμερα μπορεί να επηρεαστεί από μικρές μεταβολές στον φωτισμό, θόρυβο του αισθητήρα, ανομοιομορφίες του οπίσθιου φωτισμού ή μικρές οπτικές παρεμβολές που προέρχονται από το νερό και το γυάλινο τοίχωμα της δεξαμενής. Αν τα φαινόμενα αυτά δεν περιοριστούν, μπορούν να επηρεάσουν την ανίχνευση ακμών και να οδηγήσουν σε λανθασμένο εντοπισμό του ελεύθερου άκρου του IPMC.

Αρχικά εφαρμόζεται κανονικοποίηση της φωτεινότητας μέσω γραμμικής ενίσχυσης αντίθεσης (linear contrast stretch) μεταξύ του 1ου και του 99ου εκατοστημορίου. Η τεχνική αυτή ανακατανέμει τις τιμές φωτεινότητας της εικόνας έτσι ώστε οι πολύ σκοτεινές και οι πολύ φωτεινές περιοχές να αξιοποιούν καλύτερα το διαθέσιμο δυναμικό εύρος της εικόνας. Η χρήση εκατοστημορίων, αντί της απλής ελάχιστης και μέγιστης τιμής, καθιστά τη διαδικασία πιο ανθεκτική σε μεμονωμένα ακραία pixels που μπορεί να οφείλονται σε θόρυβο ή μικρές αντανakλάσεις. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η αντίθεση μεταξύ του IPMC και του υποβάθρου, χωρίς η εικόνα να επηρεάζεται υπερβολικά από μεμονωμένες μη αντιπροσωπευτικές τιμές φωτεινότητας.

Η κανονικοποίηση της φωτεινότητας βοηθά επίσης στην αντιστάθμιση αργών μεταβολών του φωτισμού και μικρών διακυμάνσεων στην ένταση των LED. Παρότι χρησιμοποιείται σταθερός οπίσθιος φωτισμός, στην πράξη μπορεί να εμφανιστούν μικρές διαφοροποιήσεις λόγω της γεωμετρίας της δεξαμενής, της διάδοσης του φωτός μέσα από το νερό ή της θέσης του δείγματος ως προς την κάμερα. Επομένως, η ενίσχυση αντίθεσης λειτουργεί ως ένα αρχικό στάδιο σταθεροποίησης της εικόνας πριν από την εφαρμογή πιο εξειδικευμένων αλγορίθμων.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ελαφριά εξομάλυνση Gaussian (Gaussian smoothing) με τυπική απόκλιση περίπου $\sigma \approx 1,0-1,2$ pixels. Η εξομάλυνση Gaussian χρησιμοποιείται για τη μείωση μικρών τοπικών διακυμάνσεων της φωτεινότητας, οι οποίες μπορεί να προέρχονται από θόρυβο της κάμερας, μικρές ατέλειες του φωτισμού ή οπτικές παρεμβολές. Η επιλογή ήπιας εξομάλυνσης είναι σημαντική, επειδή ο στόχος δεν είναι να θολώσει η εικόνα, αλλά να μειωθεί ο θόρυβος χωρίς να χαθούν οι έντονες ακμές του περιγράμματος του IPMC. Αν η εξομάλυνση ήταν υπερβολικά ισχυρή, το περίγραμμα του δείγματος θα γινόταν λιγότερο σαφές και η ακρίβεια της ανίχνευσης ακμών θα μπορούσε να μειωθεί.

Μετά την εξομάλυνση δημιουργείται δυαδική μάσκα (binary mask) του ενεργοποιητή μέσω προσαρμοστικής κατωφλίωσης (adaptive thresholding). Η δυαδική μάσκα διαχωρίζει την εικόνα σε δύο

βασικές περιοχές: την περιοχή του αντικειμένου, δηλαδή του IPMC, και την περιοχή του υποβάθρου. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη, επειδή τα επόμενα στάδια του αλγορίθμου βασίζονται στην καθαρή αναγνώριση της γεωμετρίας του δείγματος. Αν ο διαχωρισμός αντικειμένου και υποβάθρου δεν είναι αξιόπιστος, τότε μπορεί να δημιουργηθούν ψευδείς ακμές ή να χαθούν τμήματα του πραγματικού περιγράμματος.

Η προσαρμοστική κατωφλίωση επιλέχθηκε επειδή η φωτεινότητα της εικόνας δεν είναι απαραίτητα απολύτως ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο θέασης. Σε αντίθεση με ένα σταθερό καθολικό κατώφλι, το οποίο εφαρμόζει την ίδια τιμή διαχωρισμού σε ολόκληρη την εικόνα, η προσαρμοστική μέθοδος υπολογίζει τοπικά την τιμή του κατωφλίου. Η τοπική περιοχή υπολογισμού έχει μέγεθος περίπου 25-35 pixels, ώστε το σύστημα να μπορεί να προσαρμόζεται σε μικρές διαφοροποιήσεις φωτεινότητας. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος μπορεί να διατηρεί καλύτερη απόδοση ακόμη και όταν υπάρχουν μικρές ανομοιομορφίες στο υπόβαθρο ή στον φωτισμό.

Ακολουθούν μορφολογικές πράξεις ανοίγματος και κλεισίματος (morphological opening and closing) με δομικό στοιχείο 3×3 . Οι μορφολογικές πράξεις χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της δυαδικής μάσκας μετά την κατωφλίωση. Το μορφολογικό άνοιγμα βοηθά στην απομάκρυνση μικρών απομονωμένων περιοχών που δεν ανήκουν στο πραγματικό δείγμα, όπως μεμονωμένα σημεία θορύβου ή μικρές ψευδείς ανιχνεύσεις. Αντίστοιχα, το μορφολογικό κλείσιμο βοηθά στη συμπλήρωση μικρών κενών μέσα στο περίγραμμα ή στο σώμα του IPMC, τα οποία μπορεί να έχουν προκύψει λόγω ανομοιομορφίας φωτισμού ή τοπικών σφαλμάτων κατωφλίωσης.

Το δομικό στοιχείο 3×3 επιλέγεται επειδή προσφέρει μια ισορροπία μεταξύ καθαρισμού της εικόνας και διατήρησης της γεωμετρίας του δείγματος. Ένα μεγαλύτερο δομικό στοιχείο θα μπορούσε να αλλοιώσει σημαντικά το σχήμα του IPMC ή να μεταβάλει το πραγματικό περίγραμμα, ενώ ένα πολύ μικρότερο δεν θα ήταν αρκετά αποτελεσματικό στην απομάκρυνση θορύβου. Με τη χρήση των μορφολογικών πράξεων προκύπτει μια καθαρότερη και πιο συνεκτική αναπαράσταση του IPMC ως ενιαίας περιοχής μέσα στο καρέ.

Η προεπεξεργασία της εικόνας έχει επομένως καθοριστικό ρόλο στη συνολική λειτουργία του συστήματος. Από τη μία πλευρά, βελτιώνει την ποιότητα της απεικόνισης και αυξάνει την αντίθεση μεταξύ του IPMC και του υποβάθρου. Από την άλλη πλευρά, προετοιμάζει την εικόνα έτσι ώστε τα επόμενα στάδια, όπως η ανίχνευση ακμών, η σκελετοποίηση και ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων, να εφαρμόζονται σε πιο αξιόπιστα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η πιθανότητα λανθασμένου εντοπισμού λόγω θορύβου ή ατελειών της εικόνας.

Επιπλέον, η προεπεξεργασία συμβάλλει στη μείωση του υπολογιστικού φόρτου των επόμενων σταδίων. Αντί ο αλγόριθμος να αναζητά το άκρο του IPMC σε μια εικόνα με πολλές άχρηστες ή θορυβώδεις πληροφορίες, μπορεί να επικεντρωθεί στις περιοχές όπου έχει ήδη εντοπιστεί το πραγματικό περίγραμμα του δείγματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, καθώς κάθε μείωση της περιττής πληροφορίας οδηγεί σε ταχύτερη και πιο σταθερή επεξεργασία.

Συνολικά, η απόκτηση εικόνας και η προεπεξεργασία αποτελούν το πρώτο και απαραίτητο στάδιο της αλγοριθμικής αλυσίδας. Η ποιότητα αυτού του σταδίου επηρεάζει άμεσα την επιτυχία της ανίχνευσης ακμών, του εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων και τελικά της εξαγωγής της χρονοσειράς μετατόπισης. Για τον λόγο αυτό, η προεπεξεργασία δεν αντιμετωπίζεται ως βοηθητικό βήμα, αλλά ως βασικό μέρος της μεθοδολογίας μέτρησης.

2.4.2 Ανίχνευση ακμών και χαρακτηριστικών σημείων

Μετά την προεπεξεργασία της εικόνας και τη δημιουργία της δυαδικής μάσκας, το επόμενο στάδιο αφορά την εξαγωγή του περιγράμματος του δείγματος και τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του ελεύθερου άκρου του IPMC. Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, επειδή η τελική μέτρηση της μετατόπισης βασίζεται στην αξιόπιστη αναγνώριση της θέσης του άκρου σε κάθε καρέ της ακολουθίας.

Από τη δυαδική μάσκα εξάγεται αρχικά το περίγραμμα του δείγματος με χρήση ανίχνευσης ακμών Canny (*Canny edge detection*). Ο αλγόριθμος Canny αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ανίχνευσης ακμών στην επεξεργασία εικόνας. Η βασική του λειτουργία είναι να εντοπίζει περιοχές όπου η φωτεινότητα μεταβάλλεται απότομα, δηλαδή σημεία που πιθανότατα αντιστοιχούν σε όρια αντικειμένων. Στην παρούσα εφαρμογή, τέτοια όρια εμφανίζονται κυρίως στο περίγραμμα του IPMC, όπου το σκοτεινότερο δείγμα διαχωρίζεται από το φωτεινότερο υπόβαθρο που δημιουργείται από τον οπίσθιο φωτισμό.

Η διαδικασία Canny περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια. Αρχικά εφαρμόζεται εξομάλυνση για τη μείωση του θορύβου, ώστε μικρές τυχαίες μεταβολές φωτεινότητας να μην αναγνωριστούν λανθασμένα ως ακμές. Στη συνέχεια υπολογίζεται η κλίση της έντασης της εικόνας, δηλαδή το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η φωτεινότητα σε κάθε σημείο και προς ποια κατεύθυνση. Με βάση αυτή την πληροφορία εντοπίζονται οι περιοχές όπου υπάρχει έντονη μετάβαση από σκοτεινές σε φωτεινές τιμές ή αντίστροφα.

Ακολουθεί η καταστολή μη μέγιστων τιμών (*non-maximum suppression*), η οποία έχει ως στόχο να κάνει τις ακμές πιο λεπτές και πιο σαφείς. Χωρίς αυτό το στάδιο, μια ακμή μπορεί να εμφανίζεται ως παχύτερη περιοχή πολλών pixels, γεγονός που μειώνει την ακρίβεια του περιγράμματος. Με την καταστολή μη μέγιστων τιμών διατηρούνται κυρίως τα σημεία όπου η μεταβολή της φωτεινότητας είναι τοπικά ισχυρότερη, με αποτέλεσμα να προκύπτει πιο καθαρή αναπαράσταση του ορίου του δείγματος.

Στο τελικό στάδιο του Canny εφαρμόζεται διπλό κατώφλι και υστέρηση (*double thresholding and hysteresis*). Το διπλό κατώφλι επιτρέπει τον διαχωρισμό των ισχυρών και των ασθενών ακμών. Οι ισχυρές ακμές διατηρούνται άμεσα, ενώ οι ασθενέστερες διατηρούνται μόνο εφόσον συνδέονται με ισχυρές ακμές. Αυτό βοηθά στην αποφυγή τυχαίων ακμών που οφείλονται σε θόρυβο, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τη διατήρηση πραγματικών τμημάτων του περιγράμματος που μπορεί να εμφανίζονται με μικρότερη ένταση.

Στην παρούσα εργασία, η ανίχνευση ακμών Canny δεν εφαρμόζεται ανεξέλεγκτα σε ολόκληρη την εικόνα, αλλά περιορίζεται στην περιοχή του προσκηνίου που έχει προκύψει από τη δυαδική μάσκα. Ο

περιορισμός αυτός είναι σημαντικός, επειδή μειώνει την πιθανότητα να ανιχνευθούν ακμές που δεν ανήκουν στο IPMC, όπως θόρυβος του υποβάθρου, μικρές ατέλειες του φωτισμού, αντανakλάσεις ή οπτικές παρεμβολές. Με αυτόν τον τρόπο, η αναζήτηση επικεντρώνεται κυρίως στο πραγματικό περίγραμμα του ενεργοποιητή.

Μετά την εξαγωγή του περιγράμματος, η μάσκα του ενεργοποιητή μετατρέπεται σε σκελετό μέσω σκελετοποίησης (*skeletonization*). Η σκελετοποίηση είναι μια διαδικασία που μετατρέπει μια δυαδική περιοχή σε μια λεπτή γραμμική αναπαράσταση, η οποία διατηρεί τη βασική γεωμετρική μορφή του αντικειμένου. Με απλούστερα λόγια, η περιοχή του IPMC συμπυκνώνεται σε μια κεντρική γραμμή που ακολουθεί τη μορφή του δείγματος από την περιοχή πάκτωσης έως το ελεύθερο άκρο.

Η αναπαράσταση αυτή είναι χρήσιμη επειδή μειώνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Αντί ο αλγόριθμος να αναλύει ολόκληρη την επιφάνεια του IPMC μέσα στην εικόνα, μπορεί να χρησιμοποιήσει τη γραμμική του γεωμετρία. Ο σκελετός περιγράφει την κύρια καμπύλη του δείγματος και επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών που βρίσκονται κοντά στο τέλος του ενεργοποιητή. Έτσι, η σκελετοποίηση λειτουργεί ως ενδιάμεσο βήμα μεταξύ της απλής ανίχνευσης περιγράμματος και του τελικού εντοπισμού του άκρου.

Ο σκελετός παραμετροποιείται κατά μήκος του τόξου του, ώστε να μπορεί να διακριθεί η περιοχή που αντιστοιχεί στο πακτωμένο τμήμα από την περιοχή που βρίσκεται κοντά στο ελεύθερο άκρο. Στη συνέχεια διατηρείται μόνο το τελευταίο τμήμα του σκελετού, περίπου το **10-15%** του συνολικού μήκους, το οποίο αντιστοιχεί στην ελεύθερη κάτω περιοχή του ενεργοποιητή. Η επιλογή αυτή μειώνει την πιθανότητα να επιλεγεί λανθασμένα κάποιο σημείο από το κεντρικό ή πακτωμένο τμήμα του IPMC, το οποίο δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό σημείο μέτρησης.

Στην επιλεγμένη περιοχή εφαρμόζεται ο ανιχνευτής γωνιών Harris (*Harris corner detector*). Ο αλγόριθμος Harris χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων της εικόνας, δηλαδή σημείων που παρουσιάζουν έντονη τοπική μεταβολή της φωτεινότητας σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις. Η βασική ιδέα είναι ότι μια απλή ακμή παρουσιάζει έντονη μεταβολή κυρίως προς μία διεύθυνση, ενώ μια γωνία παρουσιάζει σημαντική μεταβολή και στις δύο τοπικές διευθύνσεις της εικόνας. Για τον λόγο αυτό, τα σημεία Harris θεωρούνται πιο διακριτά και πιο σταθερά χαρακτηριστικά σημεία.

Στην παρούσα εφαρμογή, ο Harris δεν χρησιμοποιείται για γενική αναγνώριση αντικειμένων, αλλά για τον εντοπισμό πιθανών σημείων που αντιστοιχούν στο ελεύθερο άκρο του IPMC. Τα υποψήφια σημεία αναζητούνται μόνο μέσα στην ελεύθερη περιοχή του δείγματος που έχει προσδιοριστεί από τον σκελετό. Έτσι, ο αλγόριθμος δεν εξετάζει άσκοπα σημεία που βρίσκονται σε περιοχές όπου δεν μπορεί να βρίσκεται το τελικό άκρο.

Τα υποψήφια σημεία του άκρου ορίζονται ως τα σημεία που εμφανίζουν έντονη γωνιακή απόκριση μέσα στην ελεύθερη περιοχή του ενεργοποιητή. Από αυτά, επιλέγεται ως τελικό άκρο το σημείο που συνδυάζει ισχυρή απόκριση Harris και μεγάλη απόσταση από τη σταθερή βάση του

δείγματος. Η απόσταση από τη βάση είναι σημαντική, επειδή το ελεύθερο άκρο πρέπει να βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο τμήμα του IPMC και όχι σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο του περιγράμματος.

Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος συνδυάζει πληροφορία από διαφορετικά επίπεδα επεξεργασίας. Η δυαδική μάσκα παρέχει την περιοχή του δείγματος, ο Canny εξάγει το περίγραμμα, η σκελετοποίηση προσδιορίζει την κύρια γεωμετρική γραμμή του ενεργοποιητή και ο Harris βοηθά στον εντοπισμό ισχυρών χαρακτηριστικών σημείων κοντά στο άκρο. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών αυξάνει την αξιοπιστία της παρακολούθησης, επειδή η τελική επιλογή του άκρου δεν βασίζεται σε ένα μόνο κριτήριο, αλλά σε γεωμετρική θέση, τοπική γωνιακή απόκριση και σχέση με τη σταθερή βάση.

Η διαδικασία αυτή μειώνει επίσης την πιθανότητα λανθασμένης ανίχνευσης λόγω θορύβου ή μικρών ατελειών της εικόνας. Τυχαίες ακμές ή μεμονωμένα σημεία υψηλής αντίθεσης μπορεί να εμφανιστούν στο υπόβαθρο ή σε περιοχές του δείγματος που δεν αντιστοιχούν στο άκρο. Επειδή όμως ο αλγόριθμος περιορίζει την αναζήτηση στην ελεύθερη περιοχή του IPMC και λαμβάνει υπόψη την απόσταση από τη βάση, τα σημεία αυτά απορρίπτονται πιο εύκολα. Έτσι, η τελική θέση του άκρου προκύπτει με μεγαλύτερη σταθερότητα μεταξύ διαδοχικών καρέ.

Συνολικά, η ανίχνευση ακμών και χαρακτηριστικών σημείων αποτελεί κρίσιμο στάδιο της μεθοδολογίας. Η ποιότητα αυτού του σταδίου επηρεάζει άμεσα την επιτυχία της επόμενης διαδικασίας, δηλαδή της γεωμετρικής πρόβλεψης και της προσαρμοστικής αναζήτησης βασισμένης σε πλέγμα. Για τον λόγο αυτό, η ανίχνευση του περιγράμματος και των χαρακτηριστικών σημείων δεν αντιμετωπίζεται ως απλό βοηθητικό βήμα, αλλά ως βασικό μέρος της συνολικής αλυσίδας μέτρησης της μετατόπισης.

2.4.3 Γεωμετρικός περιορισμός σταθερού μήκους

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της παρακολούθησης χρησιμοποιείται γεωμετρικός περιορισμός σταθερού μήκους. Ο περιορισμός αυτός βασίζεται στη φυσική συμπεριφορά του IPMC κατά τη διάρκεια της διέγερσης. Το δείγμα παρουσιάζει κυρίως κάμψη, ενώ το συνολικό του μήκος δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά κατά τη διάρκεια της κίνησης. Επομένως, η απόσταση μεταξύ της σταθερής βάσης και του ελεύθερου άκρου μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σταθερή.

Η παραδοχή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή μειώνει σημαντικά το πλήθος των πιθανών θέσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το άκρο. Αν ο αλγόριθμος βασιζόταν αποκλειστικά σε τοπικά χαρακτηριστικά της εικόνας, όπως ακμές ή γωνίες, θα υπήρχε μεγαλύτερη πιθανότητα λανθασμένης επιλογής λόγω θορύβου, αντανάκλασεων ή μικρών ατελειών του περιγράμματος. Με τον περιορισμό σταθερού μήκους, η αναζήτηση περιορίζεται σε θέσεις που είναι γεωμετρικά συμβατές με την πραγματική μορφή του δείγματος.

Έστω ότι A είναι το σταθερό σημείο βάσης του ενεργοποιητή και L το μήκος του IPMC, το οποίο μετράται στο πρώτο καρέ και θεωρείται σταθερό κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η θέση του ελεύθερου άκρου στο χρονικό βήμα t συμβολίζεται ως:

$$p_t$$

ενώ η θέση του στο προηγούμενο καρέ συμβολίζεται ως:

$$p_{t-1}$$

Το στιγμιαίο διάνυσμα μετατόπισης δίνεται από τη σχέση:

$$d_t = p_t - p_{t-1} \quad (2.1)$$

Με βάση την πρόσφατη κίνηση, μπορεί να υπολογιστεί μια αρχική πρόβλεψη της επόμενης θέσης του άκρου μέσω γραμμικής προέκτασης:

$$\tilde{p}_{t+1} = p_t + d_t \quad (2.2)$$

Η πρόβλεψη αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι, για μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών καρέ, η κίνηση του άκρου δεν μεταβάλλεται απότομα. Η παραδοχή αυτή είναι λογική για τις χαμηλές συχνότητες ενεργοποίησης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, όπου η μετατόπιση του άκρου από καρέ σε καρέ παραμένει σχετικά μικρή.

Ωστόσο, η αρχική προβλεπόμενη θέση δεν αρκεί από μόνη της, επειδή μπορεί να επηρεαστεί από μικρά σφάλματα εντοπισμού στο προηγούμενο καρέ ή από στιγμιαίες μεταβολές της τροχιάς. Για τον λόγο αυτό, η πρόβλεψη διορθώνεται με βάση τον γεωμετρικό περιορισμό σταθερού μήκους. Εφόσον το άκρο πρέπει να παραμένει σε απόσταση L από τη σταθερή βάση A , οι πιθανές θέσεις του περιορίζονται πάνω σε κύκλο με κέντρο το A και ακτίνα L :

$$\mathcal{C} = \{x \in \mathbb{R}^2: \|x - A\| = L\} \quad (2.3)$$

Η τελική προβλεπόμενη θέση προκύπτει προβάλλοντας την αρχική εκτίμηση πάνω στον κύκλο αυτό:

$$\hat{p}_{t+1} = A + L \frac{\tilde{p}_{t+1} - A}{\|\tilde{p}_{t+1} - A\|} \quad (2.4)$$

Με τον τρόπο αυτό, η πρόβλεψη παραμένει συμβατή με τη φυσική γεωμετρία του δείγματος. Αν η αρχική εκτίμηση βρίσκεται ελαφρώς εκτός της γεωμετρικά αποδεκτής περιοχής, η προβολή την επαναφέρει σε θέση που αντιστοιχεί σε σταθερό μήκος IPMC. Έτσι, ο αλγόριθμος δεν αποδέχεται αυθαίρετα οποιαδήποτε πιθανή θέση του άκρου, αλλά την περιορίζει σε περιοχές που είναι σύμφωνες με τη μορφή και την κίνηση του ενεργοποιητή.

