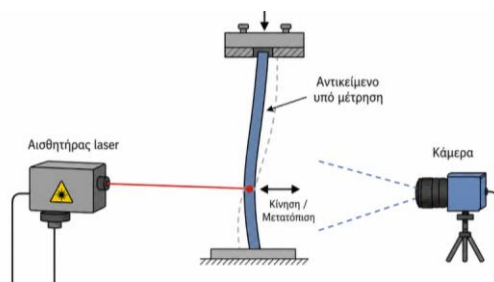


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη τεχνολογιών αισθητήρων και ηλεκτρονικών
συστημάτων μέτρησης αποστάσεων σε μικρομετρική
κλίμακα»



ΣΚΕΝΤΕΡΑΣΗ ΣΠΥΡΟ
515133

Επιβλέπων
Δρ. Τσιακμάκης Κυριάκος

Ιούνιος 2026

Μελέτη τεχνολογιών αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης αποστάσεων σε
μικρομετρική κλίμακα

Κωδικός: 26219

Φοιτητής: Σκεντεράση Σπύρο

Εισηγητής: Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. **26-03-2026**

Ημερομηνία περάτωσης Π.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 πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Σπύρο Σκεντεράση** 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 πτυχιακής 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.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά τεχνολογίες αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων για τη μέτρηση αποστάσεων, με έμφαση στη μικρομετρική κλίμακα. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι μέτρησης απόστασης, όπως υπερηχητικοί, οπτικοί, laser, χωρητικοί, επαγωγικοί, eddy-current και RF αισθητήρες. Στη συνέχεια αναλύονται εξειδικευμένες τεχνικές μικρομετρικής μέτρησης, όπως laser triangulation, laser interferometry, confocal και chromatic confocal sensing. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μέτρηση μικροαποστάσεων με κάμερα ή μικροσκόπιο και κάμερα, όπου η εικόνα μετατρέπεται σε μετρητικό δεδομένο μέσω βαθμονόμησης. Παρουσιάζονται αλγόριθμοι επεξεργασίας εικόνας, όπως thresholding, edge detection, contour detection, tracking και μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης. Τέλος, προτείνεται αλγόριθμος σε Python για τη μέτρηση μικροαποστάσεων από εικόνες, με μετατροπή pixels σε μικρόμετρα.

«Study of sensor technologies and electronic systems for distance measurement at the micrometer scale»

Abstract

This thesis studies sensor technologies and electronic systems for distance measurement, with emphasis on the micrometric scale. First, the main distance measurement methods are presented, including ultrasonic, optical, laser, capacitive, inductive, eddy-current, and RF sensors. Then, specialized micrometric measurement techniques are analyzed, such as laser triangulation, laser interferometry, confocal sensing, and chromatic confocal sensing. Emphasis is placed on micro-distance measurement using a camera or a microscope combined with a camera, where the captured image is converted into measurement data through proper calibration. Image processing algorithms are also examined, including thresholding, edge detection, contour detection, tracking, and artificial intelligence methods. Finally, a Python-based algorithm is proposed for measuring micro-distances from images by converting pixel distances into micrometers, strengthening the practical and applied contribution of the thesis.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση τους και τον επιβλέπων μου για το υλικό και τη καθοδήγηση του.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract.....	v
Ευχαριστίες.....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα συστήματα μέτρησης.....	11
1.1 Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 2ο: Συστήματα Μέτρησης Αποστάσεων	14
2.1 Βασικές κατηγορίες μεθόδων μέτρησης απόστασης.....	14
2.2 Αισθητήρες υπέρηχων απόστασης.....	15
2.3 Οπτικοί αισθητήρες και αισθητήρες laser	16
2.4 LiDAR και αισθητήρες χρόνου πτήσης	18
2.5 Χωρητικοί αισθητήρες απόστασης	19
2.6 Επαγωγικοί και eddy-current αισθητήρες	20
2.7 Αισθητήρες με κάμερα και μηχανική όραση.....	21
2.8 Stereo vision και τρισδιάστατη μέτρηση.....	22
2.9 Μηχανικοί αισθητήρες, encoders και LVDT	23
2.10 RF, radar και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι μέτρησης.....	24
2.11 Σύγκριση βασικών τεχνολογιών.....	25
Κεφάλαιο 3ο: Συστήματα Μέτρησης Αποστάσεων σε Μικρομετρική Κλίμακα.....	27
3.1 Ιδιαιτερότητες της μικρομετρικής μέτρησης.....	27
3.2 Βασικές τεχνολογίες μικρομετρικής μέτρησης	28
3.3 Laser triangulation για μικρομετρικές μετρήσεις	29
3.4 Laser interferometry.....	29
3.5 Chromatic confocal αισθητήρες.....	30
3.6 Χωρητικοί αισθητήρες μικρομετρικής μετατόπισης	31
3.7 Eddy-current αισθητήρες στη μικρομετρική κλίμακα	32
3.8 Οπτική μικροσκοπία και κάμερα για μέτρηση μικροαποστάσεων	33
3.9 Fiber optic displacement sensors.....	34

3.10	Contact micro-displacement sensors	34
3.11	Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια	35
3.12	Σύγκριση τεχνολογιών μικρομετρικής μέτρησης	36
Κεφάλαιο 4ο:	Μέτρηση Απόστασης με Laser.....	38
4.1	Βασική δομή ενός laser συστήματος μέτρησης.....	38
4.2	Μέτρηση χρόνου πτήσης	40
4.3	Μέτρηση διαφοράς φάσης	41
4.4	Laser triangulation	41
4.5	Φωτοανιχνευτές και αισθητήρες εικόνας	42
4.6	Ηλεκτρονικό σύστημα λήψης και επεξεργασίας	43
4.7	Παράγοντες σφάλματος	43
4.8	Εφαρμογές laser μέτρησης απόστασης	44
Κεφάλαιο 5ο:	Μέτρηση Μικροαποστάσεων με RF ή Παρόμοιες Τεχνικές	45
5.1	Βασική αρχή RF μέτρησης μετατόπισης.....	45
5.2	FMCW radar για μέτρηση μετατόπισης.....	46
5.3	RF και μικροκυματικοί συντονιστικοί αισθητήρες	47
5.4	Παρόμοιες τεχνικές: επαγωγικές και χωρητικές RF προσεγγίσεις	47
5.5	Ηλεκτρονικά κυκλώματα και επεξεργασία σήματος.....	48
5.6	Πλεονεκτήματα και περιορισμοί.....	48
Κεφάλαιο 6ο:	Μέτρηση Μικροαπόστασης με Κάμερα ή Μικροσκόπιο και Κάμερα.....	50
6.1	Βασική αρχή μέτρησης με κάμερα.....	50
6.2	Διάταξη μικροσκοπίου και κάμερας	51
6.3	Βαθμονόμηση εικόνας	52
6.4	Εντοπισμός σημείων, ακμών και αντικειμένων.....	52
6.5	Περιοχή ενδιαφέροντος και μείωση υπολογιστικού κόστους.....	53
6.6	Sub-pixel μέτρηση	54
6.7	Ηλεκτρονικό σύστημα λήψης εικόνας	54
6.8	Σύνδεση με την παρούσα πτυχιακή εργασία	54
Κεφάλαιο 7ο:	Αλγόριθμοι και Μεθοδολογίες για Μέτρηση Απόστασης από Εικόνα.....	56
7.1	Γενική ροή ενός αλγορίθμου μέτρησης απόστασης	56
7.2	Βαθμονόμηση κάμερας και μετατροπή pixel σε φυσική απόσταση	57
7.3	Προεπεξεργασία εικόνας.....	58
7.4	Ανίχνευση ακμών.....	59
7.5	Εντοπισμός contours και γεωμετρικών χαρακτηριστικών.....	59
7.6	Template matching.....	60

7.7	Optical flow	61
7.8	Digital Image Correlation	61
7.9	Sub-pixel localization	62
7.10	Object detection και YOLO	63
7.11	Segmentation	63
7.12	Tracking σε ακολουθία εικόνων ή video.....	64
7.13	Εκτίμηση σφάλματος και αβεβαιότητας	65
7.14	Σύγκριση αλγοριθμικών προσεγγίσεων	65
Κεφάλαιο 8ο: Προτεινόμενος Αλγόριθμος σε Python για Μέτρηση Μικροαποστάσεων από Εικόνα		67
8.1	Στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου	67
8.2	Γενική αρχιτεκτονική της μεθοδολογίας.....	68
8.3	Βαθμονόμηση εικόνας	69
8.4	Προεπεξεργασία εικόνας	70
8.5	Εντοπισμός ακμών ή αντικειμένων.....	71
8.6	Μετατροπή από pixels σε μικρόμετρα	72
8.7	Προτεινόμενος ψευδοκώδικας	73
8.8	Ενδεικτική υλοποίηση σε Python.....	74
8.9	Βελτιωμένη εκδοχή με επιλογή δύο σημείων από τον χρήστη.....	76
8.10	Αυτόματη μέτρηση μετατόπισης σε διαδοχικές εικόνες	77
8.11	Ενδεικτικός κώδικας για video tracking.....	78
8.12	Προτεινόμενη βελτίωση με ROI.....	79
8.13	Αξιολόγηση της ακρίβειας.....	80
8.14	Πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.....	81
8.15	Περιορισμοί και σημεία προσοχής.....	82
Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα		85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		86

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1: Αρχή μέτρησης απόστασης με υπέρηχους ή lidar	16
Εικόνα 2.2: Μέτρηση με laser	17
Εικόνα 2.3: Lidar	18
Εικόνα 2.4: Χωρητικός αισθητήρας.....	19
Εικόνα 2.5: Επαγωγικός αισθητήρας	20
Εικόνα 2.6: Μέτρηση απόστασης με κάμερα.....	21
Εικόνα 2.7: Μέτρηση απόστασης με στερεοσκοπική όραση	22
Εικόνα 2.8: LVDT αισθητήρας	24
Εικόνα 2.9: Μέτρηση απόστασης με RF	24
Εικόνα 4.1: Τυπικό σύστημα μέτρησης απόστασης με laser.....	39

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στα συστήματα μέτρησης

1.1 Εισαγωγή

Η μέτρηση απόστασης και μετατόπισης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα της σύγχρονης τεχνολογίας αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων. Από απλές εφαρμογές ανίχνευσης παρουσίας μέχρι βιομηχανικά συστήματα υψηλής ακρίβειας, η δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης ενός αντικειμένου σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς είναι απαραίτητη για τον έλεγχο, την παρακολούθηση και την αυτοματοποίηση πολλών τεχνικών διαδικασιών. Η μέτρηση απόστασης δεν περιορίζεται σε μία μόνο κλίμακα. Μπορεί να αφορά αποστάσεις αρκετών μέτρων, όπως σε συστήματα LiDAR και αισθητήρες υπερήχων, αποστάσεις χιλιοστών σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου θέσης και μετατοπίσεις μικρομετρικής τάξης σε εφαρμογές ακριβείας [1], [2].