Ο γεωμετρικός περιορισμός δεν χρησιμοποιείται για να επιβάλει τεχνητά την τελική θέση του άκρου. Η τελική επιλογή εξακολουθεί να βασίζεται στα πραγματικά χαρακτηριστικά της εικόνας, δηλαδή στις ακμές, στα χαρακτηριστικά σημεία και στην τοπική γωνιακή απόκριση. Ο ρόλος του

περιορισμού είναι να καθοδηγεί την αναζήτηση και να μειώνει την πιθανότητα επιλογής λανθασμένων σημείων που δεν είναι συμβατά με την κίνηση του IPMC.

Η χρήση αυτού του περιορισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν θορυβώδεις περιοχές, ατελείς ακμές ή μικρές διακυμάνσεις στην ποιότητα της εικόνας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ένας αλγόριθμος που βασίζεται μόνο στην ισχυρότερη τοπική απόκριση θα μπορούσε να επιλέξει λάθος σημείο. Αντίθετα, ο συνδυασμός οπτικής πληροφορίας και γεωμετρικού περιορισμού επιτρέπει πιο σταθερή παρακολούθηση μεταξύ διαδοχικών καρέ.

Επιπλέον, ο περιορισμός σταθερού μήκους συμβάλλει άμεσα στη μείωση του υπολογιστικού φόρτου. Εφόσον οι πιθανές θέσεις του άκρου περιορίζονται σε συγκεκριμένη γεωμετρική περιοχή, ο αλγόριθμος δεν χρειάζεται να αναζητά το άκρο σε όλο το καρέ. Αυτό συνδέεται άμεσα με την επόμενη φάση της μεθόδου, δηλαδή την προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα, όπου εξετάζονται μόνο οι πιθανότερες περιοχές της εικόνας.

Συνολικά, ο γεωμετρικός περιορισμός σταθερού μήκους λειτουργεί ως ενδιάμεσος μηχανισμός ανάμεσα στην πρόβλεψη της κίνησης και στην τελική αναζήτηση του άκρου. Αξιοποιεί τη φυσική ιδιότητα του IPMC να κάμπτεται χωρίς ουσιαστική μεταβολή του μήκους του και μετατρέπει αυτή την ιδιότητα σε πρακτικό περιορισμό αναζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η αξιοπιστία, η σταθερότητα και η ταχύτητα του αλγορίθμου παρακολούθησης.

2.4.4 Προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα

Μετά τον υπολογισμό της προβλεπόμενης θέσης του ελεύθερου άκρου, εφαρμόζεται προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα (*grid-based adaptive search*). Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να εξετάζεται ολόκληρη η εικόνα σε κάθε καρέ. Αντίθετα, η αναζήτηση μπορεί να περιοριστεί σε συγκεκριμένες περιοχές όπου είναι πιο πιθανό να βρίσκεται το άκρο του IPMC, με βάση την προηγούμενη θέση του, την πρόσφατη τροχιά του και τον γεωμετρικό περιορισμό σταθερού μήκους.

Για τον σκοπό αυτό, το καρέ χωρίζεται σε επιμέρους ορθογώνιες περιοχές ή κελιά πλέγματος (*grid cells*). Κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα μικρότερο τμήμα της εικόνας, μέσα στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί τοπική αναζήτηση χαρακτηριστικών σημείων. Η διαίρεση της εικόνας σε κελιά μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο, επειδή ο αλγόριθμος δεν χρειάζεται να επεξεργαστεί όλα τα pixels του καρέ, αλλά μόνο τις περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα να περιέχουν το πραγματικό άκρο.

Η επιλογή των υποψήφιων κελιών δεν γίνεται τυχαία. Αρχικά, χρησιμοποιείται η προβλεπόμενη θέση του άκρου, η οποία προκύπτει από την προηγούμενη κίνηση του δείγματος. Το κελί που περιέχει αυτή την προβλεπόμενη θέση λαμβάνει την υψηλότερη προτεραιότητα. Στη συνέχεια, λαμβάνονται υπόψη τα γειτονικά κελιά, ιδιαίτερα εκείνα που βρίσκονται κοντά στον γεωμετρικό κύκλο πιθανών θέσεων που ορίζεται από το σταθερό μήκος του IPMC. Με αυτόν τον τρόπο, η αναζήτηση παραμένει περιορισμένη σε φυσικά εφικτές περιοχές της εικόνας.

Η προσαρμοστικότητα της μεθόδου είναι σημαντική επειδή η πρόβλεψη της θέσης του άκρου δεν είναι πάντοτε απόλυτα ακριβής. Σε κανονικές συνθήκες, όταν η κίνηση του IPMC είναι ομαλή και χαμηλής συχνότητας, το άκρο εντοπίζεται συνήθως στο πρώτο ή στα πρώτα υποψήφια κελιά. Σε περιπτώσεις όμως όπου υπάρχει μικρή απόκλιση της πρόβλεψης, θόρυβος στην εικόνα ή στιγμιαία αλλαγή της τροχιάς, ο αλγόριθμος επεκτείνει σταδιακά την αναζήτηση σε γειτονικά κελιά. Έτσι, αποφεύγεται η πλήρης αποτυχία εντοπισμού όταν το άκρο δεν βρίσκεται ακριβώς στην αρχικά προβλεπόμενη θέση.

Η επέκταση της αναζήτησης πραγματοποιείται σταδιακά, ξεκινώντας από το κελί με τη μεγαλύτερη πιθανότητα και προχωρώντας προς γειτονικές περιοχές. Η διαδικασία αυτή μοιάζει με αναζήτηση σε διαδοχικούς δακτυλίους γύρω από την προβλεπόμενη θέση. Σε κάθε βήμα εξετάζονται μόνο τα κελιά που παραμένουν συμβατά με τον γεωμετρικό περιορισμό και με την πρόσφατη τροχιά του άκρου. Με τον τρόπο αυτό, η μέθοδος διατηρεί ισορροπία ανάμεσα στην ταχύτητα και στην αξιοπιστία: ξεκινά από τη μικρότερη δυνατή περιοχή αναζήτησης, αλλά μπορεί να επεκταθεί όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Μέσα σε κάθε υποψήφιο κελί εξετάζονται τα διαθέσιμα σημεία του περιγράμματος και οι αποκρίσεις χαρακτηριστικών σημείων που έχουν υπολογιστεί στα προηγούμενα στάδια. Το καλύτερο υποψήφιο σημείο επιλέγεται με βάση συνδυασμό κριτηρίων, όπως η ένταση της γωνιακής απόκρισης, η απόσταση από τη σταθερή βάση και η συμβατότητα με την προβλεπόμενη θέση. Έτσι, η τελική επιλογή του άκρου δεν βασίζεται αποκλειστικά στη μεγαλύτερη τοπική απόκριση, αλλά λαμβάνει υπόψη και τη φυσική γεωμετρία του δείγματος.

Η προσέγγιση αυτή προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με την πλήρη αναζήτηση σε ολόκληρο το καρέ (*full-frame search*). Η πλήρης αναζήτηση είναι πιο απλή ως λογική, αλλά απαιτεί πολύ μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας, επειδή εξετάζει περιοχές της εικόνας όπου είναι πρακτικά απίθανο να βρίσκεται το άκρο. Αντίθετα, η προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα αξιοποιεί την πληροφορία των προηγούμενων καρέ και τη γεωμετρία του IPMC, περιορίζοντας την επεξεργασία στις πιο πιθανές περιοχές.

Επιπλέον, η μέθοδος είναι κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, επειδή ο χρόνος επεξεργασίας μπορεί να παραμείνει χαμηλός όταν η πρόβλεψη είναι επιτυχής. Σε ένα σύστημα που καταγράφει βίντεο με σταθερό ρυθμό, όπως 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο, η μείωση του χρόνου αναζήτησης είναι κρίσιμη. Όσο λιγότερες περιοχές εξετάζονται σε κάθε καρέ, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ο αλγόριθμος να ολοκληρώνει την επεξεργασία πριν φτάσει το επόμενο καρέ.

Συνολικά, η προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα λειτουργεί ως μηχανισμός επιτάχυνσης και σταθεροποίησης της παρακολούθησης. Συνδυάζει την πρόβλεψη της κίνησης, τον γεωμετρικό περιορισμό σταθερού μήκους και την τοπική ανάλυση χαρακτηριστικών σημείων, ώστε να εντοπίζεται το ελεύθερο άκρο του IPMC με μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Με αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος υποστηρίζει τη δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να θυσιάζει την αξιοπιστία του εντοπισμού.

2.4.5 Εξαγωγή χρονοσειράς μετατόπισης

Μετά τον εντοπισμό του ελεύθερου άκρου του IPMC σε κάθε καρέ, η θέση του αποθηκεύεται ως ζεύγος συντεταγμένων στην εικόνα. Οι συντεταγμένες αυτές εκφράζονται αρχικά σε εικονοστοιχεία (pixels) και αντιστοιχούν στη στιγμιαία θέση του άκρου στο επίπεδο απεικόνισης. Με την επανάληψη της ίδιας διαδικασίας σε όλα τα διαδοχικά καρέ του βίντεο, δημιουργείται μια ακολουθία θέσεων, η οποία περιγράφει την κίνηση του άκρου στον χρόνο.

Η αρχική πληροφορία που προκύπτει από τον αλγόριθμο είναι επομένως χωρική, αλλά όχι ακόμη σε πραγματικές μονάδες μήκους. Για να μετατραπεί σε φυσική μετατόπιση, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές βαθμονόμησης του οπτικού συστήματος, οι οποίοι εκφράζουν πόσα μικρόμετρα αντιστοιχούν σε κάθε pixel στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα. Έτσι, οι μεταβολές της θέσης του άκρου από καρέ σε καρέ μπορούν να μετατραπούν από pixels σε μm ή mm , ανάλογα με την κλίμακα παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Η μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί είτε ως μεταβολή ως προς την αρχική θέση του άκρου είτε ως μεταβολή μεταξύ διαδοχικών καρέ. Στην πρώτη περίπτωση, η θέση του άκρου στο αρχικό καρέ χρησιμοποιείται ως θέση αναφοράς και όλες οι επόμενες θέσεις εκφράζονται σε σχέση με αυτήν. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η συνολική μετατόπιση του άκρου κατά τη διάρκεια της διέγερσης. Στη δεύτερη περίπτωση, η διαφορά μεταξύ δύο συνεχόμενων θέσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της στιγμιαίας μεταβολής της κίνησης.

Η χρονική πληροφορία προκύπτει από τον ρυθμό λήψης της κάμερας. Εφόσον η καταγραφή πραγματοποιείται με συγκεκριμένο αριθμό καρέ ανά δευτερόλεπτο (frames per second - fps), κάθε καρέ μπορεί να αντιστοιχιστεί σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, σε λήψη 30 fps, το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών καρέ είναι περίπου 33,3 ms. Έτσι, η ακολουθία των θέσεων του άκρου μετατρέπεται σε χρονοσειρά μετατόπισης (displacement time series), όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο χρόνο.

Η τελική χρονοσειρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του IPMC υπό ηλεκτρική διέγερση. Μέσα από αυτήν είναι δυνατόν να εξεταστούν χαρακτηριστικά όπως το εύρος της μετατόπισης, η περιοδικότητα της κίνησης, η απόκριση του δείγματος σε διαφορετικές συχνότητες και η σταθερότητα της παρακολούθησης. Επιπλέον, η χρονοσειρά μπορεί να συγκριθεί με το ηλεκτρικό σήμα διέγερσης ή με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές μετρήσεις, ώστε να μελετηθεί η σχέση μεταξύ ηλεκτρικής εισόδου και μηχανικής απόκρισης.

Η εξαγωγή της χρονοσειράς μετατόπισης αποτελεί επομένως το τελικό στάδιο της αλγοριθμικής αλυσίδας. Τα προηγούμενα στάδια, δηλαδή η προεπεξεργασία εικόνας, η ανίχνευση ακμών, ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων, ο γεωμετρικός περιορισμός και η προσαρμοστική αναζήτηση, έχουν ως στόχο να οδηγήσουν σε αξιόπιστη εκτίμηση της θέσης του άκρου. Το στάδιο αυτό μετατρέπει τις διαδοχικές θέσεις σε μετρήσιμη φυσική πληροφορία, επιτρέποντας την ποσοτική αξιολόγηση της κίνησης του IPMC.

Κεφάλαιο 3ο: Πειραματική Αξιολόγηση του Οπτικού Μικροσκοπικού Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα αξιολόγησης του οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης. Η αξιολόγηση επικεντρώνεται στη χωρική ανάλυση της διάταξης, στη σταθερότητα της οπτικής μεγέθυνσης, στην υπολογιστική απόδοση του αλγορίθμου παρακολούθησης, στην ακρίβεια εντοπισμού του ελεύθερου άκρου του IPMC και στη λειτουργία του κυκλώματος προστασίας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σημαντικά, διότι δείχνουν αν η προτεινόμενη διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για απλή παρατήρηση, αλλά και για ποσοτική μέτρηση μικρομετατοπίσεων σε πραγματικές πειραματικές συνθήκες.

3.1 Χωρική ανάλυση του συστήματος

Η χωρική ανάλυση ή, ακριβέστερα, η χωρική δειγματοληψία (spatial sampling) του μικροσκοπικού συστήματος προσδιορίστηκε με σκοπό να υπολογιστεί η πραγματική διάσταση που αντιστοιχεί σε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της εικόνας. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη, διότι ο αλγόριθμος εντοπισμού του άκρου υπολογίζει αρχικά τη θέση του IPMC σε εικονοστοιχεία, τα οποία στη συνέχεια πρέπει να μετατραπούν σε πραγματικές μονάδες μήκους.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε βαθμονομημένη μικρομετρική αντικειμενοφόρος πλάκα (calibrated micrometer slide) με υποδιαιρέσεις 10 μm , δηλαδή 0,01 mm. Η μικρομετρική κλίμακα τοποθετήθηκε μέσα στη γυάλινη δεξαμενή γεμάτη με απιονισμένο νερό, στην ίδια περίπου θέση και στο ίδιο βάθος με το δείγμα IPMC. Με αυτόν τον τρόπο, η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε υπό τις ίδιες οπτικές συνθήκες με τις πραγματικές πειραματικές μετρήσεις. Συνεπώς, η επίδραση του νερού, του γυάλινου τοιχώματος και της διάθλασης συμπεριλαμβάνεται ήδη στον υπολογισμό του συντελεστή μετατροπής από pixels σε πραγματικό μήκος.

Η κάμερα κατέγραφε εικόνες ανάλυσης 1920×1080 pixels. Από τη μικρομετρική βαθμονόμηση προέκυψε ότι το πεδίο θέασης (field of view - FOV) του συστήματος ήταν περίπου 1,03 mm στον οριζόντιο άξονα και 0,56 mm στον κατακόρυφο άξονα. Επομένως, η χωρική δειγματοληψία στον οριζόντιο άξονα υπολογίζεται ως:

$$S_x = \frac{1,03 \text{ mm}}{1920 \text{ pixels}} \quad (3.1)$$

δηλαδή:

$$S_x = 0,536 \mu\text{m}/\text{pixel}$$

Αντίστοιχα, για τον κατακόρυφο άξονα:

$$S_y = \frac{0,56 \text{ mm}}{1080 \text{ pixels}} \quad (3.2)$$

οπότε:

$$S_y = 0,518 \text{ } \mu\text{m/pixel}$$

Οι τελικές τιμές που προέκυψαν ήταν $0,536 \pm 0,001 \text{ } \mu\text{m/pixel}$ στον οριζόντιο άξονα και $0,518 \pm 0,001 \text{ } \mu\text{m/pixel}$ στον κατακόρυφο άξονα. Οι τιμές αυτές βασίστηκαν σε 100 ανεξάρτητες μετρήσεις, από τις οποίες υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης. Η μικρή διακύμανση των μετρήσεων δείχνει ότι η οπτική βαθμονόμηση ήταν σταθερή και επαναλήψιμη.

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το σύστημα επιτυγχάνει χωρική δειγματοληψία της τάξης του $0,5 \text{ } \mu\text{m/pixel}$, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για την παρακολούθηση πολύ μικρών μετατοπίσεων του ελεύθερου άκρου του IPMC. Παρότι η τιμή $\mu\text{m/pixel}$ δεν ταυτίζεται απόλυτα με την τελική μετρητική ακρίβεια του συστήματος, αποτελεί βασική ένδειξη της ικανότητας της διάταξης να καταγράφει μικρές γεωμετρικές μεταβολές στην εικόνα. Η πραγματική ακρίβεια εξαρτάται επιπλέον από την ποιότητα της εικόνας, την ευκρίνεια του περιγράμματος, τη σταθερότητα του φωτισμού και την απόδοση του αλγορίθμου εντοπισμού.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι απεικόνισης και χωρική δειγματοληψία του μικροσκοπικού συστήματος.

Πηγή: Προσαρμοσμένο από [34].

Παράμετρος	Τιμή
Υποδιαίρεσεις αντικειμενοφόρου πλάκας	10 μm (0,01 mm)
Μέγεθος εικόνας	1920×1080
Οπτικό πεδίο (FOV)	1,03 mm (W) × 0,56 mm (H)
Χωρική ανάλυση κατά πλάτος (Width)	$0,536 \pm 0,001 \text{ } \mu\text{m/pixel}$
Χωρική ανάλυση κατά ύψος (Height)	$0,518 \pm 0,001 \text{ } \mu\text{m/pixel}$

3.2 Παραμόρφωση φακού και σταθερότητα μεγέθυνσης

Εκτός από τη χωρική δειγματοληψία, σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία του οπτικού μικροσκοπικού συστήματος έχει και η παραμόρφωση του φακού (lens distortion). Η παραμόρφωση αυτή μπορεί να προκαλέσει μικρές διαφορές στη γεωμετρική απεικόνιση του δείγματος, ιδιαίτερα όταν

το σημείο ενδιαφέροντος μετακινείται από την κεντρική περιοχή της εικόνας προς τα άκρα του πεδίου θέασης. Για τον λόγο αυτό, αξιολογήθηκε η σταθερότητα της γεωμετρικής μεγέθυνσης σε όλο το πεδίο θέασης (field of view - FOV).

Η μέγιστη απόκλιση που καταγράφηκε στα άκρα της εικόνας ήταν $+0,015 \mu\text{m}/\text{pixel}$, τιμή που αντιστοιχεί περίπου σε $+2,8\%$ σε σχέση με την κεντρική περιοχή της εικόνας. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι το οπτικό σύστημα διατηρεί σχετικά ομοιόμορφη μεγέθυνση σε όλο το πεδίο θέασης, με περιορισμένη γεωμετρική παραμόρφωση.

Η περιορισμένη παραμόρφωση του φακού είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, επειδή η μετατόπιση του ελεύθερου άκρου του IPMC υπολογίζεται μέσα από διαδοχικές θέσεις στην εικόνα. Αν η μεγέθυνση μεταβαλλόταν έντονα από περιοχή σε περιοχή, τότε η ίδια πραγματική μετατόπιση θα αντιστοιχούσε σε διαφορετικό αριθμό εικονοστοιχείων ανάλογα με τη θέση του δείγματος μέσα στο καρέ. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε συστηματικό σφάλμα στη μετατροπή των pixels σε πραγματικές μονάδες μήκους.

Με βάση τα αποτελέσματα, η γεωμετρική σταθερότητα της διάταξης θεωρείται επαρκής για τη μέτρηση μικρομετατοπίσεων στην περιοχή λειτουργίας που εξετάστηκε. Παρότι η παραμόρφωση δεν μηδενίζεται πλήρως, η μέγιστη απόκλιση περίπου $2,8\%$ είναι σχετικά περιορισμένη και μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή για την παρακολούθηση του ελεύθερου άκρου του IPMC, ιδιαίτερα όταν η κίνηση πραγματοποιείται κυρίως μέσα στο κεντρικό και ελεγχόμενο τμήμα του πεδίου θέασης.

Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι η οπτική διάταξη δεν προσφέρει μόνο υψηλή χωρική δειγματοληψία, αλλά και ικανοποιητική σταθερότητα μεγέθυνσης. Επομένως, η ακρίβεια της μέτρησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή $\mu\text{m}/\text{pixel}$, αλλά και από το κατά πόσο η τιμή αυτή παραμένει σταθερή σε διαφορετικές περιοχές της εικόνας. Στην παρούσα διάταξη, η περιορισμένη παραμόρφωση του φακού υποστηρίζει την αξιοπιστία του συστήματος ως εργαλείου ποσοτικής οπτικής μέτρησης.

3.3 Χρόνος επεξεργασίας και δυνατότητα πραγματικού χρόνου

Η αξιολόγηση της υπολογιστικής απόδοσης του αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή το σύστημα δεν στοχεύει μόνο στην εκ των υστέρων ανάλυση εικόνων, αλλά και στη δυνατότητα παρακολούθησης της μετατόπισης σε πραγματικό χρόνο (real-time monitoring). Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκε ο χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για τον εντοπισμό του ελεύθερου άκρου του IPMC σε καρέ ανάλυσης $1920 \times 1080 \text{ pixels}$.

Για την αξιολόγηση συγκρίθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται σε πλήρη αναζήτηση σε ολόκληρο το καρέ (full-frame search), όπου ο αλγόριθμος εξετάζει όλη την εικόνα για να εντοπίσει το άκρο του IPMC. Η μέθοδος αυτή, αν και απλή ως προς τη λογική της, απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, καθώς η αναζήτηση πραγματοποιείται σε μεγάλη περιοχή εικόνας. Στην πράξη, η πλήρης αναζήτηση απαιτούσε περίπου 200 ms ανά καρέ, τιμή που αντιστοιχεί σε ρυθμό επεξεργασίας περίπου 5 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Επομένως, η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, ειδικά όταν η κάμερα καταγράφει στα 30 fps .

Η δεύτερη μέθοδος είναι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρακολούθησης βασισμένος σε πλέγμα (grid-based tip tracking algorithm). Σε αυτή την περίπτωση, η αναζήτηση δεν πραγματοποιείται σε ολόκληρη την εικόνα, αλλά περιορίζεται σε επιλεγμένες περιοχές όπου είναι πιθανότερο να βρίσκεται το άκρο του IPMC. Η επιλογή αυτών των περιοχών βασίζεται στην προηγούμενη θέση του άκρου, στη γεωμετρική υπόθεση σταθερού μήκους και στην πρόσφατη τροχιά του δείγματος. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των σημείων που πρέπει να εξεταστούν σε κάθε καρέ.

Όταν το άκρο του IPMC εντοπιζόταν στην πρώτη υποψήφια περιοχή αναζήτησης, ο μέσος χρόνος επεξεργασίας ήταν περίπου 10 ms ανά καρέ. Η τιμή αυτή είναι συμβατή με λειτουργία πραγματικού χρόνου, καθώς είναι μικρότερη από το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών καρέ σε καταγραφή 30 fps, το οποίο είναι περίπου 33,3 ms. Ακόμη και όταν η πρόβλεψη της θέσης δεν ήταν πλήρως ακριβής και ο αλγόριθμος έπρεπε να επεκτείνει την αναζήτηση σε δεύτερη ή τρίτη περιοχή, ο χρόνος επεξεργασίας αυξανόταν περίπου στα 20 ms και 30 ms αντίστοιχα, παραμένοντας κοντά στις απαιτήσεις λειτουργίας πραγματικού χρόνου.