Η τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών μεθόδων μέτρησης. Ανάλογα με την εφαρμογή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπτικοί αισθητήρες, αισθητήρες laser, χωρητικοί αισθητήρες, επαγωγικοί αισθητήρες, αισθητήρες δινορρευσμάτων, αισθητήρες υπερήχων, κάμερες, μικροσκόπια και σύνθετα συστήματα που συνδυάζουν αισθητήρες με ηλεκτρονικά κυκλώματα επεξεργασίας και αλγορίθμους υπολογιστικής όρασης. Στη βιομηχανική μετρολογία, τεχνολογίες όπως οι χωρητικοί αισθητήρες, οι confocal αισθητήρες, οι eddy-current αισθητήρες και οι αισθητήρες laser triangulation χρησιμοποιούνται συχνά για μη επαφική μέτρηση μετατόπισης και θέσης, ειδικά όταν απαιτείται υψηλή ακρίβεια ή όταν η επαφή με το αντικείμενο μπορεί να προκαλέσει φθορά ή σφάλμα μέτρησης [1], [3].

Η μέτρηση μικροαποστάσεων έχει ιδιαίτερη σημασία σε πεδία όπως η μικροηλεκτρονική, η μικρομηχανική, η κατασκευή αισθητήρων, ο ποιοτικός έλεγχος επιφανειών, η βιοϊατρική τεχνολογία, η μικροσκοπία και η ρομποτική ακριβείας. Σε αυτές τις εφαρμογές, ακόμη και πολύ μικρές μεταβολές στη θέση ενός αντικειμένου μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία ενός συστήματος. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα μικροσκοπικής παρακολούθησης, η μετατόπιση ενός μικρού αντικειμένου μπορεί να είναι της τάξης μερικών μικρομέτρων. Αντίστοιχα, σε μια βιομηχανική διάταξη ελέγχου επιφάνειας, η απόκλιση στο ύψος ή στο πάχος ενός υλικού μπορεί να απαιτεί μέτρηση με ανάλυση μικρομέτρων. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αισθητήρα και του αντίστοιχου ηλεκτρονικού συστήματος είναι κρίσιμη.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων συστημάτων μέτρησης απόστασης είναι ότι δεν βασίζονται μόνο στον αισθητήρα, αλλά σε ολόκληρο το σύστημα μέτρησης. Αυτό περιλαμβάνει τη φυσική αρχή ανίχνευσης, το αισθητήριο στοιχείο, τα κυκλώματα διέγερσης, τα κυκλώματα αναλογικής προσαρμογής σήματος, την ADC μετατροπή, την ψηφιακή επεξεργασία, τη βαθμονόμηση και τον

υπολογισμό της απόστασης. Για παράδειγμα, σε έναν laser displacement sensor, το laser χρησιμοποιείται ως πηγή φωτός, η ανακλώμενη δέσμη συλλέγεται από οπτικό σύστημα και ανιχνεύεται από φωτοευαίσθητο στοιχείο, ενώ η τελική απόσταση προκύπτει από επεξεργασία της θέσης, του χρόνου πτήσης ή της φάσης του λαμβανόμενου σήματος [2], [4].

Στους οπτικούς αισθητήρες απόστασης, οι πιο συνηθισμένες αρχές μέτρησης είναι η μέτρηση χρόνου πτήσης, η μέτρηση μετατόπισης φάσης και η τριγωνομετρική μέτρηση. Στη μέτρηση χρόνου πτήσης, ο αισθητήρας εκπέμπει έναν παλμό φωτός και υπολογίζει την απόσταση από τον χρόνο που απαιτείται ώστε το φως να επιστρέψει μετά την ανάκλαση. Στη μέτρηση φάσης, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι διαμορφωμένη και η απόσταση υπολογίζεται από τη διαφορά φάσης μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος. Στη laser triangulation, η μεταβολή της απόστασης μεταβάλλει τη θέση του ανακλώμενου φωτεινού σημείου επάνω σε έναν φωτοανιχνευτή ή έναν αισθητήρα εικόνας, επιτρέποντας τον υπολογισμό της απόστασης από τη γεωμετρία του συστήματος [4], [5].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι οπτικές τεχνικές υψηλής ακρίβειας, όπως η συμβολομετρία, η laser triangulation και η chromatic confocal μέτρηση. Η οπτική συμβολομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις μετατόπισης, επειδή αξιοποιεί το μήκος κύματος του φωτός ως μέτρο αναφοράς. Αντίστοιχα, οι chromatic confocal αισθητήρες χρησιμοποιούν τη χρωματική διασπορά και την ανάλυση μήκους κύματος για τον προσδιορισμό της αξονικής θέσης ενός σημείου στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η τεχνολογία αυτή αξιοποιείται σε εφαρμογές ακριβείας, καθώς μπορεί να προσφέρει σταθερή και αποδοτική μέτρηση μετατόπισης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα [6].

Παράλληλα, τα συστήματα μέτρησης με κάμερα και μικροσκόπιο έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία, κυρίως λόγω της ανάπτυξης της υπολογιστικής όρασης και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Σε τέτοια συστήματα, η απόσταση δεν μετριέται απαραίτητα απευθείας από ένα φυσικό ηλεκτρικό σήμα, αλλά υπολογίζεται από την εικόνα. Η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει λήψη εικόνας, βαθμονόμηση της κάμερας ή του μικροσκοπίου, μετατροπή pixel σε πραγματικές μονάδες μήκους και εντοπισμό χαρακτηριστικών σημείων ή ακμών. Η ακρίβεια μπορεί να βελτιωθεί με τεχνικές sub-pixel localization, δηλαδή μεθόδους που εκτιμούν τη θέση ενός σημείου ή μιας ακμής με ακρίβεια καλύτερη από το μέγεθος ενός pixel. Στη βιβλιογραφία, οι μέθοδοι υπολογιστικής όρασης για μέτρηση μετατόπισης περιλαμβάνουν camera calibration, target tracking και displacement calculation [7].

Από την πλευρά των ηλεκτρονικών συστημάτων, η μέτρηση μικροαποστάσεων είναι ιδιαίτερα απαιτητική, επειδή το ωφέλιμο σήμα μπορεί να είναι πολύ μικρό και ευαίσθητο σε θόρυβο, θερμοκρασιακές μεταβολές, μηχανικές ταλαντώσεις, μεταβολές φωτισμού και ατέλειες του αισθητήρα. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός του κυκλώματος λήψης και επεξεργασίας. Σε αναλογικό επίπεδο, μπορεί να απαιτούνται ενισχυτές χαμηλού θορύβου, φίλτρα, σταθερές πηγές

διέγερσης, κυκλώματα διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης ή μετατροπείς ρεύματος σε τάση. Σε ψηφιακό επίπεδο, απαιτούνται αλγόριθμοι φιλτραρίσματος, εξομάλυνσης, αντιστάθμισης σφαλμάτων, βαθμονόμησης και εξαγωγής χαρακτηριστικών. Έτσι, η τελική ακρίβεια ενός συστήματος δεν καθορίζεται μόνο από τον αισθητήρα, αλλά από το σύνολο αισθητήρα, ηλεκτρονικών και λογισμικού [1], [3].

Σημαντική θέση στην παρούσα εργασία κατέχει και η χρήση αλγορίθμων μηχανικής όρασης και τεχνητής νοημοσύνης. Παραδοσιακές μέθοδοι, όπως η ανίχνευση ακμών, το thresholding, το template matching και η γεωμετρική βαθμονόμηση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση θέσης και απόστασης σε εικόνες. Νεότερες μέθοδοι, όπως τα convolutional neural networks, τα object detection models και αρχιτεκτονικές τύπου YOLO, μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό αντικειμένων ή περιοχών ενδιαφέροντος, ειδικά όταν η εικόνα περιέχει θόρυβο, μεταβολές φωτισμού ή σύνθετο υπόβαθρο. Ωστόσο, για μετρήσεις μικρομετρικής ακρίβειας, η χρήση deep learning πρέπει να συνδυάζεται με γεωμετρική βαθμονόμηση και μεθόδους ακριβείας, επειδή ο απλός εντοπισμός αντικειμένων δεν αρκεί από μόνος του για αξιόπιστη μετρολογική μέτρηση [7].

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και συγκριτική παρουσίαση τεχνολογιών αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αποστάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στη μικρομετρική κλίμακα. Η εργασία εξετάζει τόσο τις γενικές τεχνολογίες μέτρησης απόστασης όσο και τις εξειδικευμένες τεχνικές υψηλής ακρίβειας, όπως laser displacement sensing, confocal sensing, συμβολομετρία, χωρητική και επαγωγική μέτρηση, RF-based προσεγγίσεις και οπτική μέτρηση με κάμερα ή μικροσκόπιο. Επιπλέον, εξετάζεται ο ρόλος των αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας και μηχανικής μάθησης, ενώ προτείνεται η ανάπτυξη ενός ενδεικτικού αλγορίθμου σε Python για τη μέτρηση μικροαποστάσεων από εικόνες.

Με βάση τα παραπάνω, η εργασία δεν αντιμετωπίζει τη μέτρηση απόστασης μόνο ως ένα πρόβλημα αισθητήρα, αλλά ως ένα ολοκληρωμένο πρόβλημα ηλεκτρονικής μέτρησης. Αυτό σημαίνει ότι μελετώνται από κοινού η φυσική αρχή λειτουργίας, το αισθητήριο στοιχείο, το ηλεκτρονικό κύκλωμα, η ψηφιακή επεξεργασία και ο αλγόριθμος υπολογισμού. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκπαίδευση ενός Μηχανικού Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, καθώς συνδυάζει γνώσεις αισθητήρων, ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, μικροελεγκτών, οπτικής, επεξεργασίας σήματος και προγραμματισμού.

Να σημειωθεί ότι κατά τη μελέτη και διόρθωση σύνταξης του κειμένου της πτυχιακής χρησιμοποιήθηκε τεχνολογία AI με βοηθητικό και υποστηρικτικό ρόλο.

Κεφάλαιο 2ο: Συστήματα Μέτρησης Αποστάσεων

Η μέτρηση απόστασης αποτελεί μία από τις βασικές λειτουργίες πολλών σύγχρονων συστημάτων αισθητήρων. Ως απόσταση μπορεί να θεωρηθεί η χωρική διαφορά ανάμεσα σε ένα σημείο αναφοράς και ένα αντικείμενο, μία επιφάνεια ή ένα κινούμενο στοιχείο. Σε πολλές περιπτώσεις, η μέτρηση δεν αφορά μόνο την απόλυτη απόσταση, αλλά και τη μετατόπιση, δηλαδή τη μεταβολή της θέσης ενός αντικειμένου σε σχέση με την αρχική του θέση. Για τον λόγο αυτό, στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται συχνά οι όροι *distance measurement*, *displacement measurement*, *position measurement* και *range sensing*, ανάλογα με την εφαρμογή, την κλίμακα και τον τρόπο υλοποίησης της μέτρησης [8].

Τα συστήματα μέτρησης αποστάσεων χρησιμοποιούνται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται για έλεγχο θέσης, μέτρηση πάχους, έλεγχο επιφανειών, αυτόματη ευθυγράμμιση και παρακολούθηση μηχανικών μετατοπίσεων. Στη ρομποτική χρησιμοποιούνται για πλοήγηση, αποφυγή εμποδίων και αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Στα οχήματα χρησιμοποιούνται σε συστήματα υποβοήθησης οδηγού, αισθητήρες στάθμευσης, LiDAR και radar. Στην ιατρική, στη βιοτεχνολογία και στη μικρομηχανική χρησιμοποιούνται για απεικόνιση, μικροσκοπική ανάλυση και παρακολούθηση μικρών μεταβολών. Επομένως, η μέτρηση απόστασης δεν είναι μία ενιαία τεχνολογία, αλλά ένα ευρύ πεδίο που περιλαμβάνει διαφορετικές φυσικές αρχές, διαφορετικά αισθητήρια και διαφορετικές ηλεκτρονικές διατάξεις.

Από την πλευρά των ηλεκτρονικών συστημάτων, ένα σύστημα μέτρησης απόστασης μπορεί να θεωρηθεί ως μία πλήρης αλυσίδα μέτρησης. Η αλυσίδα αυτή ξεκινά από το φυσικό φαινόμενο που αξιοποιείται για τη μέτρηση, συνεχίζεται με το αισθητήριο στοιχείο, ακολουθείται από τα κυκλώματα διέγερσης και λήψης σήματος, την αναλογική επεξεργασία, την adc μετατροπή και τελικά την ψηφιακή επεξεργασία και τον υπολογισμό της απόστασης. Σε αρκετές περιπτώσεις, η τελική ακρίβεια του συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από τον τύπο του αισθητήρα, αλλά και από την ποιότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, τη σταθερότητα της τροφοδοσίας, τον θόρυβο, τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά, τη βαθμονόμηση και τον αλγόριθμο επεξεργασίας.

2.1 Βασικές κατηγορίες μεθόδων μέτρησης απόστασης

Οι τεχνολογίες μέτρησης αποστάσεων μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Μία πρώτη διάκριση είναι ανάμεσα σε μετρήσεις επαφής και μετρήσεις μη επαφής. Στις μετρήσεις επαφής, το αισθητήριο ή το μηχανικό στοιχείο έρχεται σε φυσική επαφή με το αντικείμενο. Παραδείγματα αποτελούν οι μηχανικοί συγκριτές, τα ποτενσιόμετρα θέσης, οι γραμμικοί

μετατροπείς μετατόπισης και ορισμένα συστήματα encoders. Αντίθετα, στις μη επαφής μετρήσεις, η απόσταση υπολογίζεται χωρίς φυσική επαφή με το αντικείμενο, μέσω φωτός, ήχου, ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, χωρητικής σύζευξης, επαγωγικής σύζευξης ή εικόνας.

Η μη επαφής μέτρηση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα όταν το αντικείμενο είναι ευαίσθητο, κινείται γρήγορα, βρίσκεται σε δύσκολο περιβάλλον ή όταν η επαφή μπορεί να προκαλέσει φθορά ή παραμόρφωση. Για τον λόγο αυτό, σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές χρησιμοποιούνται αισθητήρες laser, χωρητικοί αισθητήρες, αισθητήρες δινορρευσμάτων, confocal αισθητήρες και κάμερες. Οι μη επαφής αισθητήρες είναι ιδιαίτερα σημαντικοί στη βιομηχανική μετρολογία, όπου απαιτείται υψηλή ταχύτητα μέτρησης και ακρίβεια χωρίς να επηρεάζεται το αντικείμενο μέτρησης [9].

Μία δεύτερη διάκριση αφορά τη φυσική αρχή λειτουργίας. Με βάση αυτήν, οι αισθητήρες απόστασης μπορούν να χωριστούν σε οπτικούς, ακουστικούς, ηλεκτρομαγνητικούς, χωρητικούς, επαγωγικούς, μηχανικούς και αισθητήρες που βασίζονται σε εικόνα. Κάθε κατηγορία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Για παράδειγμα, οι υπερηχητικοί αισθητήρες είναι απλοί και οικονομικοί, αλλά επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη γεωμετρία του αντικειμένου. Οι laser αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν υψηλότερη ακρίβεια, αλλά επηρεάζονται από την ανακλαστικότητα, το χρώμα, την τραχύτητα και τη γωνία της επιφάνειας. Οι χωρητικοί αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλή ανάλυση σε μικρές αποστάσεις, αλλά απαιτούν ελεγχόμενες συνθήκες και κατάλληλα υλικά στόχου [10].

2.2 Αισθητήρες υπέρηχων απόστασης

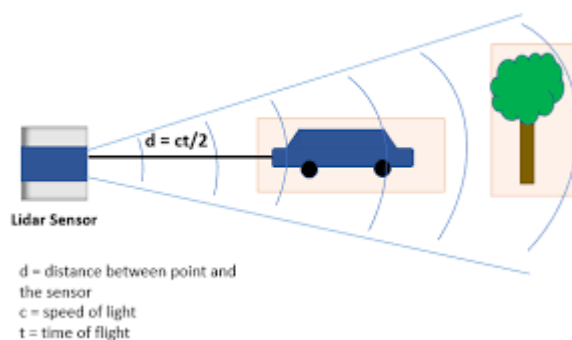
Οι αισθητήρες υπέρηχων είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες μέτρησης απόστασης σε χαμηλού και μεσαίου κόστους εφαρμογές. Η λειτουργία τους βασίζεται στην εκπομπή ενός ηχητικού παλμού υψηλής συχνότητας, συνήθως πάνω από το ακουστό φάσμα του ανθρώπου, και στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται ώστε το κύμα να ανακλαστεί από το αντικείμενο και να επιστρέψει στον δέκτη. Η τεχνική αυτή ονομάζεται μέτρηση χρόνου πτήσης, δηλαδή *time-of-flight* [11].

Η απόσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

όπου d είναι η απόσταση, v είναι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και t είναι ο συνολικός χρόνος μετάβασης και επιστροφής του ηχητικού κύματος. Ο παράγοντας 2 χρησιμοποιείται επειδή το κύμα

διανύει την απόσταση δύο φορές, μία κατά την εκπομπή προς το αντικείμενο και μία κατά την επιστροφή στον αισθητήρα.



Εικόνα 2.1: Αρχή μέτρησης απόστασης με υπέρηχους ή lidar

[https://www.mathworks.com/help/lidar/ug/lidar_working.png]

Οι αισθητήρες υπέρηχων χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα στάθμευσης, ρομποτικές πλατφόρμες, αυτοματισμούς, δεξαμενές στάθμης και απλές εφαρμογές ανίχνευσης εμποδίων. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι είναι οικονομικοί, σχετικά απλοί στην υλοποίηση και μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από το χρώμα του αντικειμένου. Όμως παρουσιάζουν και σημαντικούς περιορισμούς όπως όταν η ταχύτητα του ήχου μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ η μέτρηση επηρεάζεται από τη γωνία και τη γεωμετρία της επιφάνειας. Επιπλέον η χωρική ανάλυση των υπερηχητικών αισθητήρων είναι περιορισμένη σε σχέση με οπτικές ή laser τεχνικές, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο κατάλληλους για εφαρμογές μικρομετρικής ακρίβειας [12].