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η χρήση της προσαρμοστικής αναζήτησης βασισμένης σε πλέγμα μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με την πλήρη αναζήτηση σε ολόκληρο το καρέ. Η βελτίωση αυτή είναι κρίσιμη για πρακτικές εφαρμογές, επειδή επιτρέπει στο σύστημα να παρακολουθεί τη μετατόπιση του IPMC κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, χωρίς να απαιτείται ακριβός ή ιδιαίτερα ισχυρός υπολογιστικός εξοπλισμός.

Επιπλέον, εξετάστηκε η δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του χρόνου επεξεργασίας μέσω παράλληλης εκτέλεσης. Η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίστηκε σε επιμέρους υποπεριοχές, οι οποίες μπορούσαν να επεξεργαστούν ταυτόχρονα σε διαφορετικούς πυρήνες. Η προσέγγιση αυτή οδήγησε σε μείωση περίπου 42% στον χρόνο που απαιτείται για τον εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων, διατηρώντας τον συνολικό χρόνο επεξεργασίας κοντά στον στόχο των 10 ms ανά καρέ. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι ο αλγόριθμος μπορεί να αξιοποιήσει πολυπύρηνες υπολογιστικές μονάδες χαμηλής κατανάλωσης, γεγονός που είναι σημαντικό για μελλοντική ενσωμάτωση σε πιο αυτόνομα ή φορητά συστήματα μέτρησης.

Συνολικά, η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει σημαντική επιτάχυνση σε σχέση με την πλήρη αναζήτηση, διατηρώντας παράλληλα τη δυνατότητα αξιόπιστου εντοπισμού του άκρου. Η επίδοση αυτή επιβεβαιώνει ότι η προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα αποτελεί κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές όπου απαιτείται συνδυασμός υψηλής χωρικής ακρίβειας και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

3.4 Ακρίβεια εντοπισμού του άκρου

Η ακρίβεια εντοπισμού του ελεύθερου άκρου του IPMC αποτελεί βασικό κριτήριο αξιολόγησης του προτεινόμενου αλγορίθμου, καθώς η τελική χρονοσειρά μετατόπισης βασίζεται στη σωστή αναγνώριση της θέσης του άκρου σε κάθε καρέ. Για τον λόγο αυτό, αξιολογήθηκε η ικανότητα του αλγορίθμου να εντοπίζει αξιόπιστα το άκρο του δείγματος υπό τυπικές συνθήκες ενεργοποίησης.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες κίνησης κάτω από 2 Hz, οι οποίες αντιστοιχούν σε συνηθισμένες συνθήκες λειτουργίας ενεργοποιητών IPMC. Σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων, η μεταβολή της θέσης του άκρου μεταξύ διαδοχικών καρέ παραμένει αρκετά μικρή ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά η πληροφορία της προηγούμενης θέσης. Αυτό επιτρέπει στον αλγόριθμο να περιορίζει την αναζήτηση σε μικρότερη περιοχή της εικόνας, χωρίς να χάνεται η πραγματική θέση του άκρου.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βασίζεται σε συνδυασμό προβλεπτικής αναζήτησης, γεωμετρικού περιορισμού σταθερού μήκους και προσαρμοστικής επέκτασης της περιοχής αναζήτησης. Όταν η αρχική πρόβλεψη είναι ακριβής, το άκρο εντοπίζεται μέσα στις πρώτες υποψήφιες περιοχές του πλέγματος. Αν η πρόβλεψη αποκλίνει λόγω απότομης μεταβολής της κίνησης ή τοπικών δυσκολιών στην εικόνα, η αναζήτηση επεκτείνεται σε γειτονικά κελιά, αυξάνοντας την πιθανότητα σωστού εντοπισμού.

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας εξετάστηκε η απόδοση του αλγορίθμου ανάλογα με τον αριθμό των υποψήφιων περιοχών αναζήτησης που επιτρεπόταν να εξεταστούν. Όταν η αναζήτηση μπορούσε να επεκταθεί έως τις πρώτες πέντε υποψήφιες περιοχές, η ακρίβεια εντοπισμού σε επίπεδο καρέ έφτασε περίπου το 99,4%. Όταν η αναζήτηση περιορίστηκε στις πρώτες τρεις περιοχές, η ακρίβεια παρέμεινε υψηλή, περίπου 98,3%. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η πραγματική θέση του άκρου βρίσκεται, στη μεγάλη πλειονότητα των καρέ, πολύ κοντά στην περιοχή που προβλέπει ο αλγόριθμος.

Η υψηλή ακρίβεια εντοπισμού επιβεβαιώνει ότι ο συνδυασμός γεωμετρικού περιορισμού και προσαρμοστικής αναζήτησης είναι αποτελεσματικός για την παρακολούθηση της κίνησης του IPMC. Ο περιορισμός σταθερού μήκους μειώνει τις πιθανές θέσεις του άκρου σε φυσικά αποδεκτές περιοχές, ενώ το πλέγμα περιορίζει τον υπολογιστικό φόρτο. Παράλληλα, η δυνατότητα επέκτασης της αναζήτησης σε γειτονικά κελιά προστατεύει τον αλγόριθμο από αποτυχίες που θα μπορούσαν να προκύψουν λόγω μικρών σφαλμάτων πρόβλεψης ή τοπικών αλλοιώσεων της εικόνας.

Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση της ανάλυσης του πλέγματος στην ταχύτητα και την αξιοπιστία του αλγορίθμου. Η διάταξη πλέγματος 6×8 , δηλαδή 48 περιοχές με διαστάσεις περίπου 240×180 pixels, παρουσίασε καλή ισορροπία μεταξύ ταχύτητας και σταθερότητας. Σε αυτή τη διαμόρφωση, το άκρο εντοπιζόταν συνήθως μέσα στις πρώτες δύο ή τρεις περιοχές, με μέσο χρόνο επεξεργασίας περίπου 10 ms ανά καρέ.

Αξιολογήθηκε επίσης πιο πυκνό πλέγμα 10×20 , δηλαδή 200 περιοχές μικρότερου μεγέθους. Η διαμόρφωση αυτή μπορούσε να μειώσει τον χρόνο επεξεργασίας όταν η πρόβλεψη ήταν πολύ ακριβής, επειδή κάθε περιοχή είχε μικρότερο μέγεθος. Ωστόσο, όταν η πρόβλεψη αποτύγχανε, ο αριθμός των περιοχών που έπρεπε να εξεταστούν αυξανόταν σημαντικά, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας να μπορεί να αυξηθεί απότομα. Επομένως, το πυκνότερο πλέγμα ήταν πλεονεκτικό μόνο όταν η ακρίβεια πρόβλεψης ήταν ιδιαίτερα υψηλή.

Αντίθετα, ένα πιο αραιό πλέγμα 3×4 , δηλαδή 12 περιοχές μεγαλύτερου μεγέθους, παρουσίασε πιο σταθερή συμπεριφορά όταν η πρόβλεψη αποκλίνει από την πραγματική τροχιά του άκρου. Ωστόσο,

επειδή κάθε περιοχή ήταν μεγαλύτερη, ο υπολογιστικός φόρτος ανά περιοχή ήταν αυξημένος, με αποτέλεσμα πιο αργό μέσο χρόνο επεξεργασίας σε σχέση με το πλέγμα 6×8 . Συνολικά, η διαμόρφωση 6×8 θεωρήθηκε η πιο κατάλληλη, επειδή προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ ακρίβειας, ταχύτητας και ανθεκτικότητας σε μικρές αποκλίσεις της πρόβλεψης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να παρακολουθεί αξιόπιστα το ελεύθερο άκρο του IPMC σε πραγματικό χρόνο, διατηρώντας υψηλή ακρίβεια εντοπισμού και χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές όπου απαιτείται συνεχής παρακολούθηση μικρομετατοπίσεων, χωρίς την ανάγκη πλήρους ανάλυσης ολόκληρου του καρέ σε κάθε χρονική στιγμή.

3.5 Αξιολόγηση κυκλώματος προστασίας

Η αξιολόγηση του κυκλώματος προστασίας πραγματοποιήθηκε με σκοπό να επιβεβαιωθεί ότι το σύστημα μπορεί να αναγνωρίζει εγκαίρως κρίσιμες συνθήκες σφάλματος κατά τη λειτουργία του IPMC. Η ύπαρξη τέτοιου κυκλώματος είναι σημαντική, επειδή η πειραματική διάταξη συνδυάζει ηλεκτρική διέγερση, υδάτινο περιβάλλον και ευαίσθητο δείγμα. Επομένως, πιθανές καταστάσεις όπως υπέρταση, υπόταση, ανοικτό κύκλωμα ή βραχυκύκλωμα μπορούν να επηρεάσουν τόσο την ασφάλεια της διάταξης όσο και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Για την αξιολόγηση του συστήματος προστασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εισαγωγής σφαλμάτων (fault-injection tests). Συνολικά εισήχθησαν 100 συμβάντα σφάλματος, κατανεμημένα σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: υπέρταση τροφοδοσίας, υπόταση τροφοδοσίας, ανοικτό κύκλωμα και βραχυκύκλωμα. Για κάθε κατηγορία πραγματοποιήθηκαν 25 δοκιμές, ώστε να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα και η αξιοπιστία της ανίχνευσης.

Στην περίπτωση της υπέρτασης, το κύκλωμα έπρεπε να αναγνωρίσει πότε η τροφοδοσία των 5 V ξεπερνούσε το προκαθορισμένο όριο των 5,25 V. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της υπότασης, το σύστημα έπρεπε να ενεργοποιεί ένδειξη σφάλματος όταν η ίδια τροφοδοσία έπεφτε κάτω από τα 4,75 V. Και στις δύο περιπτώσεις, οι συγκριτές τάσης με αναφορά TL431 παρείχαν σαφές λογικό σήμα προς τη μονάδα ελέγχου, επιτρέποντας την άμεση αναγνώριση της μη κανονικής κατάστασης.

Για την περίπτωση ανοικτού κυκλώματος, η αξιολόγηση βασίστηκε στην παρακολούθηση της τάσης πάνω στην αντίσταση shunt. Όταν οι επαφές του στηρίγματος δεν έρχονταν σωστά σε επαφή με το IPMC, το κύκλωμα δεν διαρρέοταν από ρεύμα και η μετρούμενη τάση παρέμενε κοντά στο μηδέν. Η χρήση χρονικού παραθύρου 700 ms απέτρεψε την εσφαλμένη ανίχνευση κατά τις φυσιολογικές μηδενικές διελεύσεις του ημιτονοειδούς σήματος, επιτρέποντας στο σύστημα να διαχωρίζει ένα πραγματικό ανοικτό κύκλωμα από μια στιγμιαία φυσιολογική μηδενική τιμή.

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, οι χάλκινες επαφές του στηρίγματος έρχονταν σε άμεση επαφή μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το σήμα διέγερσης να εφαρμόζεται σχεδόν απευθείας πάνω στην αντίσταση 1 Ω. Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε υπερβολικό ρεύμα, περίπου 2 A για διέγερση της τάξης των ± 2 V, και αποτελεί άμεσο κίνδυνο για τη βαθμίδα οδήγησης. Το σύστημα αναγνώριζε την υπέρβαση

του ορίου ρεύματος και απενεργοποιούσε τον DAC, διακόπτοντας την παραγωγή του σήματος διέγερσης.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι και τα 100 εισαγόμενα σφάλματα ανιχνεύθηκαν σωστά. Αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό ανίχνευσης 100%, χωρίς χαμένα συμβάντα. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια 3 ωρών συνεχούς κανονικής λειτουργίας δεν παρατηρήθηκαν ψευδείς ενεργοποιήσεις (spurious triggers). Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι το κύκλωμα προστασίας μπορεί να διακρίνει αξιόπιστα μεταξύ πραγματικών συνθηκών σφάλματος και φυσιολογικής λειτουργίας του IPMC.

Η απουσία ψευδών ενεργοποιήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή σε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου η υπερβολικά ευαίσθητη ανίχνευση σφαλμάτων θα μπορούσε να διακόπτει άσκοπα τη λειτουργία της διάταξης. Αντίθετα, το προτεινόμενο κύκλωμα προστασίας παρουσίασε σταθερή συμπεριφορά, ενεργοποιούμενο μόνο όταν υπήρχε πραγματική μη κανονική κατάσταση. Έτσι, ενισχύεται η ασφάλεια του συστήματος χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η συνέχεια των μετρήσεων.

Συνολικά, η αξιολόγηση επιβεβαιώνει ότι το κύκλωμα προστασίας αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής διάταξης. Δεν λειτουργεί μόνο ως βοηθητικό στοιχείο ασφαλείας, αλλά συμβάλλει άμεσα στην αξιοπιστία της πειραματικής διαδικασίας, καθώς προστατεύει το IPMC και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από πιθανές βλάβες και διασφαλίζει ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

3.6 Περιορισμοί της προτεινόμενης διάταξης

Παρά τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση του οπτικού μικροσκοπικού συστήματος, η προτεινόμενη διάταξη παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν τη λειτουργικότητα του συστήματος, αλλά καθορίζουν τα όρια μέσα στα οποία η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία.

Ένας βασικός περιορισμός αφορά το περιορισμένο πεδίο θέασης (field of view - FOV) του μικροσκοπικού συστήματος. Η χρήση αντικειμενικού φακού υψηλής μεγέθυνσης επιτρέπει υψηλή χωρική δειγματοληψία, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει την περιοχή της εικόνας που μπορεί να παρατηρηθεί. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την παρακολούθηση μικρών περιοχών και μικρομετατοπίσεων, αλλά δεν είναι ιδανικό για την παρατήρηση μεγάλων κινήσεων ή μεγάλων δειγμάτων χωρίς μηχανική επανατοποθέτηση της διάταξης.

Ένας δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με την ανάγκη σταθερού και ομοιόμορφου φωτισμού. Η επεξεργασία εικόνας βασίζεται στην καθαρή αντίθεση μεταξύ του IPMC και του υποβάθρου. Επομένως, μεταβολές στην ένταση του οπίσθιου φωτισμού (backlighting), αντανakλάσεις, σκιές ή ανομοιομορφίες στο φωτιστικό πεδίο μπορούν να επηρεάσουν την ανίχνευση ακμών και τον εντοπισμό του άκρου. Για τον λόγο αυτό, πριν από κάθε μέτρηση είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ποιότητας απεικόνισης.

Επιπλέον, η μέθοδος εξαρτάται από τη σωστή εστίαση και τη μηχανική σταθερότητα της οπτικής διάταξης. Μικρές μετακινήσεις του μικροσκοπίου, της δεξαμενής ή του δείγματος μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στην εικόνα που δεν οφείλονται στην πραγματική κίνηση του IPMC.

Αντίστοιχα, παροδικές κινήσεις του νερού, μικροφυσαλίδες ή σωματίδια στο υγρό μέσο μπορούν να επηρεάσουν την καθαρότητα της εικόνας και να δυσκολέψουν την αλγοριθμική ανίχνευση.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη συχνότητα κίνησης του δείγματος. Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε για συχνότητες ενεργοποίησης κάτω από 2 Hz, όπου η μετατόπιση του άκρου μεταξύ διαδοχικών καρέ παραμένει σχετικά μικρή και μπορεί να προβλεφθεί αξιόπιστα από τον αλγόριθμο. Σε υψηλότερες συχνότητες, η κίνηση μεταξύ δύο διαδοχικών καρέ μπορεί να γίνει μεγαλύτερη, μειώνοντας την ακρίβεια της πρόβλεψης και αυξάνοντας την ανάγκη για μεγαλύτερη περιοχή αναζήτησης ή υψηλότερο ρυθμό λήψης εικόνας.

Επίσης, η χωρική δειγματοληψία σε $\mu\text{m}/\text{pixel}$ δεν πρέπει να ταυτίζεται πλήρως με την απόλυτη μετρητική ακρίβεια του συστήματος. Η τιμή αυτή δείχνει πόσο μικρή πραγματική απόσταση αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο, αλλά η τελική ακρίβεια εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η ποιότητα του περιγράμματος, ο θόρυβος της εικόνας, η παραμόρφωση του φακού, η σταθερότητα της βαθμονόμησης και η απόδοση του αλγορίθμου εντοπισμού. Επομένως, η υπομικρομετρική χωρική δειγματοληψία αποτελεί ένδειξη υψηλής διακριτικής ικανότητας, αλλά δεν συνεπάγεται από μόνη της ότι το απόλυτο σφάλμα μέτρησης είναι αντίστοιχα υπομικρομετρικό.

Τέλος, στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε ανεξάρτητη εξωτερική διάταξη αναφοράς για την πλήρη επιβεβαίωση της απόλυτης μετατόπισης σε μικρόμετρα. Συνεπώς, τα αποτελέσματα εστιάζουν κυρίως στη βαθμονομημένη χωρική δειγματοληψία, στη σταθερότητα της απεικόνισης, στην ταχύτητα επεξεργασίας και στην αξιοπιστία εντοπισμού του άκρου. Μια μελλοντική αξιολόγηση με χρήση ανεξάρτητης μεθόδου αναφοράς, όπως λέιζερ ή μικρομετρική μετακίνηση γνωστής απόστασης, θα μπορούσε να προσφέρει ακόμη πιο ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό της απόλυτης ακρίβειας του συστήματος.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί δείχνουν ότι η προτεινόμενη διάταξη είναι κατάλληλη για ελεγχόμενες εργαστηριακές μετρήσεις μικρομετατοπίσεων, ιδιαίτερα σε χαμηλές συχνότητες και με σταθερές συνθήκες φωτισμού. Παράλληλα, οι περιορισμοί αυτοί αποτελούν χρήσιμη βάση για τη μελλοντική βελτίωση του συστήματος, όπως η ενσωμάτωση μηχανισμού ακριβούς εστίασης, η κίνηση σε περισσότερους άξονες, η χρήση υψηλότερου ρυθμού λήψης εικόνας και η σύνδεση με πιο αυτοματοποιημένες διαδικασίες παρακολούθησης.

Κεφάλαιο 4ο: Μικροσκοπικό Σύστημα για Μέτρηση Αερομεταφερόμενων Μικροσωματιδίων

Το οπτικό μικροσκοπικό σύστημα που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκε αρχικά με σκοπό τη μέτρηση μικρομετατοπίσεων ενεργοποιητή IPMC σε υδάτινο περιβάλλον. Ωστόσο, η ίδια βασική αρχιτεκτονική μπορεί να αξιοποιηθεί και σε διαφορετικές εφαρμογές μικροσκοπικής μέτρησης, όπου το ζητούμενο δεν είναι η παρακολούθηση της κίνησης ενός δείγματος, αλλά η οπτική παρατήρηση, καταγραφή και ανάλυση μικροσκοπικών αντικειμένων που συλλέγονται σε συγκεκριμένη επιφάνεια.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποιημένη επέκταση της διάταξης σε μικροσκοπικό σύστημα για τη μέτρηση και οπτική παρακολούθηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Η επέκταση αυτή αξιοποιεί τη λογική της μικροσκοπικής απεικόνισης ως δεδομένου μέτρησης και τη συνδυάζει με μηχανική κίνηση, ηλεκτρονικό έλεγχο και αλγοριθμική επεξεργασία.

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται η βασική αρχή λειτουργίας, ο θάλαμος συλλογής, η κολλητική επιφάνεια δειγματοληψίας, ο μηχανισμός μετακίνησης της ταινίας και του μικροσκοπίου, καθώς και η διαδικασία μικροσκοπικής σάρωσης και επεξεργασίας των εικόνων.

4.1 Σκοπός και βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος

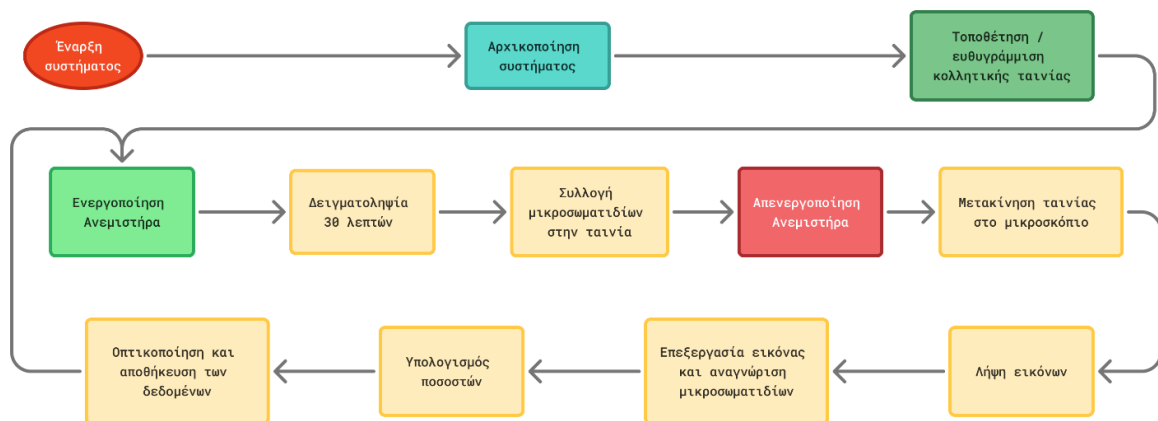
Σκοπός του συστήματος είναι η συλλογή και οπτική παρακολούθηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων μέσω μικροσκοπικής απεικόνισης. Η βασική λειτουργία του στηρίζεται στην καθοδήγηση αέρα προς μια κολλητική επιφάνεια συλλογής, στην προσκόλληση των μικροσωματιδίων πάνω στην επιφάνεια αυτή και στη μετέπειτα μεταφορά της μπροστά από το μικροσκοπικό σύστημα για λήψη εικόνων.

Η διάταξη χρησιμοποιεί χρονικά παράθυρα δειγματοληψίας διάρκειας 30 λεπτών. Κατά τη διάρκεια κάθε παραθύρου, ένας ανεμιστήρας λειτουργεί συνεχόμενα και οδηγεί τον αέρα προς τον θάλαμο συλλογής. Τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια που παρασύρονται από τη ροή του αέρα κατευθύνονται μέσω χοάνης προς την κολλητική επιφάνεια της ταινίας, όπου προσκολλώνται. Η συλλογή πραγματοποιείται πάνω σε λευκή ματ κολλητική ταινία, η οποία λειτουργεί τόσο ως επιφάνεια συγκράτησης των μικροσωματιδίων όσο και ως υπόβαθρο μικροσκοπικής απεικόνισης. Μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας, η ταινία μετακινείται ελεγχόμενα ώστε η περιοχή που έχει δεχθεί το δείγμα να περάσει μπροστά από το μικροσκόπιο.