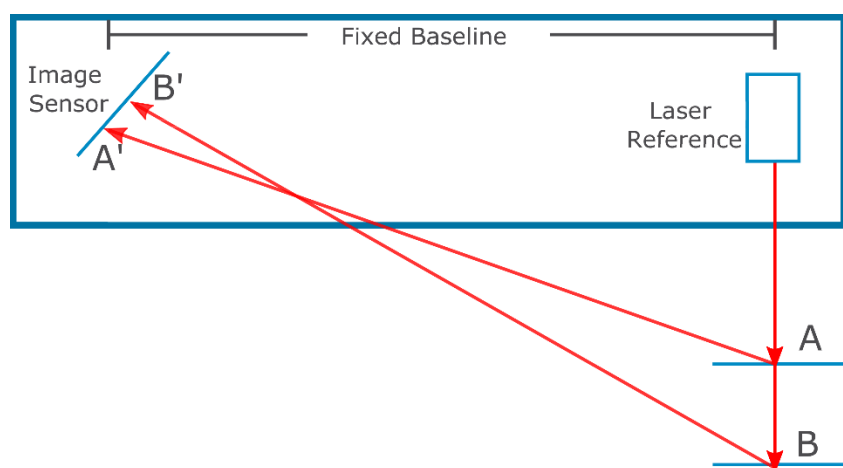
Από ηλεκτρονική άποψη, ένας υπερηχητικός αισθητήρας απαιτεί κύκλωμα παραγωγής παλμού, πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα εκπομπής/λήψης, ενισχυτή λήψης, φίλτρα και κύκλωμα χρονισμού. Σε μικροελεγκτές, η μέτρηση συνήθως γίνεται με χρονόμετρα υψηλής ανάλυσης, τα οποία καταγράφουν τη χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στον παλμό εκπομπής και στον παλμό επιστροφής. Σε πιο εξελιγμένα συστήματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψηφιακή επεξεργασία σήματος για βελτίωση της ανίχνευσης του ανακλώμενου παλμού και μείωση των ψευδών μετρήσεων.

2.3 Οπτικοί αισθητήρες και αισθητήρες laser

Οι οπτικοί αισθητήρες απόστασης χρησιμοποιούν φως για να εκτιμήσουν τη θέση ή την απόσταση ενός αντικειμένου. Στην απλούστερη μορφή τους, μπορούν να βασίζονται στην ένταση του ανακλώμενου φωτός. Ωστόσο, οι πιο αξιόπιστες τεχνικές χρησιμοποιούν γεωμετρικές ή χρονικές αρχές, όπως η τριγωνομετρία, η μέτρηση χρόνου πτήσης και η μέτρηση διαφοράς φάσης. Οι

αισθητήρες laser αποτελούν ειδική κατηγορία οπτικών αισθητήρων, όπου η πηγή φωτός είναι μία δέσμη laser. Το laser προσφέρει υψηλή κατευθυντικότητα, μικρή διασπορά δέσμης και δυνατότητα ακριβούς εστίασης, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές μέτρησης απόστασης και μετατόπισης [13].

Οι βασικές τεχνικές μέτρησης με laser είναι η μέτρηση χρόνου πτήσης, η μέτρηση διαφοράς φάσης και η laser triangulation. Στη μέτρηση χρόνου πτήσης, ο αισθητήρας εκπέμπει έναν παλμό φωτός και μετρά τον χρόνο που χρειάζεται για να επιστρέψει το ανακλώμενο σήμα. Επειδή η ταχύτητα του φωτός είναι πολύ μεγάλη, η ακριβής μέτρηση μικρών αποστάσεων απαιτεί εξαιρετικά γρήγορα ηλεκτρονικά χρονισμού. Για μεγαλύτερες αποστάσεις, η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και χρησιμοποιείται σε LiDAR και laser rangefinders.



Εικόνα 2.2: Μέτρηση με laser

[https://hermary.com/wp-content/uploads/2020/06/laser_triangulation.png]

Στη μέτρηση διαφοράς φάσης, η δέσμη laser διαμορφώνεται με γνωστή συχνότητα και η απόσταση υπολογίζεται από τη διαφορά φάσης ανάμεσα στο εκπεμπόμενο και στο λαμβανόμενο σήμα. Η τεχνική αυτή μπορεί να προσφέρει καλή ακρίβεια σε μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις, αλλά απαιτεί σταθερή διαμόρφωση, ακριβή μέτρηση φάσης και κατάλληλη αποδιαμόρφωση του σήματος. Από ηλεκτρονική άποψη, η μέτρηση φάσης απαιτεί κυκλώματα διαμόρφωσης, φωτοανιχνευτές, ενισχυτές υψηλής ταχύτητας, συγκριτές φάσης ή ψηφιακή επεξεργασία.

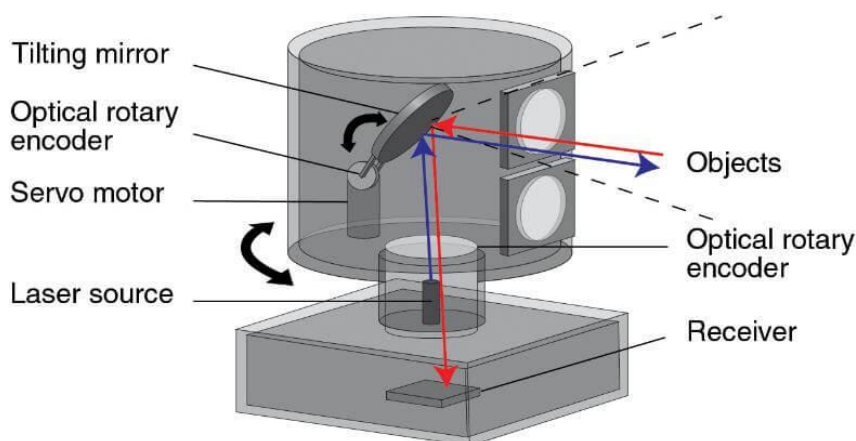
Η laser triangulation είναι ιδιαίτερα σημαντική για μετρήσεις μικρότερων αποστάσεων και μετατοπίσεων. Σε αυτήν την τεχνική, μία δέσμη laser προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου και το ανακλώμενο φως συλλέγεται από φακό και προβάλλεται σε φωτοευαίσθητο στοιχείο, όπως CCD, CMOS ή position sensitive detector. Όταν αλλάζει η απόσταση του αντικειμένου, αλλάζει

και η θέση του φωτεινού σημείου στον ανιχνευτή. Με βάση τη γεωμετρία του συστήματος, η θέση αυτή μετατρέπεται σε απόσταση. Η τεχνική της τριγωνομετρίας χρησιμοποιείται ευρέως σε αισθητήρες laser displacement, ιδιαίτερα σε βιομηχανικές εφαρμογές ελέγχου θέσης και επιφάνειας [14], [15].

2.4 LiDAR και αισθητήρες χρόνου πτήσης

Το LiDAR, από το *Light Detection and Ranging*, αποτελεί μία τεχνολογία μέτρησης απόστασης που βασίζεται συνήθως σε laser και χρησιμοποιείται για την απόκτηση πληροφοριών απόστασης από το περιβάλλον. Η βασική αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με τη μέτρηση χρόνου πτήσης: εκπέμπεται φως προς το αντικείμενο ή το περιβάλλον και μετράται ο χρόνος επιστροφής του ανακλώμενου σήματος. Με τη σάρωση της δέσμης ή με τη χρήση ειδικών αισθητήρων, μπορεί να δημιουργηθεί νέφος σημείων, δηλαδή μία τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου.

Τα συστήματα LiDAR χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα οχήματα, ρομποτική, χαρτογράφηση, γεωδαισία, αρχαιολογία, βιομηχανική επιθεώρηση και περιβαλλοντική παρακολούθηση. Σε σύγκριση με απλούς αισθητήρες απόστασης, το LiDAR δεν δίνει μόνο μία τιμή απόστασης, αλλά μεγάλο αριθμό σημείων στον χώρο. Έτσι, επιτρέπει την αναγνώριση αντικειμένων, την ανάλυση γεωμετρίας και την τρισδιάστατη χαρτογράφηση.



Εικόνα 2.3: Lidar

[<https://thecustomizewindows.cachefly.net/wp-content/uploads/2024/05/How-LiDAR-Works-Basics-of-LiDAR-Explained.jpg>]

Από την πλευρά των ηλεκτρονικών, ένα LiDAR σύστημα απαιτεί παλμική ή διαμορφωμένη πηγή laser, οπτικό σύστημα εκπομπής και λήψης, φωτοανιχνευτή υψηλής ταχύτητας, κύκλωμα χρονισμού ή μέτρησης φάσης και επεξεργαστή για την παραγωγή των δεδομένων απόστασης. Η ακρίβεια επηρεάζεται από την ισχύ της δέσμης, την ανακλαστικότητα του αντικειμένου, τον θόρυβο του φωτοανιχνευτή, την ατμοσφαιρική απορρόφηση και τη χρονική ανάλυση του

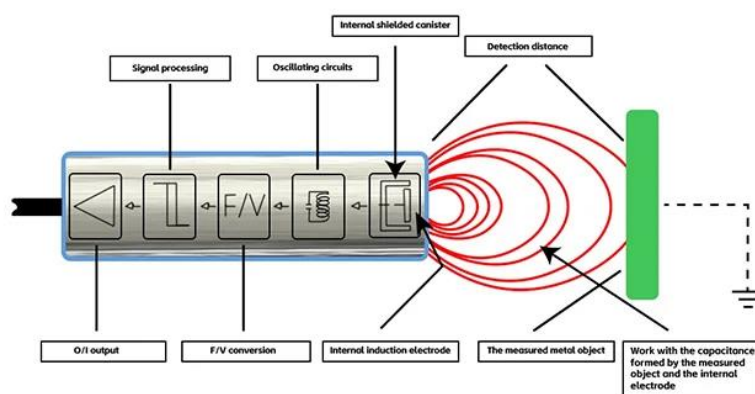
συστήματος. Σε εφαρμογές μικρομετρικής ακρίβειας, το LiDAR δεν είναι συνήθως η καταλληλότερη τεχνική, αλλά αποτελεί βασική τεχνολογία για μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις.