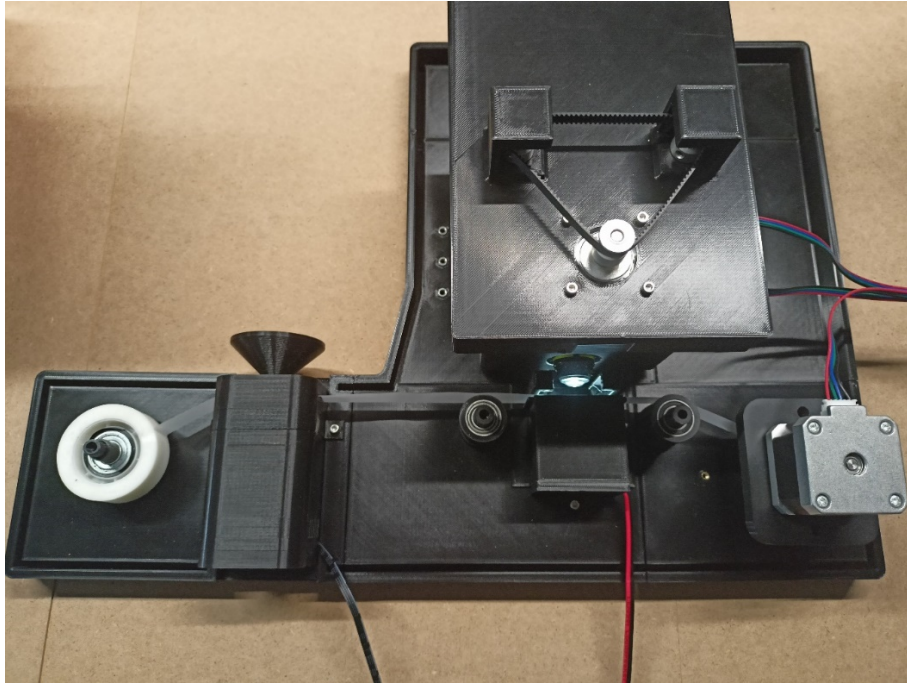
Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στη συνεργασία της υπολογιστικής μονάδας Raspberry Pi με το μικροελεγκτικό υποσύστημα ESP32-S3. Το Raspberry Pi αναλαμβάνει τον συνολικό συντονισμό της διαδικασίας, ενώ το ESP32-S3 χρησιμοποιείται για την ελεγχόμενη κίνηση των αξόνων μέσω των οδηγών TMC2225.

Η οπτική αναγνώριση των μικροσωματιδίων μπορεί να βασιστεί σε κατάλληλα σύνολα εικόνων αναφοράς και σε αλγοριθμική επεξεργασία. Στόχος δεν είναι απλώς η οπτική παρατήρηση της επιφάνειας συλλογής, αλλά η εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την παρουσία, το είδος ή την κατηγορία των μικροσωματιδίων, καθώς και η εκτίμηση ποσοστού εμφάνισης κάθε κατηγορίας στο συλλεγμένο δείγμα. Με τον τρόπο αυτό, το μικροσκοπικό σύστημα λειτουργεί ως πλατφόρμα μέτρησης και όχι μόνο ως σύστημα απεικόνισης.

Η αρχιτεκτονική αυτή συνδέεται άμεσα με τη φιλοσοφία των κόμβων αισθητήρων (*sensor nodes*) και των συστημάτων παρακολούθησης πραγματικού χρόνου. Όπως σε έναν περιβαλλοντικό κόμβο τα αριθμητικά δεδομένα συλλέγονται, αποθηκεύονται, ελέγχονται και αναλύονται, έτσι και στο παρόν σύστημα η μικροσκοπική εικόνα αποτελεί το πρωτογενές δεδομένο. Η εικόνα αυτή μετατρέπεται μέσω οπτικής αναγνώρισης και επεξεργασίας σε πληροφορία για την παρουσία, την κατανομή και το ποσοστό διαφορετικών κατηγοριών αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του συστήματος συλλογής, σάρωσης και αναγνώρισης μικροσωματιδίων

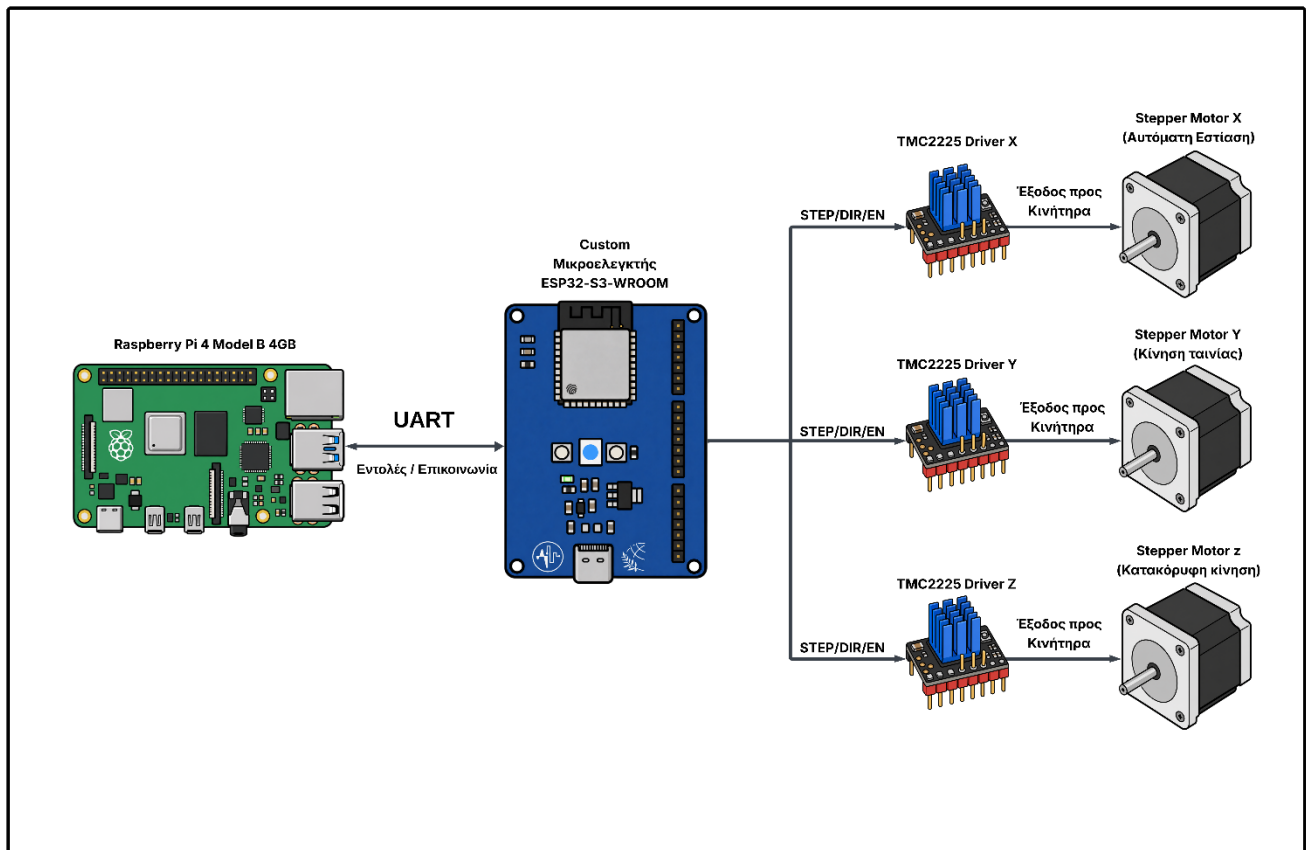


Σχήμα 4.2: Συνολική διάταξη του μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων

4.2 Μικροελεγκτικό υποσύστημα ελέγχου κίνησης

Για την υποστήριξη της αυτοματοποιημένης κίνησης του μικροσκοπικού συστήματος αναπτύχθηκε ειδικό μικροελεγκτικό υποσύστημα, βασισμένο στο ολοκληρωμένο ESP32-S3-WROOM της Espressif. Το υποσύστημα αυτό σχεδιάστηκε με σκοπό να λειτουργεί ως ενδιάμεσο επίπεδο ελέγχου ανάμεσα στο Raspberry Pi και στους οδηγούς των βηματικών κινητήρων. Με τον τρόπο αυτό, η λειτουργία της διάταξης διαχωρίζεται σε δύο επίπεδα: το Raspberry Pi αναλαμβάνει τον υψηλού επιπέδου συντονισμό της διαδικασίας, ενώ ο ESP32-S3 αναλαμβάνει τον άμεσο έλεγχο των βηματικών κινητήρων.

Ο διαχωρισμός αυτός είναι σημαντικός, επειδή η οδήγηση των βηματικών κινητήρων απαιτεί ακριβή χρονισμό, σταθερή ακολουθία παλμών και επαναλήψιμη εκτέλεση των μετακινήσεων. Αν και το Raspberry Pi διαθέτει σημαντική υπολογιστική ισχύ και είναι κατάλληλο για τη λήψη εικόνων, την αποθήκευση δεδομένων και την αλγοριθμική επεξεργασία, η λειτουργία του βασίζεται σε λειτουργικό σύστημα γενικού σκοπού. Επομένως, ο ακριβής χρονισμός σημάτων πραγματικού χρόνου μπορεί να επηρεαστεί από καθυστερήσεις του λειτουργικού συστήματος. Αντίθετα, ο μικροελεγκτής ESP32-S3 είναι καταλληλότερος για εργασίες χαμηλού επιπέδου, όπως η παραγωγή παλμών προς τους οδηγούς των κινητήρων.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής ελέγχου των αξόνων κίνησης

Στην υλοποιημένη αρχιτεκτονική, το Raspberry Pi αποστέλλει εντολές στον ESP32-S3 μέσω του πρωτοκόλλου UART σχετικά με την απαιτούμενη κίνηση, όπως η επιλογή άξονα, η κατεύθυνση, ο αριθμός βημάτων ή η έναρξη συγκεκριμένης διαδικασίας σάρωσης. Ο ESP32-S3 αναλαμβάνει την οδήγηση των οδηγών TMC2225, οι οποίοι εκτελούν την ηλεκτρική οδήγηση των βηματικών κινητήρων. Έτσι, δημιουργείται μια ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου, όπου το Raspberry Pi οργανώνει τη συνολική διαδικασία και ο μικροελεγκτής εκτελεί τις επιμέρους κινήσεις.

Για το μικροελεγκτικό υποσύστημα σχεδιάστηκε τόσο το ηλεκτρονικό σχηματικό όσο και η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος μέσω του λογισμικού KiCad. Η σχεδίαση της πλακέτας επέτρεψε την προσαρμογή του κυκλώματος στις ανάγκες της συγκεκριμένης διάταξης, αντί της χρήσης μιας γενικής αναπτυξιακής πλακέτας. Με τον τρόπο αυτό, οργανώθηκαν οι ακροδέκτες, οι γραμμές τροφοδοσίας, η θύρα USB και τα βοηθητικά κυκλώματα με τρόπο κατάλληλο για την ενσωμάτωση στο σύστημα κίνησης.

Κατά τη σχεδίαση διατηρήθηκαν διαθέσιμοι οι ακροδέκτες του ESP32-S3 που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιακές λειτουργίες, αναλογικές εισόδους ADC και σειριακή επικοινωνία. Ιδιαίτερη πρόβλεψη έγινε για τη διατήρηση των ακροδεκτών RX και TX, ώστε να υπάρχει δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας ή αποσφαλμάτωσης. Επιπλέον, προστέθηκαν βοηθητικά pin headers για τις

τάσεις 5 V, 3,3 V και GND, ώστε να διευκολύνεται η σύνδεση με εξωτερικά υποσυστήματα, αισθητήρες ή βοηθητικά κυκλώματα.

Η τροφοδοσία των 3,3 V για το ESP32-S3 παρέχεται μέσω σταθεροποιητή τάσης AMS1117, ο οποίος μετατρέπει την είσοδο των 5 V σε κατάλληλη τάση λειτουργίας για τον μικροελεγκτή. Η ύπαρξη γραμμής 3,3 V είναι απαραίτητη, καθώς το ESP32-S3 και τα περισσότερα σήματα λογικής του λειτουργούν σε αυτό το επίπεδο τάσης. Παράλληλα, η διαθεσιμότητα γραμμής 5 V επιτρέπει τη διασύνδεση με υποσυστήματα που απαιτούν υψηλότερη τάση.

Για τη σύνδεση με υπολογιστή και την τροφοδοσία ενσωματώθηκε θύρα USB Type-C. Στη γραμμή τροφοδοσίας USB τοποθετήθηκε δίοδος Schottky 1N5819HW-7-F, με σκοπό την προστασία και την ορθή κατεύθυνση της τροφοδοσίας. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία προστασίας LESD5D5.0CT1G για την προστασία ευαίσθητων γραμμών από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (ESD) και μεταβατικά φαινόμενα τάσης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε προστασία στη γραμμή 5 V του USB, καθώς και στις γραμμές δεδομένων D+ και D-. Η προστασία αυτή είναι σημαντική, επειδή η θύρα USB αποτελεί σημείο συχνής σύνδεσης και αποσύνδεσης.

Στο κύκλωμα τοποθετήθηκαν επίσης πυκνωτές αποσύζευξης (decoupling capacitors) τιμών 10 μ F και 100 nF σε κατάλληλα σημεία της τροφοδοσίας. Οι πυκνωτές αυτοί συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της τάσης και στη μείωση μικρών διακυμάνσεων που μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία του μικροελεγκτή ή των συνδεδεμένων υποσυστημάτων. Η αποσύζευξη είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συστήματα που συνδυάζουν ψηφιακό έλεγχο και κίνηση, επειδή οι μεταβολές ρεύματος μπορούν να δημιουργήσουν θόρυβο στις γραμμές τροφοδοσίας.

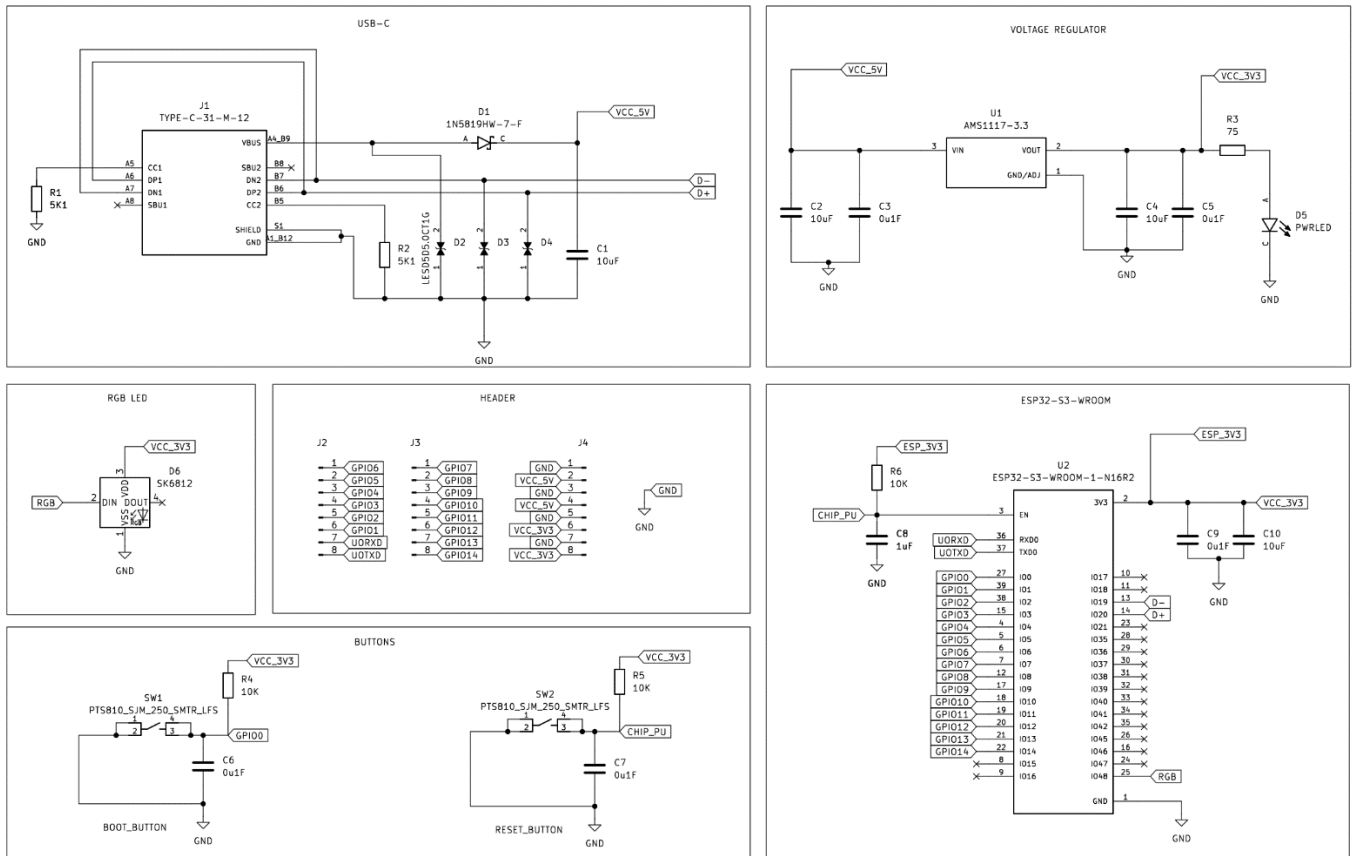
Για την ένδειξη της κατάστασης λειτουργίας ενσωματώθηκε RGB LED τύπου SK6812. Το LED αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οπτική ένδειξη διαφορετικών καταστάσεων, όπως εκκίνηση, αναμονή, εκτέλεση κίνησης, ολοκλήρωση κύκλου ή εμφάνιση σφάλματος. Επιπλέον, τοποθετήθηκε ξεχωριστό πράσινο LED ένδειξης τροφοδοσίας, ώστε να είναι άμεσα εμφανές ότι το μικροελεγκτικό υποσύστημα λαμβάνει ρεύμα.

Στην πλακέτα προστέθηκαν επίσης δύο κουμπιά, ένα για τη λειτουργία BOOT και ένα για τη λειτουργία RESET. Τα κουμπιά αυτά είναι απαραίτητα για τον προγραμματισμό, την επανεκκίνηση και τον έλεγχο του μικροελεγκτή κατά τη φάση ανάπτυξης. Στα αντίστοιχα κυκλώματα τοποθετήθηκαν αντιστάσεις pull-up 10 k Ω , ώστε οι είσοδοι να διατηρούν σταθερή λογική κατάσταση όταν τα κουμπιά δεν πατιούνται. Η χρήση pull-up αντιστάσεων συμβάλλει επίσης στην αποφυγή ασταθούς εκκίνησης και προβλημάτων όπου η πλακέτα ενδέχεται να απαιτεί χειροκίνητη επανεκκίνηση μετά την τροφοδότηση.

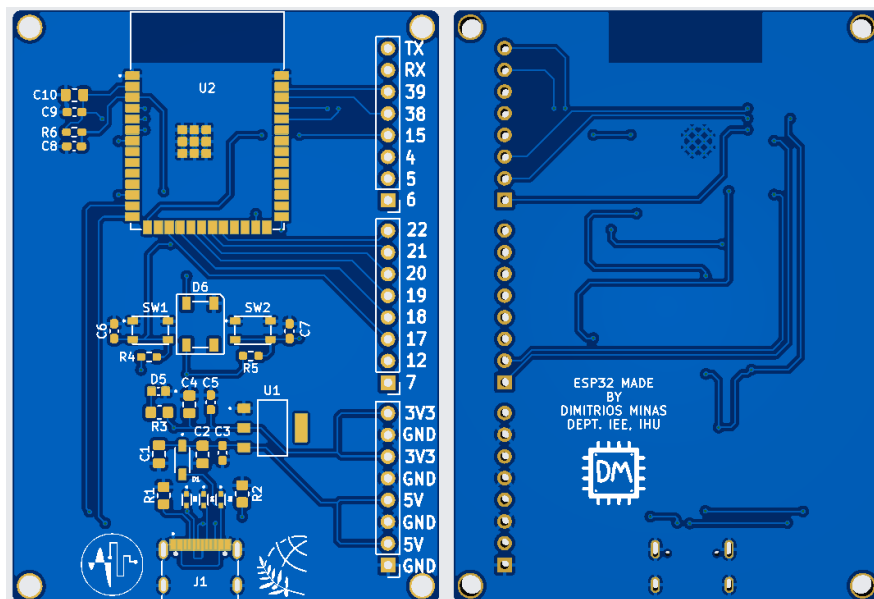
Με βάση τα παραπάνω, το μικροελεγκτικό υποσύστημα αποτελεί βασικό μέρος της αυτοματοποίησης της διάταξης. Ο διαχωρισμός ανάμεσα στον υψηλού επιπέδου έλεγχο του Raspberry Pi και στον χαμηλού επιπέδου έλεγχο του ESP32-S3 επιτρέπει καλύτερη οργάνωση του συστήματος, πιο σταθερή οδήγηση των βηματικών κινητήρων και μεγαλύτερη δυνατότητα επέκτασης. Επομένως, η

Κεφάλαιο 4

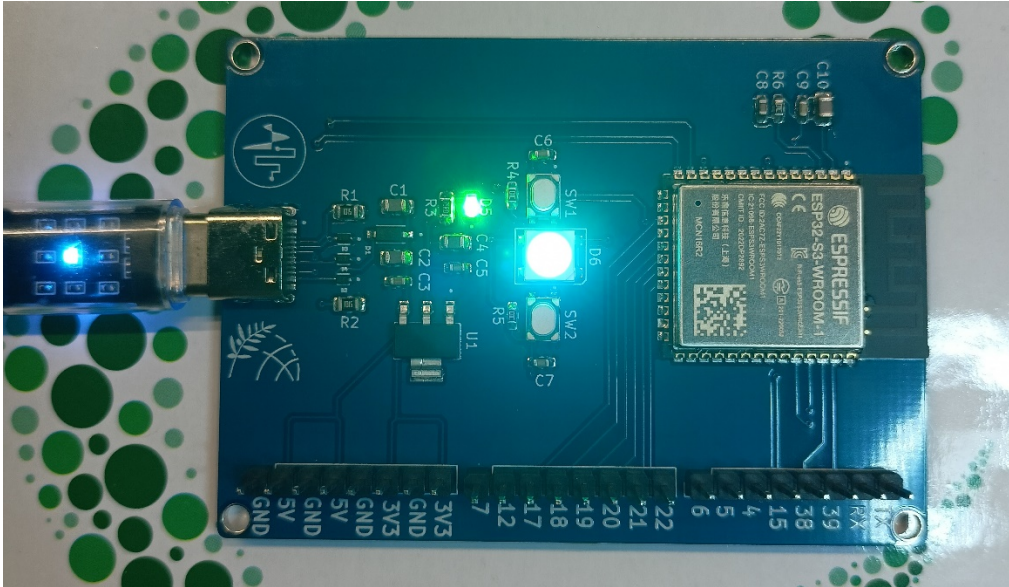
ενσωμάτωση του ESP32-S3 ενισχύει τη λειτουργικότητα του μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων.



Σχήμα 4.4: Ηλεκτρονικό σχηματικό του μικροελεγκτικού υποσυστήματος βασισμένου σε ESP32-S3



Σχήμα 4.5: Σχεδίαση πλακέτας PCB του μικροελεγκτικού υποσυστήματος



Σχήμα 4.6: Υλοποιημένη πλακέτα ESP32-S3 για το μικροελεγκτικό υποσύστημα ελέγχου κίνησης

4.3 Θάλαμος συλλογής και κολλητική επιφάνεια δειγματοληψίας

Μετά την περιγραφή της βασικής αρχιτεκτονικής ελέγχου, το πρώτο βασικό λειτουργικό μέρος της διάταξης είναι το υποσύστημα συλλογής των αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Το υποσύστημα αυτό βασίζεται σε έναν ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο, μέσα από τον οποίο διέρχεται η κολλητική ταινία. Ο θάλαμος λειτουργεί ως ελεγχόμενη περιοχή δειγματοληψίας, όπου ο αέρας οδηγείται προς την κολλητική επιφάνεια με τη βοήθεια ανεμιστήρα και χοάνης. Ο βασικός σκοπός του είναι να περιορίζει την περιοχή συλλογής, να καθοδηγεί τη ροή του αέρα και να εξασφαλίζει ότι τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια προσκολλώνται σε συγκεκριμένο και επαναλήψιμο τμήμα της ταινίας.

Η κολλητική ταινία διέρχεται μέσα από τον θάλαμο μέσω δύο πλευρικών εσοχών. Η μία εσοχή χρησιμοποιείται για την είσοδο της ταινίας στον θάλαμο, ενώ η δεύτερη επιτρέπει την έξοδό της προς τον μηχανισμό έλξης και τύλιξης. Με αυτόν τον τρόπο, η ταινία μπορεί να κινείται κατά μήκος του θαλάμου, περνώντας διαδοχικά από την περιοχή συλλογής και στη συνέχεια από την περιοχή μικροσκοπικής απεικόνισης.

Ο θάλαμος παραμένει κατά το δυνατόν απομονωμένος από το υπόλοιπο σύστημα, με εξαίρεση τις εσοχές εισόδου και εξόδου της ταινίας, το άνοιγμα της χοάνης και την έξοδο του αέρα στο πίσω μέρος του θαλάμου. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη δημιουργία κατευθυνόμενης ροής αέρα, ο αέρας εισέρχεται από τη χοάνη και οδηγεί τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια προς την κολλητική επιφάνεια και στη συνέχεια απομακρύνεται από την πίσω έξοδο του θαλάμου. Έτσι, η συλλογή πραγματοποιείται σε πιο ελεγχόμενη περιοχή, χωρίς ο θάλαμος να παρεμποδίζει πλήρως τη ροή του αέρα.

Η χοάνη αποτελεί βασικό στοιχείο του θαλάμου, καθώς συγκεντρώνει και κατευθύνει τον αέρα προς την κολλητική επιφάνεια. Η λειτουργία της είναι να περιορίζει την περιοχή στην οποία καταλήγουν τα μικροσωματίδια και να αυξάνει την επαναληψιμότητα της δειγματοληψίας. Αν ο αέρας οδηγούνταν ανεξέλεγκτα προς την ταινία, τα σωματίδια θα μπορούσαν να κατανεμηθούν σε μεγαλύτερη και λιγότερο προβλέψιμη επιφάνεια. Αντίθετα, με τη χρήση χοάνης, η περιοχή συλλογής ορίζεται πιο καθαρά και μπορεί να αντιστοιχιστεί σε συγκεκριμένο τμήμα της ταινίας που στη συνέχεια θα σαρωθεί από το μικροσκοπικό σύστημα.

Στην παρούσα διάταξη, η περιοχή ενδιαφέροντος αντιστοιχεί περίπου στη διάμετρο της χοάνης, δηλαδή σε περιοχή περίπου 5 mm. Η διάσταση αυτή είναι σημαντική, επειδή καθορίζει την επιφάνεια της ταινίας που πρέπει να απεικονιστεί μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας. Επομένως, η γεωμετρία της χοάνης δεν επηρεάζει μόνο το στάδιο συλλογής, αλλά και το στάδιο της μικροσκοπικής σάρωσης, αφού ορίζει το μέγεθος της περιοχής που πρέπει να καλυφθεί με διαδοχικές εικόνες.

Η ταινία που χρησιμοποιείται είναι κλασική κολλητική ταινία λευκού ματ χρώματος. Η επιλογή αυτή έγινε για δύο βασικούς λόγους. Αρχικά, η κολλητική επιφάνεια επιτρέπει τη συγκράτηση των αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων μετά την πρόσκρουσή τους στην ταινία, μειώνοντας την πιθανότητα μετατόπισής τους κατά τη μεταφορά προς το μικροσκόπιο. Παράλληλα, το λευκό ματ υπόβαθρο διευκολύνει τη μικροσκοπική απεικόνιση, καθώς δημιουργεί σχετικά ομοιόμορφο και φωτεινό φόντο, πάνω στο οποίο τα σωματίδια μπορούν να διακριθούν με μεγαλύτερη ευκολία.

Η ματ υφή της ταινίας είναι επίσης σημαντική από οπτική άποψη. Σε επιφάνειες με έντονη γυαλάδα μπορεί να εμφανιστούν αντανάκλασεις, κορεσμένα σημεία φωτεινότητας ή ανομοιόμορφη διάδοση του οπίσθιου φωτισμού. Τα φαινόμενα αυτά θα μπορούσαν να δυσκολέψουν την επεξεργασία εικόνας, επειδή ο αλγόριθμος μπορεί να αναγνωρίσει ψευδείς περιοχές ενδιαφέροντος ή να δυσκολευτεί να διαχωρίσει τα πραγματικά μικροσωματίδια από το υπόβαθρο. Αντίθετα, η λευκή ματ επιφάνεια περιορίζει τέτοιες ανεπιθύμητες οπτικές παρεμβολές και βοηθά στη σταθερότερη απεικόνιση.

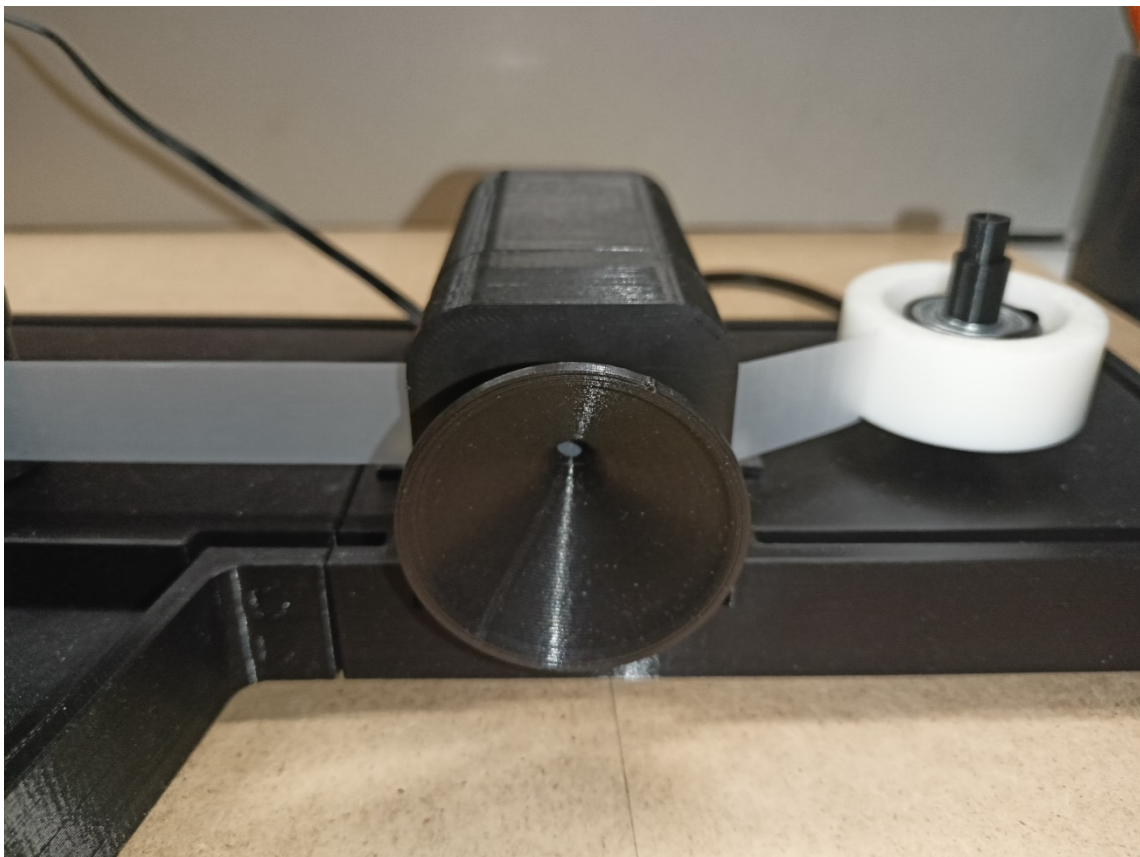
Κατά τη διάρκεια του δειγματοληπτικού παραθύρου, ο ανεμιστήρας λειτουργεί συνεχόμενα για 30 λεπτά και δημιουργεί ροή αέρα προς τη χοάνη. Τα μικροσωματίδια που περιέχονται στον αέρα οδηγούνται προς την κολλητική επιφάνεια και προσκολλώνται σε αυτήν. Μετά την ολοκλήρωση του χρονικού παραθύρου, η ταινία μετακινείται ελεγχόμενα από τον μηχανισμό έλξης, ώστε το τμήμα που περιέχει το συλλεγμένο δείγμα να οδηγηθεί μπροστά από το μικροσκοπικό σύστημα.

Η αρχική τοποθέτηση της ταινίας στον μηχανισμό πραγματοποιείται χειροκίνητα. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε η ταινία να περάσει σωστά μέσα από τις εσοχές του θαλάμου, να ευθυγραμμιστεί με την περιοχή της χοάνης και να συνδεθεί με τον μηχανισμό έλξης. Μετά την αρχική τοποθέτηση, η προώθηση της ταινίας πραγματοποιείται μηχανικά, με τη βοήθεια βηματικού κινητήρα. Στο τέλος της διαδρομής, η χρησιμοποιημένη ταινία τυλίγεται σε κενό ρολό, ώστε να διατηρείται οργανωμένη η συλλογή και να μπορεί το σύστημα να συνεχίσει τη λειτουργία του σε επόμενα τμήματα της ταινίας.

Η χρήση θαλάμου συλλογής και κινούμενης κολλητικής ταινίας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Επιτρέπει τη χρονική οργάνωση της δειγματοληψίας,

καθώς κάθε τμήμα της ταινίας μπορεί να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο λειτουργίας. Επιπλέον, επιτρέπει την αποθήκευση του δείγματος πάνω στην ίδια την ταινία, κάτι που καθιστά δυνατή τόσο την άμεση μικροσκοπική ανάλυση όσο και πιθανή επανεξέταση της ίδιας περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο, η ταινία δεν λειτουργεί μόνο ως επιφάνεια συλλογής, αλλά και ως φορέας πληροφορίας που συνδέει το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας με το αντίστοιχο μικροσκοπικό δείγμα.

Κατά συνέπεια, ο θάλαμος συλλογής και η κολλητική επιφάνεια αποτελούν το πρώτο βασικό στάδιο της διάταξης. Η ποιότητα της συλλογής επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της απεικόνισης και, κατά συνέπεια, την αξιοπιστία της οπτικής αναγνώρισης. Για τον λόγο αυτό, η γεωμετρία του θαλάμου, η καθοδήγηση του αέρα, η επιλογή της ταινίας και η σταθερότητα της μετακίνησής της αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για τη συνολική λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 4.7: Διάταξη εστίασης και λήψης μικροσκοπικών εικόνων πάνω στην κολλητική ταινία συλλογής

4.4 Μηχανισμός μετακίνησης ταινίας και μικροσκοπίου

Για την αυτοματοποιημένη λειτουργία του συστήματος υλοποιήθηκε μηχανισμός ελεγχόμενης μετακίνησης τόσο της κολλητικής ταινίας όσο και του μικροσκοπικού υποσυστήματος. Η ανάγκη για μηχανική κίνηση προκύπτει από το γεγονός ότι η περιοχή συλλογής των αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων είναι μεγαλύτερη από το στιγμιαίο πεδίο θέασης του μικροσκοπίου. Επομένως, για

να απεικονιστεί ολόκληρη η περιοχή ενδιαφέροντος, απαιτείται διαδοχική σάρωση της επιφάνειας συλλογής.

Η κίνηση του συστήματος οργανώνεται σε τρεις βασικούς άξονες. Ο πρώτος άξονας αφορά την κίνηση του μικροσκοπίου προς τα μέσα και προς τα έξω, δηλαδή την προσαρμογή της απόστασης μεταξύ φακού και δείγματος. Η κίνηση αυτή αντιστοιχεί στον άξονα x και χρησιμοποιείται κυρίως για τη δυνατότητα αυτόματης εστίασης (autofocus). Η ακριβής ρύθμιση της απόστασης είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή σε μικροσκοπικές διατάξεις ακόμη και μικρές μεταβολές στη θέση του φακού μπορούν να επηρεάσουν αισθητά την ευκρίνεια της εικόνας.

Ο δεύτερος άξονας αφορά την κατακόρυφη κίνηση του μικροσκοπίου, δηλαδή την κίνηση στον άξονα ύψους z . Η κίνηση αυτή επιτρέπει στο μικροσκόπιο να λαμβάνει εικόνες σε διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις πάνω στην επιφάνεια της ταινίας. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μπορεί να καλύψει σταδιακά την περιοχή συλλογής που αντιστοιχεί στο άνοιγμα της χοάνης. Η κίνηση στον άξονα αυτό είναι απαραίτητη επειδή το ύψος του στιγμιαίου πεδίου θέασης είναι μικρότερο από τη συνολική περιοχή που πρέπει να απεικονιστεί.

Ο τρίτος άξονας αφορά την κίνηση της κολλητικής ταινίας, η οποία αντιστοιχεί στον άξονα πλάτους y . Με τη μετακίνηση της ταινίας, διαφορετικά τμήματα της επιφάνειας συλλογής περνούν μπροστά από το μικροσκοπικό σύστημα. Η κίνηση αυτή επιτρέπει τη διαδοχική λήψη εικόνων κατά μήκος της επιφάνειας στην οποία έχουν προσκολληθεί τα μικροσωματίδια. Παράλληλα, μετά την ολοκλήρωση της σάρωσης, η ταινία μπορεί να συνεχίσει την πορεία της και να τυλιχθεί σε κενό ρολό, ώστε το σύστημα να είναι έτοιμο για επόμενο κύκλο δειγματοληψίας.

Η κίνηση των αξόνων πραγματοποιείται με βηματικούς κινητήρες, οι οποίοι επιτρέπουν ελεγχόμενη μετατόπιση σε μικρά και επαναλήψιμα βήματα. Για την οδήγηση των βηματικών κινητήρων χρησιμοποιήθηκαν οδηγοί τύπου TMC2225 (stepper motor drivers). Οι οδηγοί αυτοί επιτρέπουν πιο ομαλή και ελεγχόμενη κίνηση των αξόνων, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε μικροσκοπικές εφαρμογές, όπου ακόμη και μικρές μηχανικές ταλαντώσεις μπορούν να επηρεάσουν την εστίαση και την ποιότητα της εικόνας.

Ο έλεγχος των βηματικών κινητήρων πραγματοποιείται μέσω του μικροελεγκτικού υποσυστήματος ESP32-S3. Το Raspberry Pi αποστέλλει εντολές κίνησης μέσω UART στο ESP32-S3, το οποίο αναλαμβάνει την οδήγηση των οδηγών TMC2225 για την κίνηση των βηματικών κινητήρων των αξόνων. Με αυτόν τον τρόπο, το Raspberry Pi παραμένει υπεύθυνο για τον συνολικό συντονισμό της διαδικασίας, όπως τη λήψη εικόνων, την αποθήκευση δεδομένων και την οργάνωση της σάρωσης, ενώ ο ESP32-S3 αναλαμβάνει την ακριβή εκτέλεση των κινήσεων των αξόνων.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει καλύτερο διαχωρισμό λειτουργιών. Το Raspberry Pi λειτουργεί ως υπολογιστική μονάδα υψηλού επιπέδου, ενώ ο ESP32-S3 λειτουργεί ως ελεγκτής κίνησης χαμηλού επιπέδου. Αυτό είναι σημαντικό επειδή η παραγωγή παλμών για βηματικούς κινητήρες απαιτεί σταθερό χρονισμό, ενώ η λήψη και αποθήκευση εικόνων μπορεί να δημιουργεί μεταβαλλόμενο

υπολογιστικό φόρτο. Με την ανάθεση της κίνησης στον μικροελεγκτή, η εκτέλεση των βημάτων γίνεται πιο σταθερή και επαναλήψιμη.

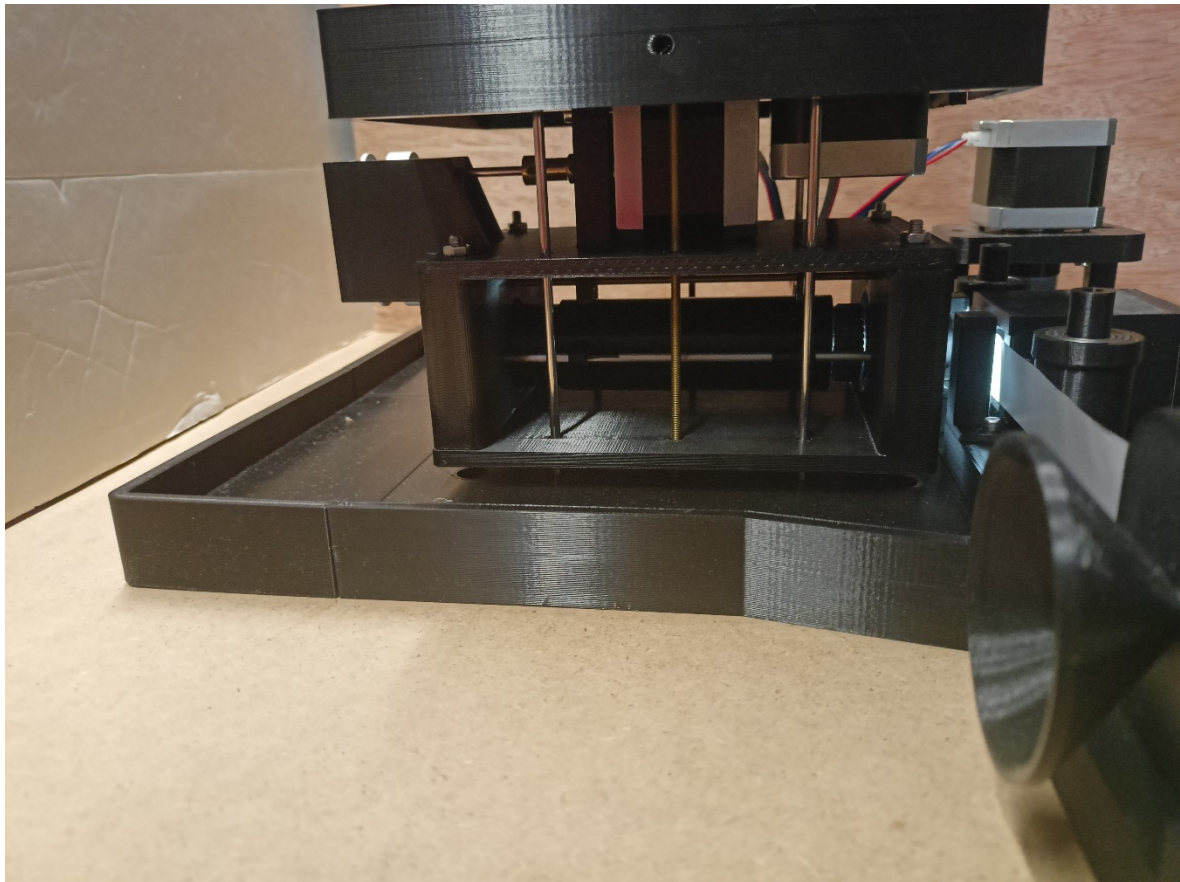
Οι άξονες κίνησης του μικροσκοπικού υποσυστήματος βασίζονται σε σπειρωτές ράβδους διαμέτρου 3 mm, με βήμα σπειρώματος 0,5 mm. Αυτό σημαίνει ότι μία πλήρης περιστροφή του βηματικού κινητήρα αντιστοιχεί σε γραμμική μετατόπιση 0,5 mm για τους άξονες κίνησης μέσα-έξω και πάνω-κάτω. Η σχέση αυτή είναι σημαντική, επειδή επιτρέπει τη μετατροπή της γωνιακής κίνησης του κινητήρα σε γνωστή γραμμική μετατόπιση. Έτσι, ο έλεγχος της θέσης μπορεί να γίνει με σχετικά απλό και επαναλήψιμο τρόπο.

Η χρήση σπειρωτής ράβδου προσφέρει μηχανικό πλεονέκτημα, καθώς μετατρέπει την περιστροφή του κινητήρα σε αργή και ελεγχόμενη γραμμική κίνηση. Αυτό είναι κατάλληλο για μικροσκοπικά συστήματα, όπου δεν απαιτούνται μεγάλες ταχύτητες μετακίνησης, αλλά κυρίως ακρίβεια, σταθερότητα και επαναληψιμότητα. Επιπλέον, η μικρή μετατόπιση ανά πλήρη περιστροφή επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της θέσης, ειδικά όταν απαιτείται ρύθμιση της εστίασης.

Η μετακίνηση της ταινίας πραγματοποιείται επίσης με βηματικό κινητήρα, ο οποίος τραβά την ταινία σταδιακά και την οδηγεί μπροστά από το μικροσκόπιο. Μετά τη διέλευσή της από την περιοχή απεικόνισης, η ταινία τυλίγεται σε κενό ρολό. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη διαδοχική χρήση νέων τμημάτων της ταινίας για επόμενα χρονικά παράθυρα δειγματοληψίας, ενώ παράλληλα διατηρεί την χρησιμοποιημένη ταινία οργανωμένη.

Η υλοποίηση τριών αξόνων κίνησης δίνει στο σύστημα τη δυνατότητα να λειτουργεί ως μικροσκοπική πλατφόρμα σάρωσης. Ο άξονας x επιτρέπει τη ρύθμιση της εστίασης, ο άξονας z επιτρέπει τη λήψη εικόνων σε διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις, ενώ ο άξονας y μέσω της κίνησης της ταινίας επιτρέπει τη μετατόπιση της επιφάνειας συλλογής μπροστά από το μικροσκόπιο. Ο συνδυασμός των κινήσεων αυτών επιτρέπει την κάλυψη μιας περιοχής μεγαλύτερης από το στιγμιαίο πεδίο θέασης της κάμερας.