2.5 Χωρητικοί αισθητήρες απόστασης

Οι χωρητικοί αισθητήρες απόστασης βασίζονται στη μεταβολή της χωρητικότητας ανάμεσα σε δύο αγωγίμες επιφάνειες. Σε μία απλοποιημένη μορφή, η χωρητικότητα ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

όπου C είναι η χωρητικότητα, ϵ η διηλεκτρική σταθερά του υλικού ανάμεσα στις επιφάνειες, A το εμβαδόν των ηλεκτροδίων και d η απόσταση μεταξύ τους. Επομένως, όταν αλλάζει η απόσταση, μεταβάλλεται και η χωρητικότητα. Αυτή η μεταβολή μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα και να μετατραπεί σε απόσταση.



Schematic diagram of capacitive switch

Εικόνα 2.4: Χωρητικός αισθητήρας

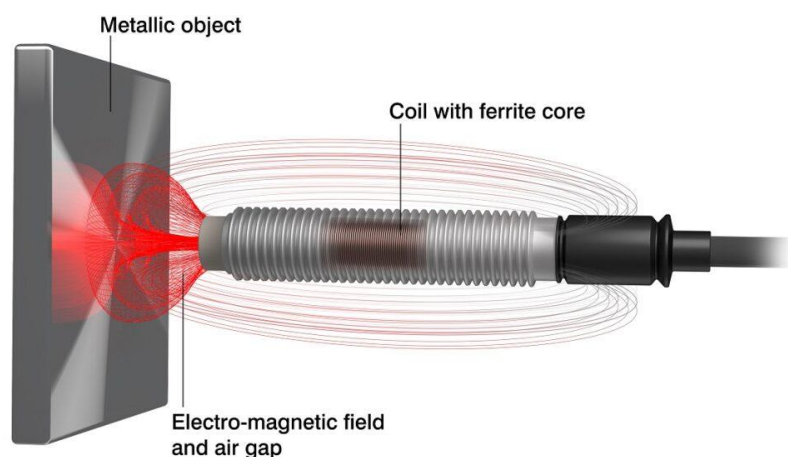
[<https://www.hebaiele.com/wp-content/uploads/2024/07/dianrong.webp>]

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως για μικρές αποστάσεις και μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλή ανάλυση. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε εφαρμογές μέτρησης μετατόπισης, πάχους, ταλάντωσης, ευθυγράμμισης και επιφανειακής παρακολούθησης. Ένα βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να πετύχουν υψηλή ακρίβεια σε μικρή περιοχή μέτρησης. Ωστόσο, επηρεάζονται από τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού, την υγρασία, τη ρύπανση, τη γεωμετρία του στόχου και την ύπαρξη παρασιτικών χωρητικοτήτων [10].

Από ηλεκτρονική άποψη, η μέτρηση πολύ μικρών μεταβολών χωρητικότητας είναι απαιτητική. Συνήθως απαιτούνται ταλαντωτές, γέφυρες μέτρησης, κυκλώματα charge amplifier, synchronous demodulation ή ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα χωρητικής μέτρησης. Ο σωστός σχεδιασμός του PCB, η θωράκιση, η γείωση και η μείωση των παρασιτικών στοιχείων είναι καθοριστικοί παράγοντες για την τελική ακρίβεια. Σε σύγκριση με τους αισθητήρες δινορρευμάτων, οι χωρητικοί αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν υψηλότερη ανάλυση σε κατάλληλες συνθήκες, αλλά είναι πιο ευαίσθητοι στο περιβάλλον και στα υλικά που παρεμβάλλονται στο διάκενο μέτρησης [16].

2.6 Επαγωγικοί και eddy-current αισθητήρες

Οι επαγωγικοί αισθητήρες και οι αισθητήρες δινορρευμάτων, γνωστοί ως *eddy-current sensors*, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση απόστασης ή μετατόπισης σε μεταλλικούς στόχους. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αλληλεπίδραση ενός μεταβαλλόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με ένα αγωγίμο υλικό. Όταν ένα πηνίο διεγείρεται με εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργεί γύρω του ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αν κοντά στο πηνίο βρεθεί μεταλλικό αντικείμενο, επάγονται σε αυτό δινορρεύματα. Τα δινορρεύματα αυτά επηρεάζουν τη σύνθετη αντίσταση του πηνίου, και η μεταβολή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόστασης.



Εικόνα 2.5: Επαγωγικός αισθητήρας

[https://www.electronicsworld.co.uk/wp-content/uploads/2022/04/inductive-sensor2_lres-1024x576.jpg]

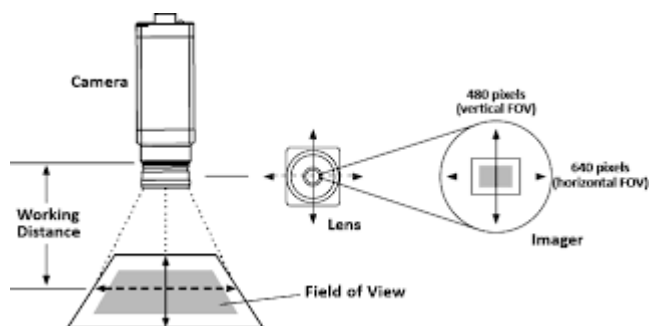
Οι eddy-current αισθητήρες είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, επειδή μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς επαφή, με υψηλή ταχύτητα και σε δύσκολες συνθήκες. Σε αντίθεση με οπτικούς αισθητήρες, δεν επηρεάζονται σημαντικά από σκόνη, λάδι, υγρασία ή ακαθαρσίες στο διάκενο μέτρησης, αρκεί ο στόχος να είναι αγωγίμος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις μετατόπισης, ταλάντωσης, έκκεντρης περιστροφής, πάχους και θέσης μεταλλικών αντικειμένων [16], [17].

Οι επαγωγικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για μέτρηση απόστασης από μεταλλικά αντικείμενα, αλλά συνήθως έχουν μικρότερη περιοχή μέτρησης. Είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου απαιτείται στιβαρότητα και αντοχή σε βιομηχανικό περιβάλλον. Οι σύγχρονοι επαγωγικοί αισθητήρες απόστασης μπορούν να ενσωματώνουν και ηλεκτρονικά αξιολόγησης στο ίδιο περίβλημα, ώστε να παρέχουν αναλογική ή ψηφιακή έξοδο ανάλογη της απόστασης [18].

Από πλευράς ηλεκτρονικών, οι eddy-current αισθητήρες απαιτούν κύκλωμα διέγερσης υψηλής συχνότητας, πηνίο αισθητήρα, κύκλωμα μέτρησης μεταβολών πλάτους ή φάσης, αποδιαμόρφωση και γραμμικοποίηση. Η συχνότητα λειτουργίας, το υλικό του στόχου, η αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα και η θερμοκρασία επηρεάζουν τη μέτρηση. Επομένως, απαιτείται βαθμονόμηση για συγκεκριμένο υλικό και συγκεκριμένη γεωμετρία στόχου.

2.7 Αισθητήρες με κάμερα και μηχανική όραση

Η χρήση κάμερας για μέτρηση απόστασης ή μετατόπισης έχει αναπτυχθεί σημαντικά λόγω της προόδου των ψηφιακών αισθητήρων εικόνας και των αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης. Σε αντίθεση με έναν σημειακό αισθητήρα, η κάμερα μπορεί να καταγράψει ολόκληρη σκηνή και να παρέχει πληροφορία για πολλά σημεία ταυτόχρονα. Αυτό επιτρέπει τη μέτρηση πολλαπλών αποστάσεων, την παρακολούθηση κίνησης και την ανάλυση γεωμετρίας αντικειμένων.



Εικόνα 2.6: Μέτρηση απόστασης με κάμερα

[<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTe6ygQrv3s1C64k6SYjumu4xqIeCycsWuHUQ&s>]

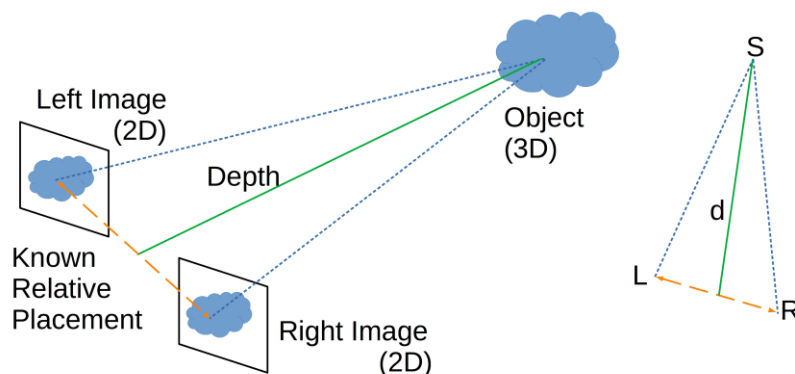
Η βασική αρχή σε μία απλή μέτρηση με κάμερα είναι η μετατροπή της απόστασης σε pixel σε πραγματική απόσταση. Για να γίνει αυτό, απαιτείται βαθμονόμηση του οπτικού συστήματος. Αν είναι γνωστό ότι ένα pixel αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος, για παράδειγμα σε mm/pixel ή μm/pixel, τότε η απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία της εικόνας μπορεί να μετατραπεί σε πραγματική απόσταση. Σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, απαιτείται διόρθωση παραμορφώσεων φακού, γεωμετρική βαθμονόμηση και χρήση προοπτικών μετασχηματισμών.

Οι μεθοδολογίες μηχανικής όρασης για μέτρηση μετατόπισης περιλαμβάνουν συνήθως τρία βασικά στάδια: βαθμονόμηση κάμερας, εντοπισμό ή παρακολούθηση στόχου και υπολογισμό μετατόπισης. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τέτοιες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές, όπως δομική παρακολούθηση, παρακολούθηση ταλαντώσεων, βιομηχανικός έλεγχος και εργαστηριακές μετρήσεις [19]. Σε πολλές περιπτώσεις, η κάμερα μπορεί να αντικαταστήσει συμβατικούς αισθητήρες, ειδικά όταν απαιτείται μη επαφική μέτρηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα.