Επομένως, ο μηχανισμός μετακίνησης αποτελεί βασικό μέρος της διάταξης, επειδή συνδέει τη διαδικασία συλλογής με τη διαδικασία μικροσκοπικής απεικόνισης. Χωρίς ελεγχόμενη μηχανική κίνηση, το σύστημα θα μπορούσε να καταγράψει μόνο ένα μικρό τμήμα της επιφάνειας συλλογής. Με την προσθήκη των βηματικών αξόνων και του μικροελεγκτικού ελέγχου μέσω ESP32-S3, η επιφάνεια μπορεί να σαρωθεί συστηματικά, επιτρέποντας τη λήψη πολλαπλών εικόνων και τη δημιουργία πιο αντιπροσωπευτικής εικόνας του συλλεγμένου δείγματος.



Σχήμα 4.8: Άξονες κίνησης του συστήματος για εστίαση, κατακόρυφη σάρωση και μετακίνηση της ταινίας

4.5 Διαδικασία μικροσκοπικής σάρωσης και λήψης εικόνων

Μετά την ολοκλήρωση του χρονικού παραθύρου δειγματοληψίας και τη μεταφορά της ταινίας μπροστά από το μικροσκοπικό σύστημα, ακολουθεί η διαδικασία μικροσκοπικής σάρωσης της επιφάνειας συλλογής. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη επειδή η περιοχή στην οποία συγκεντρώνονται τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια είναι μεγαλύτερη από το στιγμιαίο πεδίο θέασης του μικροσκοπίου. Επομένως, μία μόνο εικόνα δεν επαρκεί για την πλήρη απεικόνιση του δείγματος που έχει συλλεχθεί κατά τη διάρκεια του δειγματοληπτικού παραθύρου.

Η περιοχή ενδιαφέροντος ορίζεται από τη γεωμετρία της χοάνης και αντιστοιχεί περίπου σε επιφάνεια 5×5 mm πάνω στην κολλητική ταινία. Η διάσταση αυτή προκύπτει από την περιοχή στην οποία οδηγούνται τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια κατά τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Για να απεικονιστεί ολόκληρη αυτή η περιοχή, το σύστημα πραγματοποιεί διαδοχικές λήψεις σε διαφορετικές θέσεις, συνδυάζοντας τη μετακίνηση της ταινίας και τη μετακίνηση του μικροσκοπίου στον κατακόρυφο άξονα.

Με βάση τη χωρική κάλυψη του μικροσκοπικού συστήματος, κάθε εικόνα καλύπτει περίπου 1 mm σε πλάτος και 0,5 mm σε ύψος. Συνεπώς, για να καλυφθεί μια περιοχή πλάτους 5 mm, η ταινία μετακινείται σε βήματα περίπου 1 mm στον άξονα y, δημιουργώντας πέντε διαδοχικές θέσεις λήψης.

Αντίστοιχα, για να καλυφθεί ύψος 5 mm, το μικροσκόπιο μετακινείται σε βήματα περίπου 0,5 mm στον άξονα z, δημιουργώντας δέκα διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις. Ο συνδυασμός των δύο κινήσεων οδηγεί σε περίπου 50 μικροσκοπικές εικόνες για την πλήρη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος.

Η λογική της σάρωσης μπορεί να περιγραφεί ως διαδικασία πλέγματος. Η επιφάνεια συλλογής χωρίζεται νοητά σε μικρότερες υποπεριοχές, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί στο πεδίο θέασης μιας μικροσκοπικής λήψης. Το σύστημα μετακινείται διαδοχικά από θέση σε θέση, ώστε να καταγραφεί ολόκληρη η περιοχή συλλογής. Με αυτόν τον τρόπο, η συνολική επιφάνεια των 5×5 mm αναλύεται μέσω πολλών επιμέρους εικόνων, οι οποίες μπορούν στη συνέχεια να εξεταστούν είτε ανεξάρτητα είτε ως τμήματα μιας συνολικής σάρωσης.

Πριν από την έναρξη της λήψης εικόνων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κίνηση του μικροσκοπίου στον άξονα x για τη ρύθμιση της εστίασης. Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική επειδή η κολλητική ταινία, η επιφάνεια συλλογής και τα ίδια τα μικροσωματίδια μπορεί να παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις ως προς το επίπεδο εστίασης. Η ελεγχόμενη μετακίνηση του μικροσκοπίου προς τα μέσα και προς τα έξω επιτρέπει τη βελτίωση της ευκρίνειας πριν ή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λήψης.

Η ακριβής εστίαση είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία της οπτικής αναγνώρισης. Εικόνες που είναι θολές ή εκτός εστίασης μπορούν να οδηγήσουν σε ασαφή περιγράμματα, μειωμένη αντίθεση και δυσκολία στον διαχωρισμό των μικροσωματιδίων από το υπόβαθρο. Επομένως, η δυνατότητα ελέγχου της απόστασης φακού-ταινίας δεν αποτελεί απλώς μηχανική ευκολία, αλλά βασική προϋπόθεση για τη σταθερότητα της επεξεργασίας εικόνας.

Κατά τη διαδικασία σάρωσης, κάθε λήψη μπορεί να συνδέεται με τη θέση των αξόνων τη στιγμή της καταγραφής. Έτσι, κάθε μικροσκοπική εικόνα δεν αποτελεί μόνο ένα ανεξάρτητο αρχείο, αλλά συνοδεύεται από πληροφορία θέσης μέσα στην περιοχή των 5×5 mm. Η πληροφορία αυτή είναι χρήσιμη για την οργάνωση των δεδομένων, επειδή επιτρέπει να γνωρίζουμε ποιο τμήμα της επιφάνειας συλλογής αντιστοιχεί σε κάθε εικόνα.

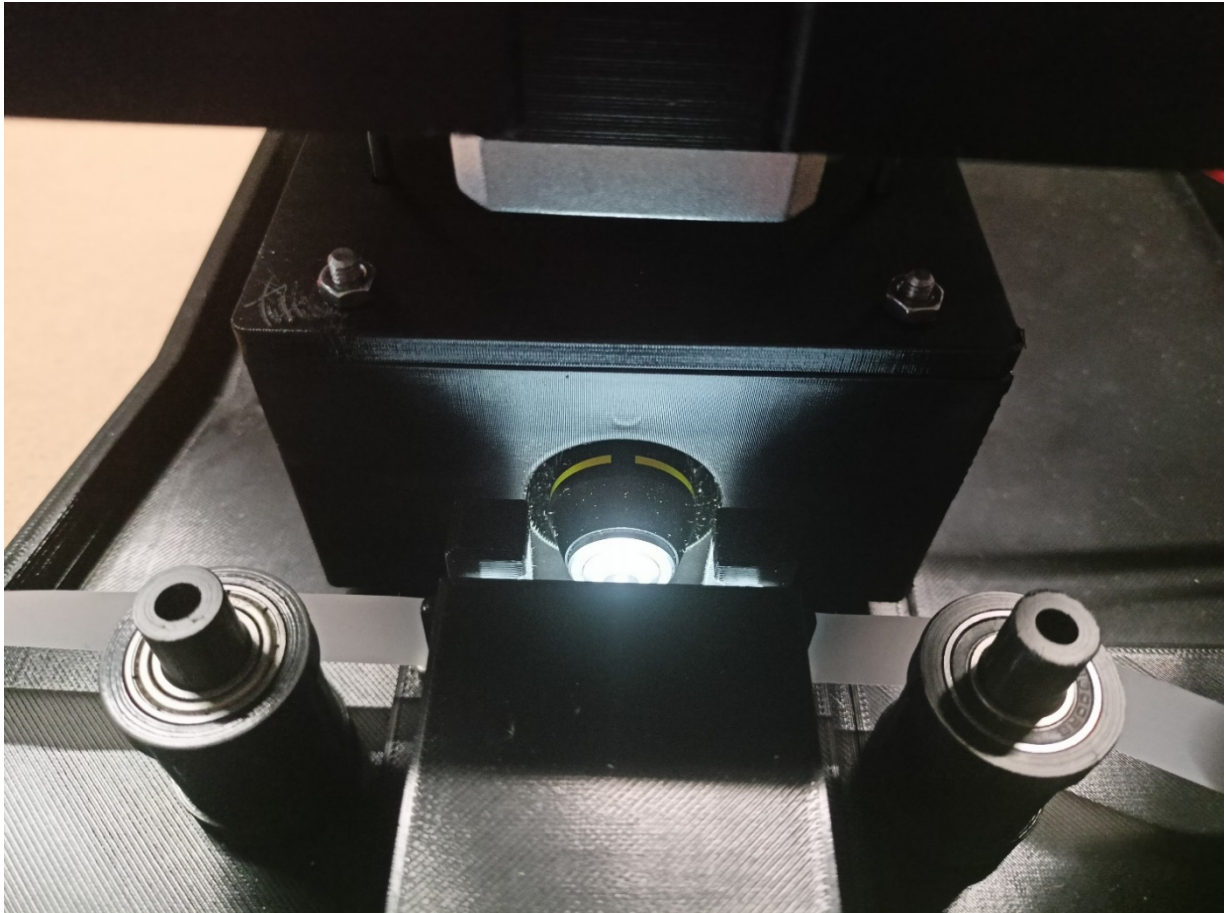
Η καταγραφή πολλών εικόνων από διαφορετικές θέσεις έχει επίσης πλεονέκτημα ως προς την αντιπροσωπευτικότητα της μέτρησης. Τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια μπορεί να μην κατανέμονται ομοιόμορφα πάνω στην κολλητική επιφάνεια. Αν η ανάλυση βασιζόταν μόνο σε μία μικροσκοπική εικόνα, υπήρχε πιθανότητα το αποτέλεσμα να μην αντιπροσωπεύει σωστά το σύνολο της περιοχής συλλογής. Αντίθετα, η σάρωση πολλών υποπεριοχών επιτρέπει την εξαγωγή πιο ολοκληρωμένης εικόνας για την κατανομή των μικροσωματιδίων.

Η διαδικασία λήψης εικόνων οργανώνεται ώστε το σύστημα να ακολουθεί συγκεκριμένη ακολουθία θέσεων. Για παράδειγμα, μπορεί να πραγματοποιείται πρώτα η σάρωση μιας στήλης ή μιας γραμμής της περιοχής ενδιαφέροντος και στη συνέχεια να μετακινείται η ταινία ή το μικροσκόπιο στην επόμενη θέση. Η επαναληψιμότητα αυτής της διαδικασίας είναι σημαντική, επειδή επιτρέπει κάθε κύκλος δειγματοληψίας να αναλύεται με παρόμοιο τρόπο.

Η εκτέλεση των διαδοχικών μετακινήσεων πραγματοποιείται μέσω του μηχανισμού κίνησης που περιγράφηκε προηγουμένως, ενώ η λήψη κάθε εικόνας γίνεται όταν το σύστημα έχει φτάσει στην

επιθυμητή θέση. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε μικροσκοπική εικόνα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη υποπεριοχή της επιφάνειας συλλογής. Η σταθερή και επαναλήψιμη μετακίνηση μειώνει τις μηχανικές ταλαντώσεις και βελτιώνει την πιθανότητα λήψης καθαρών εικόνων.

Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία μικροσκοπικής σάρωσης μετατρέπει την επιφάνεια συλλογής από ένα στατικό δείγμα σε οργανωμένο σύνολο εικόνων. Κάθε εικόνα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη υποπεριοχή, ενώ όλες μαζί περιγράφουν την περιοχή που εκτέθηκε στη ροή του αέρα κατά το δειγματοληπτικό παράθυρο. Έτσι, το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει πιο αξιόπιστη οπτική αναγνώριση και ποσοτική αξιολόγηση των αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων.



Σχήμα 4.9: Διάταξη εστίασης και λήψης μικροσκοπικών εικόνων πάνω στην κολλητική ταινία συλλογής

4.6 Οπτική αναγνώριση, διακρίβωση και επεξεργασία δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση της μικροσκοπικής σάρωσης, οι εικόνες που έχουν ληφθεί από την επιφάνεια συλλογής χρησιμοποιούνται για την οπτική αναγνώριση και ανάλυση των αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Το στάδιο αυτό αποτελεί το βασικό σημείο στο οποίο η μικροσκοπική εικόνα μετατρέπεται από απλή οπτική πληροφορία σε δεδομένο μέτρησης. Κάθε εικόνα περιέχει πληροφορία σχετικά με τα σωματίδια που έχουν προσκολληθεί στην κολλητική επιφάνεια, τη θέση τους, τη μορφή τους και τη σχέση τους με το υπόβαθρο.

Η αρχική επεξεργασία των εικόνων μπορεί να βασιστεί σε τεχνικές προεπεξεργασίας παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στη μέτρηση μετατόπισης του IPMC. Η βελτίωση αντίθεσης, η εξομάλυνση θορύβου, η καταφλίσωση, η ανίχνευση ακμών και οι μορφολογικές πράξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον διαχωρισμό των μικροσωματιδίων από το υπόβαθρο της ταινίας. Η λευκή ματ επιφάνεια διευκολύνει την προεπεξεργασία, καθώς παρέχει πιο ομοιόμορφο υπόβαθρο για τον διαχωρισμό των μικροσωματιδίων.

Σκοπός της επεξεργασίας δεν είναι μόνο ο εντοπισμός πιθανών σωματιδίων, αλλά και η εξαγωγή χαρακτηριστικών από κάθε αντικείμενο που ανιχνεύεται. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να περιλαμβάνουν το μέγεθος, την επιφάνεια, το περίγραμμα, τη μορφολογία, την κυκλικότητα, την υφή και τη φωτεινότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση διαφορετικών κατηγοριών μικροσωματιδίων, καθώς διαφορετικά σωματίδια μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική γεωμετρία ή οπτική συμπεριφορά στην εικόνα.

Η οπτική αναγνώριση μπορεί να υποστηριχθεί με χρήση κατάλληλων συνόλων δεδομένων εικόνων αναφοράς. Τα σύνολα αυτά περιλαμβάνουν εικόνες γνωστών κατηγοριών μικροσωματιδίων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση σύγκρισης ή εκπαίδευσης αλγορίθμων αναγνώρισης. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα δεν περιορίζεται στην απλή ανίχνευση ύπαρξης σωματιδίων, αλλά μπορεί να υποστηρίξει τη διακρίβωση του τι αντιστοιχεί σε κάθε ανιχνευμένο αντικείμενο.

Η διαδικασία διακρίβωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή στην επιφάνεια συλλογής μπορεί να υπάρχουν διαφορετικά είδη αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων, όπως οργανικά ή ανόργανα σωματίδια, σκόνη, ίνες ή άλλα μικροσκοπικά στοιχεία. Η απλή ανίχνευση ενός αντικειμένου στην εικόνα δεν αρκεί για να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία. Απαιτείται σύγκριση με γνωστά πρότυπα ή χρήση αλγορίθμων αναγνώρισης, ώστε να εκτιμηθεί σε ποια κατηγορία ανήκει κάθε σωματίδιο.

Σε ένα απλούστερο επίπεδο, η αναγνώριση μπορεί να βασιστεί σε κανόνες που σχετίζονται με το μέγεθος και το σχήμα των αντικειμένων. Για παράδειγμα, πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες περιοχές μπορούν να απορριφθούν ως θόρυβος ή ως μη αντιπροσωπευτικά στοιχεία. Αντίστοιχα, αντικείμενα με συγκεκριμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά μπορούν να ταξινομηθούν σε πιθανές κατηγορίες. Η προσέγγιση αυτή είναι σχετικά απλή και μπορεί να λειτουργήσει ως πρώτο στάδιο φιλτραρίσματος.

Σε πιο προχωρημένο επίπεδο, μπορούν να αξιοποιηθούν τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning) ή βαθιάς μάθησης (deep learning). Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να εκπαιδευτούν με βάση εικόνες αναφοράς και να μάθουν να διακρίνουν διαφορετικές κατηγορίες μικροσωματιδίων με βάση τα οπτικά τους χαρακτηριστικά. Η χρήση τέτοιων τεχνικών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν η διαφοροποίηση μεταξύ κατηγοριών δεν μπορεί να γίνει εύκολα με απλούς κανόνες ή όταν τα σωματίδια παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στη μορφή τους.

Η έξοδος της διαδικασίας αναγνώρισης μπορεί να είναι η κατηγορία κάθε ανιχνευμένου σωματιδίου, η θέση του στην εικόνα και ένας βαθμός εμπιστοσύνης ή πιθανότητας ταξινόμησης. Με βάση τα αποτελέσματα όλων των εικόνων που αντιστοιχούν σε ένα δειγματοληπτικό παράθυρο, μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό εμφάνισης κάθε κατηγορίας μικροσωματιδίων. Έτσι, το σύστημα μπορεί να

παράγει συγκεντρωτική πληροφορία για το δείγμα που συλλέχθηκε μέσα στο χρονικό διάστημα των 30 λεπτών.

Η εξαγωγή ποσοστών είναι σημαντική επειδή επιτρέπει τη μετάβαση από την ανάλυση μεμονωμένων εικόνων σε συνολική αξιολόγηση του δείγματος. Αντί ο χρήστης να εξετάζει χειροκίνητα κάθε εικόνα, το σύστημα μπορεί να υπολογίζει πόσα σωματίδια εντοπίστηκαν, σε ποιες κατηγορίες ταξινομήθηκαν και ποιο είναι το σχετικό ποσοστό κάθε κατηγορίας. Με αυτόν τον τρόπο, η μικροσκοπική απεικόνιση μετατρέπεται σε πιο οργανωμένη και ποσοτική διαδικασία.

Παράλληλα, είναι σημαντικό να αξιολογείται και η ποιότητα των εικόνων που χρησιμοποιούνται για αναγνώριση. Εικόνες με κακή εστίαση, έντονες αντανakλάσεις, χαμηλή αντίθεση ή αυξημένο θόρυβο μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες ανιχνεύσεις ή ταξινομήσεις. Για τον λόγο αυτό, η διαδικασία επεξεργασίας μπορεί να περιλαμβάνει και δείκτες ποιότητας εικόνας, ώστε να επισημαίνονται εικόνες που χρειάζονται επανάληψη, απόρριψη ή χειροκίνητο έλεγχο.

Η έννοια της διακρίβωσης δεν αφορά μόνο την αναγνώριση του είδους των σωματιδίων, αλλά και τη σταθερότητα της διαδικασίας μέτρησης. Για να είναι αξιόπιστο το σύστημα, οι εικόνες πρέπει να λαμβάνονται με παρόμοιες συνθήκες φωτισμού, εστίασης και μεγέθυνσης. Επομένως, η μηχανική σταθερότητα, η σωστή εστίαση, η σταθερή θέση της ταινίας και η ομοιομορφία του φωτισμού επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα της αλγοριθμικής αναγνώρισης.

Τα αποτελέσματα της αναγνώρισης μπορούν να αποθηκεύονται μαζί με τα μεταδεδομένα κάθε εικόνας, όπως ο χρόνος λήψης, η θέση της ταινίας, η θέση του μικροσκοπίου και το αντίστοιχο δειγματοληπτικό παράθυρο. Με τον τρόπο αυτό, κάθε αποτέλεσμα συνδέεται με συγκεκριμένη χρονική και χωρική πληροφορία. Αυτό επιτρέπει την αναζήτηση, την επανεξέταση και τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών χρονικών παραθύρων.

Ως εκ τούτου, η οπτική αναγνώριση και επεξεργασία δεδομένων αποτελεί το στάδιο στο οποίο ολοκληρώνεται η λειτουργία του συστήματος ως πλατφόρμα μέτρησης. Η συλλογή των μικροσωματιδίων, η μηχανική σάρωση και η λήψη εικόνων παρέχουν τα πρωτογενή δεδομένα. Η αλγοριθμική αναγνώριση μετατρέπει τα δεδομένα αυτά σε πληροφορία σχετικά με την παρουσία, την κατηγορία και το ποσοστό των αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Έτσι, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για οπτική παρατήρηση, αλλά και για οργανωμένη μικροσκοπική ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων.

4.7 Σύνδεση με τη φιλοσοφία κόμβου αισθητήρων και επεξεργασίας πραγματικού χρόνου

Η λειτουργία του μικροσκοπικού συστήματος για τη μέτρηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη φιλοσοφία των σύγχρονων κόμβων αισθητήρων (*sensor nodes*). Σε έναν κλασικό κόμβο αισθητήρων, το σύστημα συλλέγει δεδομένα από το περιβάλλον, τα μεταφέρει σε υπολογιστική μονάδα, τα αποθηκεύει, τα ελέγχει ποιοτικά και στη συνέχεια τα επεξεργάζεται για την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας. Στην παρούσα διάταξη, η βασική

διαφορά είναι ότι το πρωτογενές δεδομένο δεν είναι απλώς μια αριθμητική μέτρηση από αισθητήρα, αλλά μια μικροσκοπική εικόνα της επιφάνειας συλλογής.

Η φιλοσοφία διαχείρισης δεδομένων που υιοθετείται εδώ έχει παρουσιαστεί προηγουμένως στο 10th International Workshop on Microsystems, σε σύστημα περιβαλλοντικής παρακολούθησης βασισμένο σε κόμβο αισθητήρων [35]. Στο σύστημα εκείνο, δεδομένα ποιότητας αέρα συλλέγονταν από αισθητήρες, οργανώνονταν χρονικά και υποβάλλονταν σε διαδικασίες ελέγχου ποιότητας, ανίχνευσης ανωμαλιών, επεξεργασίας και απεικόνισης. Αντίστοιχα, στο παρόν σύστημα, οι μικροσκοπικές εικόνες που λαμβάνονται από την κολλητική επιφάνεια οργανώνονται ως δεδομένα μέτρησης, ελέγχονται ως προς την ποιότητά τους και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με τα αερομεταφερόμενα μικροσωματίδια.

Η έννοια της λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο (*real-time monitoring*) στην παρούσα εφαρμογή δεν περιορίζεται μόνο στη γρήγορη λήψη εικόνων. Περιλαμβάνει ολόκληρη τη διαδικασία από τη δειγματοληψία έως την ανάλυση. Το σύστημα λειτουργεί σε χρονικά παράθυρα των 30 λεπτών, κατά τα οποία πραγματοποιείται η συλλογή των μικροσωματιδίων. Μετά την ολοκλήρωση κάθε παραθύρου, η ταινία μετακινείται, η περιοχή συλλογής σαρώνεται μικροσκοπικά και οι εικόνες μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία. Έτσι, κάθε χρονικό παράθυρο αντιστοιχεί σε ένα σύνολο εικόνων και αποτελεσμάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χρονική παρακολούθηση της μεταβολής των μικροσωματιδίων.

Σε αυτή τη λογική, κάθε κύκλος λειτουργίας του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ολοκληρωμένη μονάδα δειγματοληψίας και ανάλυσης. Η μονάδα αυτή περιλαμβάνει τη συλλογή του δείγματος, τη μετακίνηση της ταινίας, τη μικροσκοπική σάρωση, την αποθήκευση εικόνων, την επεξεργασία, την αναγνώριση και την εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων. Με την επανάληψη αυτής της διαδικασίας σε διαδοχικά χρονικά παράθυρα, μπορεί να δημιουργηθεί χρονοσειρά αποτελεσμάτων, αντίστοιχη με τις χρονοσειρές που παράγονται σε συστήματα περιβαλλοντικών αισθητήρων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος ποιότητας (*quality control - QC*) των δεδομένων. Στο παρόν σύστημα, ο έλεγχος ποιότητας δεν αφορά μόνο αριθμητικές τιμές, αλλά κυρίως την ποιότητα των εικόνων και των αποτελεσμάτων αναγνώρισης. Εικόνες με ανεπαρκή εστίαση, χαμηλή αντίθεση, έντονες αντανakλάσεις, θόρυβο ή ανομοιόμορφο φωτισμό μπορούν να χαρακτηριστούν ως χαμηλής αξιοπιστίας. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα μπορεί να αποφεύγει την εξαγωγή συμπερασμάτων από εικόνες που δεν είναι κατάλληλες για αλγοριθμική αναγνώριση.

Αντίστοιχα, η ανίχνευση ανωμαλιών (*anomaly detection*) μπορεί να αξιοποιηθεί για τον εντοπισμό μη φυσιολογικών καταστάσεων στη λειτουργία του συστήματος. Τέτοιες καταστάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν υπερβολικά θολές εικόνες, ξαφνική απώλεια φωτισμού, μη αναμενόμενη συσσώρευση υλικού στην ταινία, αστοχία μετακίνησης ή σημαντική απόκλιση στον αριθμό των ανιχνευμένων μικροσωματιδίων σε σχέση με προηγούμενα χρονικά παράθυρα. Η αναγνώριση τέτοιων περιπτώσεων είναι σημαντική, επειδή βοηθά στη διάκριση ανάμεσα σε πραγματικές μεταβολές του περιβάλλοντος και σε τεχνικά προβλήματα της διάταξης.

Η αποθήκευση των δεδομένων μπορεί να οργανωθεί με τρόπο ώστε κάθε εικόνα να συνδέεται με μεταδεδομένα. Τα μεταδεδομένα αυτά μπορούν να περιλαμβάνουν τον χρόνο δειγματοληψίας, τη θέση της εικόνας μέσα στην περιοχή σάρωσης, τη θέση των αξόνων, το αντίστοιχο δειγματοληπτικό παράθυρο και τα αποτελέσματα της αναγνώρισης. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε εικόνα αποκτά σαφές πλαίσιο αναφοράς και μπορεί να επανεξεταστεί ή να συγκριθεί με άλλες εικόνες του ίδιου ή διαφορετικού χρονικού παραθύρου.

Η σύνδεση με διαδικτυακό πίνακα ελέγχου (*web dashboard*) αποτελεί φυσική συνέχεια αυτής της φιλοσοφίας. Ένα τέτοιο περιβάλλον μπορεί να παρουσιάζει στον χρήστη τις εικόνες που λαμβάνονται, τον αριθμό των ανιχνευμένων μικροσωματιδίων, τα ποσοστά ανά κατηγορία, δείκτες ποιότητας εικόνας και πιθανές προειδοποιήσεις για ανωμαλίες. Έτσι, το σύστημα δεν λειτουργεί μόνο ως μηχανισμός συλλογής και απεικόνισης, αλλά ως ολοκληρωμένη πλατφόρμα παρακολούθησης και παρουσίασης αποτελεσμάτων.

Η διάκριση μεταξύ online και offline επεξεργασίας είναι επίσης χρήσιμη. Σε online λειτουργία, το σύστημα μπορεί να εκτελεί βασική αναγνώριση και να παρέχει άμεσα αποτελέσματα μετά από κάθε κύκλο δειγματοληψίας. Σε offline λειτουργία, οι αποθηκευμένες εικόνες μπορούν να επανεξετάζονται με πιο σύνθετους αλγορίθμους, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας, τον επανέλεγχο αμφίβολων περιπτώσεων και την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Η διπλή αυτή λειτουργία προσφέρει ευελιξία, επειδή επιτρέπει τόσο γρήγορη παρακολούθηση όσο και πιο αναλυτική μεταγενέστερη επεξεργασία.

Η σύνδεση αυτή ενισχύει σημαντικά τον χαρακτήρα της διάταξης, καθώς το σύστημα δεν περιορίζεται στη μηχανική συλλογή και απεικόνιση μικροσωματιδίων, αλλά οργανώνει ολόκληρη τη διαδικασία ως αλυσίδα δεδομένων: συλλογή, απεικόνιση, αποθήκευση, έλεγχος ποιότητας, αναγνώριση, στατιστική επεξεργασία και παρουσίαση. Με αυτόν τον τρόπο, η μικροσκοπική απεικόνιση εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο έξυπνης περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη και ανάπτυξη του οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης. Η εργασία επικεντρώθηκε αρχικά στη μέτρηση μικρομετατοπίσεων ενεργοποιητή IPMC σε υδάτινο περιβάλλον, αξιοποιώντας μικροσκοπική απεικόνιση, οπτική βαθμονόμηση, ηλεκτρονική οδήγηση και αλγοριθμική επεξεργασία εικόνας.

Παράλληλα, η εργασία επεκτάθηκε στην υλοποίηση μικροσκοπικού συστήματος για τη μέτρηση και οπτική παρακολούθηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Η επέκταση αυτή ανέδειξε ότι η ίδια βασική αρχιτεκτονική μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο για τη μέτρηση μετατόπισης ενός δείγματος, αλλά και για τη συλλογή, σάρωση, απεικόνιση και ανάλυση μικροσκοπικών αντικειμένων που προσκολλώνται σε επιφάνεια δειγματοληψίας.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας, η τεχνική της συμβολή και οι προοπτικές αξιοποίησης του συστήματος σε μελλοντικές εφαρμογές μικροσκοπικής μέτρησης, περιβαλλοντικής παρακολούθησης και αυτοματοποιημένης ανάλυσης εικόνας.

5.1 Κύρια συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη και ανάπτυξη ενός οπτικού μικροσκοπικού συστήματος μέτρησης, με κύρια πειραματική εφαρμογή τη μέτρηση μικρομετατοπίσεων ενεργοποιητή Ιοντικού Πολυμερικού Μεταλλικού Σύνθετου Υλικού (*Ionic Polymer Metal Composite - IPMC*) σε υδάτινο περιβάλλον. Η εργασία βασίστηκε στην ιδέα ότι μια μικροσκοπική εικόνα μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο ως μέσο οπτικής παρατήρησης, αλλά και ως μετρητικό σήμα, εφόσον το οπτικό σύστημα είναι κατάλληλα βαθμονομημένο και συνοδεύεται από αξιόπιστη αλγοριθμική επεξεργασία.

Ο βασικός στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης διάταξης που να συνδυάζει οπτική απεικόνιση, ηλεκτρονική οδήγηση, απόκτηση δεδομένων, επεξεργασία εικόνας και εξαγωγή ποσοτικής πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό, η μέτρηση της μετατόπισης δεν αντιμετωπίστηκε ως μια απλή οπτική παρατήρηση του δείγματος, αλλά ως οργανωμένη μετρητική διαδικασία, στην οποία κάθε υποσύστημα επηρεάζει την τελική αξιοπιστία του αποτελέσματος.

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη που περιλαμβάνει γυάλινη δεξαμενή, σωληνωτό μικροσκόπιο, χρωματικό αντικειμενικό φακό 10×, ψηφιακή κάμερα και ομοιόμορφο οπίσθιο φωτισμό (*backlighting*). Η διάταξη επέτρεψε την πλευρική απεικόνιση του IPMC μέσα σε απιονισμένο νερό, παρέχοντας καθαρή αντίθεση μεταξύ του δείγματος και του υποβάθρου. Η χρήση οπίσθιου φωτισμού αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επέτρεψε την καθαρή αποτύπωση του περιγράμματος του ενεργοποιητή, στοιχείο απαραίτητο για την επεξεργασία εικόνας και τον εντοπισμό του ελεύθερου άκρου.

Τα αποτελέσματα της οπτικής βαθμονόμησης έδειξαν ότι το σύστημα μπορεί να επιτύχει χωρική δειγματοληψία της τάξης του υπομικρομέτρου, με τιμές περίπου 0,536 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ στον οριζόντιο άξονα και 0,518 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ στον κατακόρυφο άξονα. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η προτεινόμενη διάταξη μπορεί να καταγράψει πολύ μικρές γεωμετρικές μεταβολές στην εικόνα και να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση μικρομετατοπίσεων. Παράλληλα, η παραμόρφωση του φακού παρέμεινε περιορισμένη, με μέγιστη απόκλιση περίπου +2,8% στα άκρα του πεδίου θέασης, γεγονός που υποδηλώνει ικανοποιητική σταθερότητα της γεωμετρικής μεγέθυνσης.

Σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η χωρική δειγματοληψία, αν και δεν ταυτίζεται πλήρως με την απόλυτη μετρητική ακρίβεια, αποτελεί βασική ένδειξη της δυνατότητας του συστήματος να λειτουργήσει σε μικροκλίμακα. Η τελική ακρίβεια εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως η ποιότητα του φωτισμού, η καθαρότητα του περιγράμματος, η σταθερότητα της διάταξης, η σωστή εστίαση και η απόδοση του αλγορίθμου εντοπισμού. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η οπτική διάταξη παρέχει επαρκή βάση για αξιόπιστη μέτρηση μικρομετατοπίσεων σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες.

Ένα ακόμη βασικό συμπέρασμα αφορά την απόδοση του αλγορίθμου παρακολούθησης του ελεύθερου άκρου. Η χρήση προεπεξεργασίας εικόνας, ανίχνευσης ακμών, χαρακτηριστικών σημείων, γεωμετρικού περιορισμού σταθερού μήκους και προσαρμοστικής αναζήτησης βασισμένης σε πλέγμα επέτρεψε τον αξιόπιστο εντοπισμό της θέσης του IPMC σε διαδοχικά καρέ. Η προτεινόμενη μέθοδος μείωσε σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο, καθώς απέφυγε την πλήρη αναζήτηση σε ολόκληρη την εικόνα και περιόρισε την επεξεργασία στις πιθανότερες περιοχές εντοπισμού του άκρου.

Η δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο αποτελεί επίσης σημαντικό αποτέλεσμα της εργασίας. Ο μέσος χρόνος επεξεργασίας ήταν περίπου 10 ms ανά καρέ όταν το άκρο εντοπιζόταν στην πρώτη υποψήφια περιοχή, ενώ παρέμενε σε αποδεκτά επίπεδα ακόμη και όταν η αναζήτηση επεκτεινόταν σε γειτονικές περιοχές. Σε συνδυασμό με την ακρίβεια εντοπισμού που έφτασε περίπου το 99% για συχνότητες ενεργοποίησης κάτω από 2 Hz, το σύστημα απέδειξε ότι μπορεί να υποστηρίξει παρακολούθηση μικρομετατοπίσεων με ρυθμό συμβατό με την καταγραφή βίντεο.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση κυκλώματος προστασίας και ανίχνευσης σφαλμάτων ενίσχυσε την ασφάλεια και την αξιοπιστία της πειραματικής διαδικασίας. Το σύστημα μπορούσε να αναγνωρίζει συνθήκες υπέρτασης, υπότασης, ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος, προστατεύοντας τόσο το δείγμα IPMC όσο και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης. Η ύπαρξη αυτών των μηχανισμών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η πειραματική διάταξη συνδυάζει ηλεκτρική διέγερση, υδάτινο περιβάλλον και ευαίσθητο υλικό.

Πέρα από τη βασική εφαρμογή σε IPMC, η εργασία επεκτάθηκε και στην ανάπτυξη μικροσκοπικού συστήματος για τη μέτρηση και οπτική παρακολούθηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Η διάταξη αυτή βασίζεται στη συλλογή μικροσωματιδίων πάνω σε κολλητική επιφάνεια, στη μηχανική μετακίνηση της ταινίας και του μικροσκοπικού συστήματος, καθώς και στη λήψη διαδοχικών εικόνων για οπτική αναγνώριση, διακρίβωση και ανάλυση. Με τον τρόπο αυτό, η

αρχική μικροσκοπική διάταξη δεν περιορίστηκε στη μέτρηση μετατόπισης ενός ενεργοποιητή, αλλά επεκτάθηκε σε μια πιο γενική πλατφόρμα μικροσκοπικής δειγματοληψίας και περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

Η υλοποίηση του συστήματος αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων έδειξε ότι η ίδια βασική φιλοσοφία μπορεί να εφαρμοστεί και σε διαφορετικό είδος μέτρησης. Στην περίπτωση του IPMC, η πληροφορία εξάγεται από τη μετατόπιση του ελεύθερου άκρου σε διαδοχικά καρέ. Στην περίπτωση των μικροσωματιδίων, η πληροφορία προκύπτει από την απεικόνιση της επιφάνειας συλλογής, την αναγνώριση των σωματιδίων και την εξαγωγή ποσοτικών ή κατηγορικών αποτελεσμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις, η μικροσκοπική εικόνα λειτουργεί ως πρωτογενές δεδομένο μέτρησης.

Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν ότι ένα οπτικό μικροσκοπικό σύστημα χαμηλού κόστους μπορεί να αξιοποιηθεί ως αξιόπιστη πλατφόρμα μέτρησης και παρακολούθησης σε μικροκλίμακα, εφόσον συνδυαστεί με κατάλληλο φωτισμό, οπτική βαθμονόμηση, σταθερή μηχανική διάταξη, ελεγχόμενη ηλεκτρονική υποστήριξη και αλγοριθμική επεξεργασία εικόνας.

5.2 Τεχνική συμβολή της εργασίας

Η τεχνική συμβολή της παρούσας εργασίας εντοπίζεται κυρίως στην ολοκληρωμένη προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του συστήματος μέτρησης. Η εργασία δεν περιορίστηκε στην επιλογή ενός μικροσκοπίου ή μιας κάμερας, αλλά αντιμετώπισε το πρόβλημα της μέτρησης ως μια πλήρη αλυσίδα υποσυστημάτων. Η αλυσίδα αυτή περιλαμβάνει το οπτικό μέρος, το ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης, την απόκτηση δεδομένων, την προστασία του συστήματος, τη μηχανική σταθερότητα και την επεξεργασία εικόνας.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ανάπτυξη μιας προσαρμοσμένης οπτικής μικροσκοπικής διάταξης για τη μέτρηση μετατοπίσεων σε υδάτινο περιβάλλον. Η χρήση σωληνωτού μικροσκοπίου, αντικειμενικού φακού 10×, ψηφιακής κάμερας και οπίσθιου φωτισμού επέτρεψε την καθαρή πλευρική απεικόνιση του IPMC. Η διάταξη αυτή προσφέρει μια πιο απλή και οικονομικά προσιτή εναλλακτική σε σχέση με πιο σύνθετες τεχνικές μέτρησης, όπως η Δονησιομέτρηση Doppler με Λείζερ (*Laser Doppler Vibrometry - LDV*) ή η Ψηφιακή Συσχέτιση Εικόνας (*Digital Image Correlation - DIC*).

Η εφαρμογή της διάταξης σε υδάτινο περιβάλλον αποτελεί επίσης σημαντικό στοιχείο της εργασίας. Η μέτρηση IPMC μέσα σε νερό παρουσιάζει δυσκολίες λόγω διάθλασης, πιθανών μικροφυσαλίδων, μηχανικών διαταραχών και ηλεκτρικών περιορισμών. Παρά τις δυσκολίες αυτές, η διάταξη κατάφερε να παρέχει καθαρή εικόνα του δείγματος και να επιτρέψει την εξαγωγή ποσοτικής πληροφορίας. Αυτό δείχνει ότι η οπτική μικροσκοπική μέτρηση μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιβάλλοντα όπου άλλες τεχνικές είναι ακριβές, δύσκολες στην ευθυγράμμιση ή ευαίσθητες σε παρεμβολές.

Σημαντικό μέρος της τεχνικής συμβολής αφορά και το ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης και απόκτησης δεδομένων. Η παραγωγή ελεγχόμενου ημιτονοειδούς σήματος, η μετατροπή του σε διπολική

κυματομορφή, η χρήση βαθμίδας push-pull και η μέτρηση του ρεύματος μέσω αντίστασης shunt επέτρεψαν την ελεγχόμενη ηλεκτρική διέγερση του IPMC. Παράλληλα, η δυνατότητα καταγραφής ηλεκτρικών μεγεθών επιτρέπει τη συσχέτιση της ηλεκτρικής διέγερσης με τη μηχανική απόκριση του δείγματος.

Η ενσωμάτωση μηχανισμών προστασίας ενισχύει την πρακτική αξιοπιστία της διάταξης. Η ανίχνευση υπέρτασης, υπότασης, μη φυσιολογικής εξόδου της βαθμίδας push-pull, ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος προσδίδει στο σύστημα μεγαλύτερη λειτουργική ασφάλεια. Σε πειραματικά συστήματα που περιλαμβάνουν νερό, ηλεκτρική διέγερση και ευαίσθητα δείγματα, η προστασία αυτή δεν αποτελεί απλώς βοηθητικό χαρακτηριστικό, αλλά βασικό στοιχείο αξιοπιστίας.

Η αλγοριθμική επεξεργασία εικόνας αποτελεί έναν ακόμη κεντρικό άξονα της εργασίας. Η εικόνα που λαμβάνεται από το μικροσκόπιο μετατρέπεται σε μετρητικό δεδομένο μέσω μιας ακολουθίας επεξεργασίας που περιλαμβάνει προεπεξεργασία, δημιουργία δυαδικής μάσκας, ανίχνευση ακμών Canny, υπολογισμό χαρακτηριστικών σημείων Harris, σκελετοποίηση και προσαρμοστική αναζήτηση βασισμένη σε πλέγμα. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών επέτρεψε την αξιόπιστη παρακολούθηση του ελεύθερου άκρου του IPMC χωρίς να απαιτείται πλήρης επεξεργασία ολόκληρου του καρέ σε κάθε χρονική στιγμή.

Η χρήση γεωμετρικού περιορισμού σταθερού μήκους ενισχύει περαιτέρω τη σταθερότητα της μεθόδου. Ο περιορισμός αυτός αξιοποιεί τη φυσική συμπεριφορά του IPMC, το οποίο κάμπτεται χωρίς ουσιαστική μεταβολή του μήκους του, ώστε να περιορίσει τις πιθανές θέσεις του άκρου σε φυσικά αποδεκτές περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος δεν βασίζεται μόνο σε καθαρά τοπικά χαρακτηριστικά της εικόνας, αλλά ενσωματώνει και γεωμετρική πληροφορία του ίδιου του δείγματος.

Σημαντική τεχνική συμβολή αποτελεί επίσης η υλοποίηση μικροσκοπικού συστήματος για τη μέτρηση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Η διάταξη αυτή συνδυάζει θάλαμο συλλογής, κολλητική επιφάνεια δειγματοληψίας, χοάνη, ανεμιστήρα, μηχανισμό μετακίνησης ταινίας, ελεγχόμενη κίνηση μικροσκοπίου, υπολογιστική μονάδα Raspberry Pi και μικροελεγκτικό υποσύστημα βασισμένο στο ESP32-S3. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα μετατρέπεται από στατική μικροσκοπική διάταξη σε αυτοματοποιημένη πλατφόρμα συλλογής, σάρωσης και απεικόνισης μικροσκοπικών δειγμάτων.

Η χρήση βηματικών κινητήρων, οδηγών TMC2225 και του μικροελεγκτικού υποσυστήματος ESP32-S3 επιτρέπει την ελεγχόμενη μετακίνηση της ταινίας και του μικροσκοπικού υποσυστήματος. Το Raspberry Pi αποστέλλει εντολές κίνησης μέσω UART στο ESP32-S3, το οποίο αναλαμβάνει την οδήγηση των οδηγών TMC2225 για την κίνηση των βηματικών κινητήρων των αξόνων. Η κίνηση του μικροσκοπίου προς τα μέσα και προς τα έξω υποστηρίζει τη ρύθμιση της εστίασης, ενώ η κατακόρυφη κίνηση του μικροσκοπίου και η μετακίνηση της ταινίας επιτρέπουν τη συστηματική σάρωση της επιφάνειας συλλογής. Η δυνατότητα κάλυψης περιοχής περίπου 5×5 mm μέσω διαδοχικών λήψεων καθιστά τη διάταξη κατάλληλη για πιο αντιπροσωπευτική μικροσκοπική ανάλυση σε σχέση με μία μεμονωμένη εικόνα.

Η εργασία αναδεικνύει επίσης τη σημασία της χαμηλού κόστους και αναπαραγωγίμης μετρολογίας. Πολλές τεχνικές υψηλής ακρίβειας απαιτούν εξειδικευμένο, ακριβό και δύσκολα μεταφέρσιμο εξοπλισμό. Αντίθετα, η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται σε πιο προσιτά εξαρτήματα, σε ελεγχόμενη μηχανική κίνηση και σε αλγοριθμική επεξεργασία, προσφέροντας μια πρακτική λύση για εργαστηριακές διατάξεις μικρής κλίμακας, εκπαιδευτικά περιβάλλοντα ή αρχικά στάδια ανάπτυξης πρωτοτύπων.

Τέλος, η εργασία συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας ενιαίας φιλοσοφίας μικροσκοπικής μέτρησης. Η ίδια βασική αρχιτεκτονική μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη μέτρηση μικρομετατοπίσεων όσο και για την απεικόνιση και αναγνώριση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων. Με αυτή την έννοια, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν αποτελεί μόνο μια επιμέρους εφαρμογή μέτρησης IPMC, αλλά μια βάση για την ανάπτυξη ευρύτερων οπτικών μικροσκοπικών συστημάτων μέτρησης, παρακολούθησης και ανάλυσης.

5.3 Προοπτικές αξιοποίησης

Η συνολική αποτίμηση της παρούσας εργασίας είναι ότι το προτεινόμενο οπτικό μικροσκοπικό σύστημα πέτυχε τον βασικό του στόχο, δηλαδή την ανάπτυξη μιας λειτουργικής και ολοκληρωμένης πλατφόρμας μέτρησης μικρομετατοπίσεων και μικροσκοπικής παρακολούθησης. Η εργασία έδειξε ότι η μικροσκοπική απεικόνιση, όταν συνδυάζεται με κατάλληλη βαθμονόμηση, σταθερή οπτική διάταξη, ελεγχόμενη μηχανική κίνηση και αλγοριθμική επεξεργασία εικόνας, μπορεί να αξιοποιηθεί ως πρακτικό εργαλείο ποσοτικής μέτρησης.

Η εφαρμογή του συστήματος σε ενεργοποιητή IPMC αποτέλεσε κατάλληλη πειραματική περίπτωση, καθώς το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει μικρές και συνεχείς μετατοπίσεις υπό ηλεκτρική διέγερση. Η λειτουργία του μέσα σε υδατικό περιβάλλον αύξησε τη δυσκολία της μέτρησης, επειδή εισάγονται επιπλέον παράγοντες όπως διάθλαση, πιθανές μικροφυσαλίδες, μηχανικές διαταραχές του νερού και απαιτήσεις ηλεκτρικής ασφάλειας. Παρ' όλα αυτά, η προτεινόμενη διάταξη κατάφερε να παρέχει καθαρή απεικόνιση του δείγματος και να υποστηρίξει την εξαγωγή ποσοτικής μετατόπισης.