Από ηλεκτρονική άποψη, ένα σύστημα μέτρησης με κάμερα περιλαμβάνει τον αισθητήρα εικόνας, το οπτικό σύστημα, τον φωτισμό, τη μονάδα λήψης εικόνας και την υπολογιστική μονάδα επεξεργασίας. Ο φωτισμός είναι κρίσιμος, επειδή επηρεάζει την αντίθεση και την ακρίβεια εντοπισμού ακμών ή χαρακτηριστικών σημείων. Η ανάλυση του αισθητήρα, το μέγεθος pixel, ο θόρυβος, ο φακός και η σταθερότητα της βάσης επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα της μέτρησης. Στη μικρομετρική κλίμακα, η χρήση μικροσκοπίου σε συνδυασμό με κάμερα επιτρέπει τη μεγέθυνση της περιοχής ενδιαφέροντος και τη μετατροπή της κίνησης σε μετρήσιμη μεταβολή pixel.

2.8 Stereo vision και τρισδιάστατη μέτρηση

Η μέτρηση απόστασης με στερεοσκοπική όραση βασίζεται στη χρήση δύο ή περισσότερων καμερών που παρατηρούν το ίδιο αντικείμενο από διαφορετικές γωνίες. Η διαφορά θέσης ενός σημείου στις δύο εικόνες, γνωστή ως *disparity*, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απόστασης του σημείου από τις κάμερες. Η μέθοδος αυτή είναι εμπνευσμένη από τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η ανθρώπινη όραση.



Εικόνα 2.7: Μέτρηση απόστασης με στερεοσκοπική όραση

[https://www.baeldung.com/wp-content/uploads/sites/4/2022/09/1_DepthInformation-2.png]

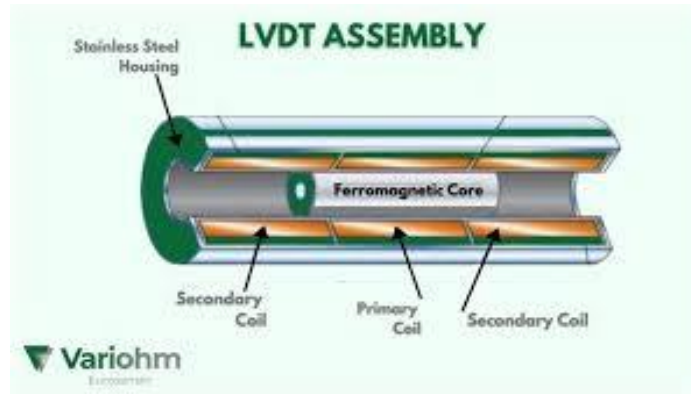
Το βασικό πλεονέκτημα της stereo vision είναι ότι μπορεί να παράγει πληροφορία βάθους χωρίς την ανάγκη ενεργής εκπομπής φωτός ή ήχου. Ωστόσο, απαιτεί ακριβή βαθμονόμηση των καμερών, σωστό συγχρονισμό, επαρκή υφή στην επιφάνεια του αντικειμένου και αξιόπιστο αλγόριθμο αντιστοίχισης σημείων. Σε περιπτώσεις όπου οι επιφάνειες είναι λείες, μονόχρωμες ή έχουν επαναλαμβανόμενα μοτίβα, η αντιστοίχιση μπορεί να είναι δύσκολη.

Στη βιομηχανική μετρολογία, η stereo vision χρησιμοποιείται για τρισδιάστατη ανακατασκευή, μέτρηση διαστάσεων, έλεγχο ποιότητας και παρακολούθηση κίνησης. Σε μικρομετρική κλίμακα, η εφαρμογή της είναι πιο απαιτητική, επειδή η οπτική μεγέθυνση, το βάθος πεδίου και η ευθυγράμμιση των καμερών παίζουν καθοριστικό ρόλο. Ωστόσο, με κατάλληλο οπτικό σχεδιασμό και αλγορίθμους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τρισδιάστατη εκτίμηση μικρών αντικειμένων ή επιφανειών.

2.9 Μηχανικοί αισθητήρες, encoders και LVDT

Παρότι οι μη επαφής αισθητήρες έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, οι μηχανικοί και ηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως. Ένα παράδειγμα είναι οι γραμμικοί και περιστροφικοί encoders, οι οποίοι μετατρέπουν τη θέση ή την κίνηση σε ψηφιακούς παλμούς. Οι encoders χρησιμοποιούνται σε συστήματα κίνησης, CNC μηχανές, ρομποτικούς βραχίονες και μηχανισμούς ακριβείας.

Ένας άλλος σημαντικός αισθητήρας είναι το LVDT, δηλαδή *Linear Variable Differential Transformer*. Το LVDT είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός αισθητήρας μετατόπισης που αποτελείται από ένα πρωτεύον πηνίο, δύο δευτερεύοντα πηνία και έναν κινητό πυρήνα. Όταν ο πυρήνας μετακινείται, αλλάζει η επαγωγική σύζευξη ανάμεσα στα πηνία, και η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της μετατόπισης. Τα LVDT είναι γνωστά για τη γραμμικότητα, την αξιοπιστία και τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους, επειδή δεν υπάρχει ηλεκτρική επαφή με τον κινητό πυρήνα.



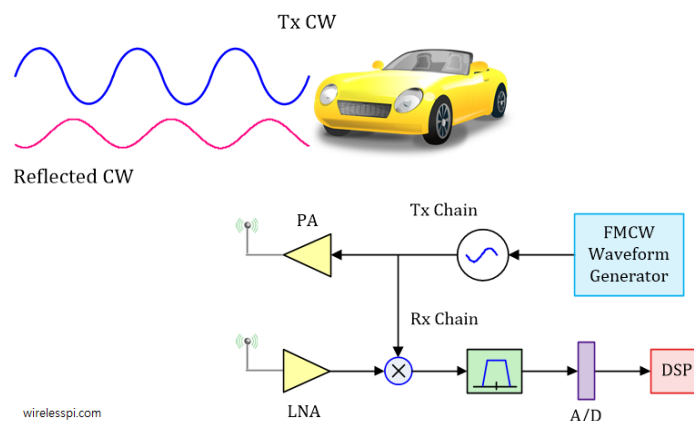
Εικόνα 2.8: LVDT αισθητήρας

[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRy3NWxehj_EqQUCiz0XwIRb5KDibOoe6WTgg&s]

Από ηλεκτρονική άποψη, τα LVDT απαιτούν εναλλασσόμενη διέγερση, διαφορική λήψη σήματος, αποδιαμόρφωση και φιλτράρισμα. Αν και δεν είναι πάντοτε κατάλληλα για πολύ μικρές διαστάσεις ή για μη επαφική μέτρηση σε ευαίσθητα αντικείμενα, παραμένουν σημαντική τεχνολογία για ακριβείς μετρήσεις μετατόπισης σε μηχανολογικές εφαρμογές.

2.10 RF, radar και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι μέτρησης

Οι τεχνολογίες RF και radar χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα για την εκτίμηση απόστασης, θέσης ή ταχύτητας. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, τα radar συστήματα υπολογίζουν την απόσταση με βάση τον χρόνο επιστροφής του σήματος ή τη μεταβολή συχνότητας σε συστήματα FMCW. Τα συστήματα FMCW radar εκπέμπουν σήμα του οποίου η συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά στον χρόνο. Η διαφορά συχνότητας ανάμεσα στο εκπεμπόμενο και στο λαμβανόμενο σήμα σχετίζεται με την απόσταση του στόχου.



Εικόνα 2.9: Μέτρηση απόστασης με RF

[<https://wirelesspi.com/wp-content/uploads/2023/10/figure-fmcw-radar-block-diagram.png>]

Οι RF μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως automotive radar, ανίχνευση αντικειμένων, μέτρηση στάθμης, παρακολούθηση κίνησης και βιοϊατρική ανίχνευση. Σε μικρές αποστάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τεχνικές near-field sensing ή συντονιστικά κυκλώματα, όπου η παρουσία ή η μετατόπιση ενός αντικειμένου μεταβάλλει την εμπέδηση, τη συχνότητα συντονισμού ή τη φάση του κυκλώματος. Αν και οι RF τεχνικές δεν είναι συνήθως η πρώτη επιλογή για μικρομετρική μέτρηση, μπορούν να παρουσιάσουν ενδιαφέρον σε ειδικές εφαρμογές, ιδιαίτερα όταν δεν είναι δυνατή η οπτική πρόσβαση ή όταν το περιβάλλον είναι δύσκολο για οπτικούς αισθητήρες.

Από πλευράς ηλεκτρονικών, τα RF συστήματα είναι πιο σύνθετα από πολλούς απλούς αισθητήρες απόστασης. Απαιτούν ταλαντωτές υψηλής συχνότητας, κεραίες ή συντονιστικές διατάξεις, μίκτες, φίλτρα, ενισχυτές χαμηλού θορύβου, κυκλώματα μέτρησης φάσης ή συχνότητας και ψηφιακή επεξεργασία. Η ακρίβεια της μέτρησης επηρεάζεται από το μήκος κύματος, τη σταθερότητα συχνότητας, τον θόρυβο φάσης, την ανάκλαση από πολλαπλές επιφάνειες και τη γεωμετρία του στόχου.

2.11 Σύγκριση βασικών τεχνολογιών

Κάθε τεχνολογία μέτρησης απόστασης έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και δεν υπάρχει μία λύση που να είναι ιδανική για όλες τις εφαρμογές. Οι υπερηχητικοί αισθητήρες είναι οικονομικοί και απλοί, αλλά έχουν περιορισμένη ακρίβεια. Οι laser αισθητήρες προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα, αλλά εξαρτώνται από τις οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας. Οι χωρητικοί αισθητήρες έχουν πολύ υψηλή ανάλυση σε μικρές αποστάσεις, αλλά είναι ευαίσθητοι στο περιβάλλον. Οι eddy-current αισθητήρες είναι ανθεκτικοί σε δύσκολες συνθήκες, αλλά απαιτούν μεταλλικό στόχο. Οι κάμερες προσφέρουν πλούσια χωρική πληροφορία και δυνατότητα μέτρησης πολλών σημείων, αλλά απαιτούν σωστή βαθμονόμηση, σταθερό φωτισμό και υπολογιστική επεξεργασία.

Πίνακας 1. Σύγκριση Τεχνολογιών

Τεχνολογία	Τυπική χρήση	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Υπερηχητικοί αισθητήρες	Ρομποτική, στάθμη, εμπόδια	Χαμηλό κόστος, απλή χρήση	Χαμηλότερη ακρίβεια, εξάρτηση από θερμοκρασία

Τεχνολογία	Τυπική χρήση	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Laser ToF	Μεγάλες/μεσαίες αποστάσεις	Γρήγορη μέτρηση, κατάλληλο για LiDAR	Απαιτεί γρήγορα ηλεκτρονικά
Laser triangulation	Μικρές/μεσαίες αποστάσεις	Υψηλή ακρίβεια, μη επαφική μέτρηση	Επηρεάζεται από επιφάνεια και γωνία
Χωρητικοί αισθητήρες	Μικρές αποστάσεις	Πολύ υψηλή ανάλυση	Ευαίσθησία σε υγρασία/διηλεκτρικά
Eddy-current	Μεταλλικοί στόχοι	Αντοχή σε σκόνη, λάδι, υγρασία	Μόνο για αγώγιμα υλικά
Επαγωγικοί	Μεταλλικά αντικείμενα	Στιβαρότητα, βιομηχανική χρήση	Μικρή περιοχή μέτρησης
Κάμερα / machine vision	Πολλαπλά σημεία, εικόνα	Μη επαφική, πλούσια πληροφορία	Απαιτεί calibration και φωτισμό
Stereo vision	3D μέτρηση	Εκτίμηση βάθους	Σύνθετη βαθμονόμηση
RF / radar	Μεσαίες/μεγάλες αποστάσεις, δύσκολα περιβάλλοντα	Λειτουργία χωρίς οπτική επαφή	Σύνθετα RF ηλεκτρονικά

Η μέτρηση απόστασης αποτελεί ένα πολυδιάστατο τεχνολογικό πεδίο που συνδυάζει φυσικές αρχές, αισθητήρια, ηλεκτρονικά κυκλώματα και αλγορίθμους επεξεργασίας. Οι βασικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν υπερηχητικούς, οπτικούς, laser, χωρητικούς, επαγωγικούς, eddy-current, RF και vision-based αισθητήρες. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια, την περιοχή μέτρησης, το υλικό του στόχου, το περιβάλλον λειτουργίας, το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Για εφαρμογές γενικής μέτρησης απόστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οικονομικές και απλές τεχνολογίες, όπως οι υπερηχητικοί ή οι απλοί οπτικοί αισθητήρες. Για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, ιδιαίτερα σε μικρή κλίμακα, απαιτούνται πιο εξειδικευμένες τεχνικές, όπως laser triangulation, confocal sensing, χωρητική μέτρηση, eddy-current sensing ή μικροσκοπική απεικόνιση με κάμερα.

Κεφάλαιο 3ο: Συστήματα Μέτρησης Αποστάσεων σε Μικρομετρική Κλίμακα

Η μέτρηση αποστάσεων σε μικρομετρική κλίμακα αποτελεί ένα εξειδικευμένο πεδίο της τεχνολογίας αισθητήρων και της ηλεκτρονικής μετρολογίας. Σε αντίθεση με τις γενικές εφαρμογές μέτρησης απόστασης, όπου το ζητούμενο μπορεί να είναι η ανίχνευση ενός αντικειμένου σε απόσταση εκατοστών ή μέτρων, στη μικρομετρική κλίμακα το ζητούμενο είναι ο αξιόπιστος προσδιορισμός πολύ μικρών μετατοπίσεων, συχνά της τάξης των λίγων μικρομέτρων ή και μικρότερων. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα μέτρησης πρέπει να έχει υψηλή ανάλυση, καλή επαναληψιμότητα, μικρό θόρυβο και σταθερή συμπεριφορά στον χρόνο.

Η μικρομετρική μέτρηση εμφανίζεται σε πολλές τεχνικές και επιστημονικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται στη μικροηλεκτρονική, στη μικρομηχανική, στην κατασκευή MEMS, στη ρομποτική ακριβείας, στην οπτική μετρολογία, στον ποιοτικό έλεγχο επιφανειών, στη μέτρηση πάχους λεπτών υμενίων, στην παρακολούθηση ταλαντώσεων και στην ανάλυση μικροσκοπικών αντικειμένων. Σε αυτές τις εφαρμογές, ακόμη και μία πολύ μικρή μετατόπιση μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία ενός συστήματος. Για παράδειγμα, η μεταβολή της θέσης ενός μικρού μηχανικού εξαρτήματος, η απόσταση μεταξύ δύο μικροδομών ή η μετατόπιση μιας επιφάνειας λόγω ταλάντωσης μπορεί να χρειάζεται να μετρηθεί με ακρίβεια μικρομέτρων.

Στη μικρομετρική κλίμακα, η μέτρηση απόστασης δεν είναι μόνο θέμα επιλογής αισθητήρα αλλά ένα πρόβλημα όλου του συστήματος. Η ακρίβεια εξαρτάται από τη φυσική αρχή μέτρησης, το αισθητήριο στοιχείο, το αναλογικό κύκλωμα, το επίπεδο θορύβου, τη θερμοκρασιακή σταθερότητα, τη μηχανική στήριξη, τη βαθμονόμηση, την adc μετατροπή και τον αλγόριθμο υπολογισμού. Για τον λόγο αυτό πολλές τεχνολογίες υψηλής ακρίβειας, όπως οι χωρητικοί αισθητήρες, οι confocal αισθητήρες, οι eddy-current αισθητήρες και οι laser triangulation αισθητήρες, χρησιμοποιούνται ως ολοκληρωμένα μετρητικά συστήματα και όχι απλώς ως απλά αισθητήρια [20]. Οι μη επαφής αισθητήρες υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιούνται συχνά όταν η επιφάνεια δεν πρέπει να αγγιχθεί ή όταν απαιτείται μέτρηση χωρίς φθορά και χωρίς μηχανική φόρτιση του αντικειμένου.

3.1 Ιδιαιτερότητες της μικρομετρικής μέτρησης

Η μέτρηση σε μικρομετρική κλίμακα παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τη μέτρηση σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Πρώτον, το ωφέλιμο σήμα είναι συνήθως πολύ μικρό. Μια μετατόπιση λίγων μικρομέτρων μπορεί να προκαλέσει πολύ μικρή μεταβολή στην τάση, στη χωρητικότητα, στη φάση, στην ένταση φωτός ή στη θέση ενός φωτεινού σημείου πάνω σε έναν αισθητήρα εικόνας.

Επομένως, το ηλεκτρονικό κύκλωμα πρέπει να μπορεί να ανιχνεύσει μικρές μεταβολές χωρίς να καλύπτονται από θόρυβο.

Δεύτερον, τα σφάλματα του συστήματος γίνονται πιο σημαντικά και οι μηχανικές ταλαντώσεις, θερμική διαστολή, ανοχές φακών, αστάθεια φωτισμού, θόρυβος αισθητήρα, παραμορφώσεις εικόνas και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση. Σε μετρήσεις μικρομέτρων, ακόμη και μία μικρή θερμοκρασιακή μεταβολή μπορεί να προκαλέσει μηχανική διαστολή σε βάση, φακό ή μεταλλικό εξάρτημα και να δημιουργήσει σφάλμα. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα μικρομετρικής μέτρησης απαιτούν σταθερή μηχανική κατασκευή, σωστή θερμική διαχείριση και κατάλληλη βαθμονόμηση.

Τρίτον, υπάρχει συχνά συμβιβασμός ανάμεσα στην περιοχή μέτρησης και την ακρίβεια. Σε πολλές τεχνολογίες, όσο αυξάνεται η απαιτούμενη ακρίβεια τόσο μειώνεται η διαθέσιμη περιοχή μέτρησης. Για παράδειγμα, ένας χωρητικός αισθητήρας μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλή ανάλυση, αλλά συνήθως λειτουργεί σε μικρό διάκενο. Αντίστοιχα, ένας confocal αισθητήρας μπορεί να έχει πολύ καλή αξονική ακρίβεια, αλλά απαιτεί συγκεκριμένη οπτική διάταξη και κατάλληλη επιφάνεια στόχου [21]. Η ίδια τάση αναφέρεται και σε τεχνικές επιλογής non-contact displacement sensors για motion control, όπου η αύξηση της ακρίβειας συνήθως συνδέεται με μικρότερη περιοχή μέτρησης.

3.2 Βασικές τεχνολογίες μικρομετρικής μέτρησης

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συχνότερα για μέτρηση απόστασης ή μετατόπισης σε μικρομετρική κλίμακα είναι οι εξής: Laser triangulation, Laser interferometry, Chromatic confocal, Χωρητικοί αισθητήρες, Eddy-current αισθητήρες, Οπτική μικροσκοπία + κάμερα, Fiber optic displacement sensors, Contact micro-displacement sensors.

Οι παραπάνω τεχνολογίες δεν είναι ανταγωνιστικές σε όλες τις περιπτώσεις. Η επιλογή εξαρτάται από το υλικό του στόχου, την απαιτούμενη ακρίβεια, την περιοχή μέτρησης, την επιφάνεια, το κόστος, την ταχύτητα, το περιβάλλον και τη δυνατότητα οπτικής πρόσβασης. Για παράδειγμα, ένας χωρητικός αισθητήρας μπορεί να είναι εξαιρετικός για αγωγίμους στόχους σε καθαρό περιβάλλον και μικρό διάκενο, αλλά λιγότερο κατάλληλος όταν υπάρχει υγρασία ή μεταβολή του διηλεκτρικού υλικού. Ένας eddy-current αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα σε βιομηχανικό περιβάλλον με λάδια ή σκόνη, αλλά απαιτεί μεταλλικό στόχο. Ένα σύστημα μικροσκοπίου και κάμερας μπορεί να δώσει πολύ χρήσιμη εικόνα και δυνατότητα ανάλυσης πολλών σημείων, αλλά χρειάζεται σωστή βαθμονόμηση και σταθερό φωτισμό.