Παράλληλα, η επέκταση του συστήματος σε εφαρμογή μέτρησης αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων δείχνει ότι η ίδια βασική αρχιτεκτονική μπορεί να αξιοποιηθεί και πέρα από τη μέτρηση IPMC. Η συλλογή μικροσωματιδίων πάνω σε κολλητική επιφάνεια, η μηχανική μετακίνηση της ταινίας, η ελεγχόμενη σάρωση της περιοχής συλλογής και η λήψη πολλαπλών εικόνων δημιουργούν ένα πλαίσιο μικροσκοπικής δειγματοληψίας που μπορεί να υποστηρίξει οπτική αναγνώριση και ποσοτική αξιολόγηση.

Η διάταξη αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, καθώς μπορεί να οργανώνει τη δειγματοληψία σε χρονικά παράθυρα και να συνδέει κάθε τμήμα της ταινίας με συγκεκριμένη χρονική περίοδο συλλογής. Με αυτόν τον τρόπο, τα μικροσκοπικά δεδομένα δεν παραμένουν απομονωμένες εικόνες, αλλά μπορούν να ενταχθούν σε χρονοσειρά αποτελεσμάτων.

Αυτό επιτρέπει τη μελέτη μεταβολών στη σύσταση ή στην παρουσία αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων με την πάροδο του χρόνου.

Οι περιορισμοί που αναδείχθηκαν στην εργασία μπορούν να αποτελέσουν βάση για μελλοντική βελτίωση. Στην περίπτωση της μέτρησης IPMC, το μικρό πεδίο θέασης, η ανάγκη σταθερού φωτισμού, η εξάρτηση από σωστή εστίαση και η αξιολόγηση κυρίως σε χαμηλές συχνότητες αποτελούν παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στην περίπτωση του συστήματος μικροσωματιδίων, η αξιοπιστία της αναγνώρισης εξαρτάται από την ποιότητα των εικόνων, τη σταθερότητα της σάρωσης, την ομοιομορφία της επιφάνειας συλλογής και τη διαθεσιμότητα κατάλληλων συνόλων εικόνων αναφοράς.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω βελτίωση της αλγοριθμικής αναγνώρισης. Η χρήση κατάλληλων συνόλων δεδομένων εικόνων αναφοράς μπορεί να επιτρέψει την εκπαίδευση ή αξιολόγηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα θα μπορούσε να αποκτήσει μεγαλύτερη ικανότητα διάκρισης διαφορετικών κατηγοριών μικροσωματιδίων, να μειώσει τις λανθασμένες ταξινομήσεις και να παρέχει πιο αξιόπιστα ποσοστά για κάθε κατηγορία.

Εξίσου σημαντική είναι η ανάπτυξη μιας πιο ολοκληρωμένης φιλοσοφίας απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων. Το σύστημα δεν πρέπει να περιορίζεται στη λήψη εικόνων, αλλά μπορεί να αποθηκεύει τα δεδομένα, να ελέγχει την ποιότητά τους, να επισημαίνει εικόνες χαμηλής αξιοπιστίας, να εντοπίζει ανωμαλίες και να παρουσιάζει τα αποτελέσματα με τρόπο κατανοητό στον χρήστη. Η μετάβαση από μια απλή μικροσκοπική διάταξη σε έναν κόμβο οπτικής μέτρησης επιτρέπει τη σύνδεση της μικροσκοπίας με τη λογική των σύγχρονων συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Σε αυτό το πλαίσιο, η διάκριση μεταξύ online και offline επεξεργασίας παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμη. Σε online λειτουργία, το σύστημα μπορεί να εκτελεί βασικό έλεγχο ποιότητας και αρχική αναγνώριση μετά από κάθε κύκλο δειγματοληψίας. Σε offline λειτουργία, οι αποθηκευμένες εικόνες μπορούν να επανεξετάζονται με πιο σύνθετους αλγορίθμους, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας, τον επανέλεγχο αμφίβολων περιπτώσεων και την εξαγωγή πιο αξιόπιστων στατιστικών συμπερασμάτων. Η διπλή αυτή λειτουργία καθιστά το σύστημα κατάλληλο τόσο για άμεση παρακολούθηση όσο και για αναλυτική ερευνητική χρήση.

Η αξία της παρούσας εργασίας δεν περιορίζεται επομένως στα συγκεκριμένα αποτελέσματα μέτρησης του IPMC. Η σημαντικότερη συμβολή της είναι ότι θέτει τη βάση για μια ευρύτερη κατηγορία οπτικών μικροσκοπικών συστημάτων μέτρησης, στα οποία η οπτική απεικόνιση, η ηλεκτρονική υποστήριξη, η μηχανική σταθερότητα, η ελεγχόμενη κίνηση και η αλγοριθμική επεξεργασία λειτουργούν ως ενιαίο σύνολο. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές εφαρμογές, όπου απαιτείται μέτρηση ή παρακολούθηση μικροσκοπικών φαινομένων.

Συμπερασματικά, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα ουσιαστικό βήμα προς την ανάπτυξη χαμηλού κόστους, ευέλικτων και επεκτάσιμων οπτικών μικροσκοπικών συστημάτων μέτρησης. Η ενσωμάτωση μικροσκοπικής απεικόνισης, μηχανικής κίνησης, ηλεκτρονικού ελέγχου, αλγορίθμων αναγνώρισης και οργανωμένης διαχείρισης δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε πιο

ολοκληρωμένα συστήματα, ικανά να παρακολουθούν μικροσκοπικά φαινόμενα σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, η εργασία μπορεί να αποτελέσει βάση για εφαρμογές σε ευφυή υλικά, βιοϊατρικές διατάξεις, περιβαλλοντική παρακολούθηση και ανάλυση αερομεταφερόμενων μικροσωματιδίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. S. W. Park, S. J. Kim, S. H. Park, J. Lee, H. Kim, and M. K. Kim, “Recent progress in development and applications of ionic polymer–metal composite,” *Micromachines*, vol. 13, Art. no. 1290, 2022.
- [2]. C. He, Y. Gu, J. Zhang, L. Ma, M. Yan, J. Mou, and Y. Ren, “Preparation and modification technology analysis of ionic polymer–metal composites (IPMCs),” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, Art. no. 3522, 2022.
- [3]. M. Luqman, H. M. Shaikh, A. Anis, S. M. Al-Zahrani, and M. A. Alam, “A convenient and simple ionic polymer–metal composite (IPMC) actuator based on a platinum-coated sulfonated poly(ether ether ketone)–polyaniline composite membrane,” *Polymers*, vol. 14, Art. no. 668, 2022.
- [4]. L. Yang, D. Zhang, X. Zhang, and A. Tian, “Fabrication and actuation of Cu–ionic polymer metal composite,” *Polymers*, vol. 12, Art. no. 460, 2020.
- [5]. G. Tang, D. Mei, X. Zhao, C. Zhao, L. Li, and Y. Wang, “A comprehensive survey of ionic polymer metal composite transducers: Preparation, performance optimization and applications,” *Soft Science*, vol. 3, Art. no. 9, 2023.
- [6]. M. Hao, Y. Wang, Z. Zhu, Q. He, D. Zhu, and M. Luo, “A compact review of IPMC as soft actuator and sensor: Current trends, challenges and potential solutions from our recent work,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, Art. no. 129, 2019.
- [7]. W. MohdIsa, A. Hunt, and S. H. HosseinNia, “Sensing and self-sensing actuation methods for ionic polymer–metal composites (IPMC): A review,” *Sensors*, vol. 19, Art. no. 3967, 2019.
- [8]. Y. Nakabo, T. Mukai, and K. Asaka, “Biomimetic soft robots using IPMC,” in *Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors*. London, U.K.: Springer, 2007, pp. 165–198.
- [9]. A. J. McDaid, S. Q. Xie, and K. C. Aw, “A compliant surgical robotic instrument with integrated IPMC sensing and actuation,” *International Journal of Smart and Nano Materials*, vol. 3, pp. 188–203, 2012.
- [10]. K. Tsiakmakis, J. Brufau-Penella, M. Puig-Vidal, and T. Laopoulos, “A camera based method for the measurement of motion parameters of IPMC actuators,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 2626–2633, 2009.
- [11]. E. Manaf, K. Fitzgerald, C. L. Higginbotham, and J. G. Lyons, “Computer vision system: Measuring displacement and bending angle of ionic polymer–metal composites,” *Applied Sciences*, vol. 12, Art. no. 6744, 2022.

- [12]. N. Hasheminejad, C. Vuye, W. Van den Bergh, J. Dirckx, and S. Vanlanduit, “A comparative study of laser Doppler vibrometers for vibration measurements on pavement materials,” *Infrastructures*, vol. 3, Art. no. 47, 2018.
- [13]. A. Gupta and S. Mukherjee, “Actuation characteristics and experimental identification of IPMC actuator for underwater biomimetic robotic application,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 7461–7466, 2022.
- [14]. K. Kořlik, P. Kowol, R. Brociek, A. Wajda, and G. Lo Sciuto, “Design of laboratory stand for displacement measurement of IPMC actuators,” *Sensors*, vol. 23, Art. no. 1271, 2023.
- [15]. N. Ghobadi, W. Kinsner, T. Szturm, and N. Sepehri, “Design and evaluation of a soft robotic actuator with non-intrusive vision-based bending measurement,” *Sensors*, vol. 25, Art. no. 3858, 2025.
- [16]. X. Liu, H. Zhang, K. Peng, Q. Tang, and Z. Chen, “A high precision capacitive linear displacement sensor with time-grating that provides absolute positioning capability based on a Vernier-type structure,” *Applied Sciences*, vol. 8, Art. no. 2419, 2018.
- [17]. Y. Ye, C. Zhang, C. He, X. Wang, J. Huang, and J. Deng, “A review on applications of capacitive displacement sensing for capacitive proximity sensor,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45325–45342, 2020.
- [18]. Z. Elrawashdeh, C. Prella, F. Lamarque, P. Revel, and S. Galland, “Optimizing algorithm for existing fiber-optic displacement sensor performance,” *Sensors*, vol. 24, Art. no. 448, 2024.
- [19]. H. Dong, S. Liu, L. Yang, J. Peng, and K. Cheng, “Optical fiber displacement sensor based on microwave photonics interferometry,” *Sensors*, vol. 18, Art. no. 3702, 2018.
- [20]. L. E. Guillen-Ruiz, G. Anzueto-Sánchez, A. Martínez-Rios, M. C. Jiménez-Mares, and J. A. Martin-Vela, “High-sensitivity displacement sensor using few-mode optical fibers and the optical Vernier effect,” *Applied Sciences*, vol. 14, Art. no. 9300, 2024.
- [21]. C. Zhu, Y. Zhuang, B. Liu, and J. Huang, “Review of fiber optic displacement sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, Art. no. 7008212, 2022.
- [22]. C. Tian, X. Chen, Y. Ren, Y. Yang, M. Wang, and X. Bai, “Spectral characteristics and displacement sensing of U-shaped single-mode–multimode–single-mode fiber structure,” *Sensors*, vol. 24, Art. no. 3184, 2024.
- [23]. K. Zhu, S. Ren, X. Li, Y. Liu, J. Li, L. Zhang, and M. Wang, “Sub-micron two-dimensional displacement sensor based on a multi-core fiber,” *Photonics*, vol. 11, Art. no. 1073, 2024.
- [24]. Y. Dong, J. Zhang, C. Zhang, H. Fu, W. Li, W. Luo, and P. Hu, “Analysis and design of fiber microprobe displacement sensors including collimated type and convergent type for ultra-precision displacement measurement,” *Micromachines*, vol. 15, Art. no. 224, 2024.
- [25]. T. Akagi, S. Dohta, T. Morimoto, Y. Matsui, and S. Shimooka, “Development of compact flexible displacement sensors using ultrasonic sensor for wearable actuators,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 51, Art. no. 02002, 2016.

- [26]. A. Sun, Z. Wu, D. Fang, J. Zhang, and W. Wang, "Multimode interference-based fiber-optic ultrasonic sensor for non-contact displacement measurement," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 5632–5635, 2016.
- [27]. S.-M. Yang and C.-L. Huang, "A Hall sensor-based three-dimensional displacement measurement system for miniature magnetically levitated rotor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 1872–1878, 2009.
- [28]. Z. Zhang, L. Wang, B. Cao, and H. Zeng, "Three-degree-of-freedom absolute displacement sensor based on planar magnetic grid," in *Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Harbin, China, Aug. 9–11, 2023, pp. 165–169.
- [29]. W. Jin, Y. Li, and D. Liu, "Design of large travel displacement automatic measuring system based on Hall quadrature sensor," in *Proceedings of the 3rd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, Shanghai, China, Dec. 4–6, 2020, pp. 417–421.
- [30]. O. Oddbjornsson, P. Kloukinas, T. Gokce, K. Bourne, T. Horseman, L. Dihoru, M. Dietz, R. E. White, A. J. Crewe, and C. A. Taylor, "Design and calibration of a Hall effect system for measurement of six-degree-of-freedom motion within a stacked column," *Sensors*, vol. 21, Art. no. 3740, 2021.
- [31]. F. Hild and S. Roux, "Digital image correlation: From displacement measurement to identification of elastic properties—A review," *Strain*, vol. 42, pp. 69–80, 2006.
- [32]. Z. L. Kahn-Jetter and T. C. Chu, "Three-dimensional displacement measurements using digital image correlation and photogrammic analysis," *Experimental Mechanics*, vol. 30, pp. 10–16, 1990.
- [33]. A. Punning, V. Vunder, I. Must, U. Johanson, G. Anbarjafari, and A. Aabloo, "In situ scanning electron microscopy study of strains of ionic electroactive polymer actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 27, pp. 1061–1074, 2015.
- [34]. D. Minas, K. Tsiakmakis, A. T. Hatzopoulos, K. A. Tsintotas, V. Vassios, and M. S. Papadopoulou, "Optical microscopy for high-resolution IPMC displacement measurement," *Sensors*, vol. 26, no. 2, Art. no. 436, 2026.
- [35]. D. Minas, K. Tsiakmakis, M. S. Papadopoulou, and V. Vassios, "An online framework for quality control, anomaly detection and auto-calibration of hourly air-quality data from an IoT sensor node," in *Proc. 10th International Workshop on Microsystems*, Thessaloniki, Greece, Dec. 2025.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας παραγωγής σήματος και απόκτησης μετρήσεων μέσω ADC

Στο παρόν παράρτημα παρατίθεται ο υποστηρικτικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη λειτουργία του ηλεκτρονικού υποσυστήματος της πειραματικής διάταξης. Ο κώδικας αφορά την παραγωγή ημιτονοειδούς σήματος διέγερσης μέσω του DAC MCP4921 και την ταυτόχρονη απόκτηση μετρήσεων από τα κανάλια CH0 και CH1 του ADC MCP3302. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την παρακολούθηση των ηλεκτρικών σημάτων της διάταξης και τη συσχέτισή τους με την οπτικά μετρούμενη μετατόπιση του ενεργοποιητή IPMC.

Ο κώδικας παρουσιάζεται αρχικά σε επίπεδο λειτουργικής ανάλυσης, ώστε να εξηγηθεί ο ρόλος των βασικών τμημάτων του, και στη συνέχεια παρατίθεται η πλήρης μορφή του.

A.1 Περιγραφή λειτουργίας του κώδικα

Ο κώδικας εκτελείται στο Raspberry Pi και αξιοποιεί τη διεπαφή SPI για την επικοινωνία με τον μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα MCP4921 και τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα MCP3302.

Ο MCP4921 χρησιμοποιείται για την παραγωγή ημιτονοειδούς σήματος συχνότητας 0,7 Hz, το οποίο οδηγείται στο κύκλωμα διέγερσης του ενεργοποιητή IPMC. Παράλληλα, ο MCP3302 χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των καναλιών CH0 και CH1, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των ηλεκτρικών σημάτων της διάταξης.

Οι ψηφιακές τιμές που επιστρέφει ο ADC μετατρέπονται αρχικά σε τάση στην περιοχή 0-4 V. Στη συνέχεια, επειδή το κύκλωμα προσαρμογής στάθμης μετατρέπει το αρχικό διπολικό σήμα -2 V έως +2 V σε μονοπολικό σήμα 0-4 V, οι τιμές επαναφέρονται στην αντίστοιχη διπολική περιοχή αφαιρώντας 2 V από τη μετρούμενη τάση.

A.2 Ανάλυση βασικών τμημάτων του κώδικα

Ο κώδικας ξεκινά με την εισαγωγή των απαραίτητων βιβλιοθηκών και την αρχικοποίηση της επικοινωνίας SPI. Ο DAC MCP4921 συνδέεται στο CE0, ενώ ο ADC MCP3302 συνδέεται στο CE1. Η ταχύτητα επικοινωνίας ορίζεται στα 5 MHz, ώστε να επιτρέπεται γρήγορη ανταλλαγή δεδομένων με τα δύο ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Η συνάρτηση `write_dac()` αναλαμβάνει την αποστολή μιας ψηφιακής τιμής 12 bit στον MCP4921. Η τιμή περιορίζεται στο εύρος 0-4095, ώστε να είναι συμβατή με την ανάλυση του DAC, και στη συνέχεια αποστέλλεται μέσω SPI. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ψηφιακή τιμή μετατρέπεται σε αντίστοιχη αναλογική τάση στην έξοδο του DAC.

Οι συναρτήσεις `read_adc_ch0()` και `read_adc_ch1()` χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση των δύο καναλιών του MCP3302. Κάθε συνάρτηση αποστέλλει την κατάλληλη εντολή μέσω SPI, λαμβάνει την απόκριση του ADC και συνδυάζει τα bytes της απόκρισης ώστε να εξαχθεί η τελική ψηφιακή τιμή της μέτρησης.

Η συνάρτηση `adc_to_voltage()` μετατρέπει την ψηφιακή τιμή του ADC σε τάση, λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση 12 bit και το ενεργό εύρος τάσης 0-4 V μετά τη βαθμίδα προσαρμογής σήματος. Η

συνάρτηση `adc_voltage_to_bipolar()` επαναφέρει τη μετρούμενη τάση στην αρχική διπολική περιοχή -2 V έως $+2\text{ V}$, αφαιρώντας 2 V από την τιμή που υπολογίζεται στην είσοδο του ADC.

Για την παραγωγή της διέγερσης δημιουργείται ένας πίνακας ημιτονοειδών τιμών. Η συχνότητα του σήματος ορίζεται στα $0,7\text{ Hz}$ και κάθε περίοδος αποτελείται από 500 δείγματα. Οι τιμές του πίνακα κυμαίνονται από 0 έως 4095, ώστε να αξιοποιείται το πλήρες ψηφιακό εύρος του DAC.

Στον κύριο βρόχο λειτουργίας, κάθε τιμή του ημιτονοειδούς πίνακα αποστέλλεται στον DAC. Στη συνέχεια διαβάζονται τα κανάλια CH0 και CH1 του ADC, οι τιμές τους μετατρέπονται σε τάση και εμφανίζονται στην έξοδο του προγράμματος τόσο στη μονοπολική περιοχή $0-4\text{ V}$ όσο και στην αντίστοιχη διπολική περιοχή -2 V έως $+2\text{ V}$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι τη χειροκίνητη διακοπή της εκτέλεσης.

A.3 Πλήρης κώδικας παραγωγής σήματος και απόκτησης μετρήσεων

```
import spidev
import time
import math

# SPI setup
# DAC on CE0 (MCP4921)
spi_dac = spidev.SpiDev()
spi_dac.open(0, 0)
spi_dac.max_speed_hz = 5000000 # 5 MHz

# ADC on CE1 (MCP3302)
spi_adc = spidev.SpiDev()
spi_adc.open(0, 1)
spi_adc.mode = 0b11
spi_adc.max_speed_hz = 5000000 # 5 MHz

# ADC conversion parameters
adc_resolution = 4095 # 12-bit ADC digital range: 0-4095
adc_vref = 4.0 # Effective ADC voltage range after signal
conditioning: 0-4 V

def write_dac(value):
    """
    Writes a 12-bit value to the MCP4921 DAC.
    The output range corresponds to 0-Vref.
    """
    value &= 0x0FFF
    command = 0x3000 | value
    spi_dac.xfer2([(command >> 8) & 0xFF, command & 0xFF])
```

```

# ADC read function (MCP3302, CH0 single-ended)
def read_adc_ch0():
    """
    Reads channel CH0 of the ADC through SPI.
    The returned value corresponds to the digital ADC output.
    """
    adc_response = spi_adc.xfer2([0b00001100, 0x00, 0x00])
    result = ((adc_response[1] & 0x0F) << 8) | adc_response[2]
    return result

# ADC read function (MCP3302, CH1 single-ended)
def read_adc_ch1():
    """
    Reads channel CH1 of the ADC through SPI.
    The returned value corresponds to the digital ADC output.
    """
    adc_response = spi_adc.xfer2([0b00001110, 0x00, 0x00])

    result = ((adc_response[1] & 0x0F) << 8) | adc_response[2]
    return result

def adc_to_voltage(adc_value):
    """
    Converts the ADC digital output to voltage.
    The conversion assumes a 0-4 V input range.
    """
    voltage = (adc_value / adc_resolution) * adc_vref
    return voltage

def adc_voltage_to_bipolar(voltage):
    """
    Converts the conditioned ADC voltage range 0-4 V
    back to the original bipolar signal range -2 V to +2 V.
    """
    bipolar_voltage = voltage - 2.0
    return bipolar_voltage

# Sine wave generation parameters
frequency = 0.7
samples_per_cycle = 500
max_dac_value = 4095

# Generate lookup table for 0-4 V sine wave
sine_table = [
    int((max_dac_value / 2) * (1 + math.sin(2 * math.pi * i /
samples_per_cycle)))
    for i in range(samples_per_cycle) ]
delay = 1 / (samples_per_cycle * frequency)

```

```

try:
    print("Generating 0.7 Hz sine wave and reading ADC CH0 and CH1...")

    while True:
        for val in sine_table:
            write_dac(val)
            adc_ch0 = read_adc_ch0()
            adc_ch1 = read_adc_ch1()

            voltage_ch0 = adc_to_voltage(adc_ch0)
            voltage_ch1 = adc_to_voltage(adc_ch1)

            bipolar_ch0 = adc_voltage_to_bipolar(voltage_ch0)
            bipolar_ch1 = adc_voltage_to_bipolar(voltage_ch1)

            print(
                f"DAC: {val}, "
                f"CH0: {adc_ch0} -> {voltage_ch0:.3f} V -> {bipolar_ch0:.3f}
V, "
                f"CH1: {adc_ch1} -> {voltage_ch1:.3f} V -> {bipolar_ch1:.3f}
V"
            )

            time.sleep(delay)

except KeyboardInterrupt:
    print("\nStopped.")
    spi_dac.close()
    spi_adc.close()

```