3.3 Laser triangulation για μικρομετρικές μετρήσεις

Η τεχνική laser triangulation χρησιμοποιείται ευρέως για μη επαφικές μετρήσεις απόστασης και μετατόπισης. Στη βασική διάταξη, μία δέσμη laser προσπίπτει στην επιφάνεια του στόχου. Το ανακλώμενο φως συλλέγεται από φακό και προβάλλεται σε έναν αισθητήρα θέσης, όπως CCD, CMOS ή position sensitive detector. Όταν η απόσταση του στόχου μεταβάλλεται, μεταβάλλεται και η θέση του φωτεινού σημείου πάνω στον ανιχνευτή. Η θέση αυτή συνδέεται γεωμετρικά με την απόσταση.

Η laser triangulation είναι κατάλληλη για μικρομετρικές μετρήσεις επειδή μετατρέπει μία μικρή αξονική μετατόπιση του στόχου σε μετρήσιμη μετατόπιση του φωτεινού σημείου πάνω στον αισθητήρα. Με κατάλληλο οπτικό σχεδιασμό, υψηλή ανάλυση αισθητήρα και αλγοριθμική επεξεργασία της θέσης του spot, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές αναλύσεις. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για μέτρηση ύψους, πάχους, προφίλ επιφάνειας, ταλάντωσης και θέσης σε βιομηχανικές εφαρμογές [22].

Από ηλεκτρονική άποψη, ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει σταθεροποιημένη πηγή laser, οπτικό σύστημα, φωτοανιχνευτή ή αισθητήρα εικόνας, αναλογική ή ψηφιακή ανάγνωση και επεξεργασία σήματος. Στην περίπτωση αισθητήρα εικόνας, ο υπολογισμός της θέσης του φωτεινού σημείου μπορεί να γίνει με υπολογισμό κέντρου βάρους, fitting Gaussian καμπύλης ή άλλες μεθόδους sub-pixel εντοπισμού. Η ακρίβεια εξαρτάται από το μέγεθος του spot, την ανάλυση του αισθητήρα, την ανακλαστικότητα της επιφάνειας, τη γωνία πρόσπτωσης και τον θόρυβο.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της laser triangulation είναι ότι προσφέρει σχετικά υψηλή ταχύτητα και μη επαφική λειτουργία. Ωστόσο, επηρεάζεται από την επιφάνεια του στόχου. Πολύ γυαλιστερές, πολύ σκοτεινές, διαφανείς ή έντονα κεκλιμένες επιφάνειες μπορεί να προκαλέσουν σφάλματα. Επίσης, σε μικρομετρικές μετρήσεις απαιτείται προσεκτική μηχανική σταθερότητα, επειδή η παραμικρή μεταβολή στη θέση του αισθητήρα ή του φακού μπορεί να επηρεάσει την τελική μέτρηση.

3.4 Laser interferometry

Η συμβολομετρία laser αποτελεί μία από τις πιο ακριβείς τεχνικές μέτρησης μετατόπισης. Η βασική της αρχή βασίζεται στη συμβολή δύο δεσμών φωτός: μίας δέσμης αναφοράς και μίας δέσμης μέτρησης. Όταν η επιφάνεια του στόχου μετακινείται, αλλάζει το οπτικό μήκος διαδρομής της δέσμης μέτρησης. Η μεταβολή αυτή προκαλεί μεταβολή στη φάση του φωτός, η οποία μπορεί να μετρηθεί και να μετατραπεί σε μετατόπιση.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της συμβολομετρίας είναι ότι χρησιμοποιεί το μήκος κύματος του φωτός ως μέτρο αναφοράς. Αυτό επιτρέπει μετρήσεις εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας, ακόμη και κάτω από τη μικρομετρική κλίμακα. Σε σύγχρονες εφαρμογές, οι laser interferometers μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις μετατόπισης, ταλάντωσης, επιπεδότητας, ευθυγράμμισης, θέσης και βαθμονόμησης συστημάτων ακριβείας [23]. Πρόσφατη ανασκόπηση για την επεξεργασία σήματος στην οπτική συμβολομετρία αναφέρει ότι η μέτρηση μετατόπισης γίνεται μέσω ανάλυσης της μεταβολής φάσης του ανακλώμενου φωτός σε σχέση με δέσμη αναφοράς, επιτρέποντας εύρος εφαρμογών από πολύ μικρές έως μεγάλες αποστάσεις.

Από πλευράς ηλεκτρονικών, ένα συμβολομετρικό σύστημα απαιτεί σταθερή πηγή laser, οπτικά στοιχεία διαχωρισμού και επανασύνδεσης δέσμης, φωτοανιχνευτές, κυκλώματα ενίσχυσης και αλγορίθμους ανάλυσης φάσης. Η μέτρηση δεν είναι απλώς οπτική, αλλά απαιτεί υψηλής ποιότητας ηλεκτρονική λήψη και ψηφιακή επεξεργασία. Ο θόρυβος φάσης, οι μηχανικές ταλαντώσεις, οι ατμοσφαιρικές μεταβολές και η θερμοκρασία μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση.

Η συμβολομετρία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη όταν απαιτείται πολύ υψηλή ακρίβεια, αλλά έχει και περιορισμούς. Συνήθως απαιτεί καλή οπτική ευθυγράμμιση, σταθερό περιβάλλον και επιφάνειες που επιτρέπουν αξιόπιστη ανάκλαση. Για τον λόγο αυτό, ενώ είναι εξαιρετική για εργαστηριακές και μετρολογικές εφαρμογές, μπορεί να είναι πιο δύσκολη στην υλοποίηση σε σκληρό βιομηχανικό περιβάλλον.

3.5 Chromatic confocal αισθητήρες

Οι chromatic confocal αισθητήρες αποτελούν μία ιδιαίτερα σημαντική τεχνολογία για μέτρηση μικρομετρικών αποστάσεων και επιφανειακών χαρακτηριστικών. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη χρωματική διασπορά. Το λευκό φως ή πολυχρωματικό φως διέρχεται από οπτικό σύστημα που εστιάζει διαφορετικά μήκη κύματος σε διαφορετικές αποστάσεις. Όταν η επιφάνεια του αντικειμένου βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση, ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος εστιάζεται καλύτερα και επιστρέφει στον ανιχνευτή. Με ανάλυση του μήκους κύματος που επιστρέφει με τη μεγαλύτερη ένταση, μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση της επιφάνειας.

Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για ακριβείς μετρήσεις ύψους, πάχους και επιφανειακού προφίλ. Χρησιμοποιείται στη βιομηχανική μετρολογία, στην επιθεώρηση γυάλινων ή ημιδιαφανών υλικών, σε λεπτά υμένια, σε επιφάνειες μικρομηχανικής και σε εφαρμογές όπου απαιτείται μη επαφική μέτρηση με υψηλή αξονική ακρίβεια. Πρόσφατη ανασκόπηση αναφέρει ότι οι chromatic confocal τεχνολογίες χρησιμοποιούνται ευρέως για ακριβή, σταθερή και αποδοτική μέτρηση μετατόπισης σε βιομηχανικά πεδία [24].

Από ηλεκτρονική και συστημική άποψη, ένας chromatic confocal αισθητήρας περιλαμβάνει φωτεινή πηγή, οπτικό σύστημα με ελεγχόμενη χρωματική εκτροπή, οπτική ίνα ή διάταξη μεταφοράς φωτός, φασματικό ανιχνευτή και ψηφιακή επεξεργασία. Η απόσταση δεν υπολογίζεται από χρόνο πτήσης ή από θέση spot, αλλά από το μήκος κύματος που συσχετίζεται με τη θέση εστίασης.

Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι η υψηλή αξονική ακρίβεια και η δυνατότητα μέτρησης επιφανειών χωρίς μηχανική επαφή. Ωστόσο, η ακρίβεια μπορεί να επηρεαστεί από την τραχύτητα της επιφάνειας, την κλίση, την ανακλαστικότητα και τις οπτικές ιδιότητες του υλικού. Έρευνες για τη μέτρηση τραχιών επιφανειών δείχνουν ότι η τραχύτητα μπορεί να δημιουργήσει αποκλίσεις στη μέτρηση chromatic confocal αισθητήρων κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας [25].

3.6 Χωρητικοί αισθητήρες μικρομετρικής μετατόπισης

Οι χωρητικοί αισθητήρες είναι από τις σημαντικότερες τεχνολογίες για μέτρηση μικρών μετατοπίσεων. Η λειτουργία τους βασίζεται στη μεταβολή της χωρητικότητας μεταξύ αισθητήρα και στόχου. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο αγωγικών επιφανειών αλλάζει, αλλάζει και η χωρητικότητα. Αυτή η μεταβολή μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα και να μετατραπεί σε απόσταση.

Σε μικρομετρική ή και νανομετρική κλίμακα, οι χωρητικοί αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλή ανάλυση, υψηλή γραμμικότητα και καλή δυναμική απόκριση. Χρησιμοποιούνται σε nanopositioning, μικρομετακινήσεις, έλεγχο piezo stages, μέτρηση ταλαντώσεων, έλεγχο πάχους και εφαρμογές ακριβείας. Εμπορικά συστήματα χωρητικών αισθητήρων χρησιμοποιούν συχνά υψίσυχνη AC διέγερση για βελτίωση της σταθερότητας, του bandwidth και της μείωσης drift [26].

Η βασική σχέση ενός ιδανικού επίπεδου πυκνωτή είναι:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

όπου C είναι η χωρητικότητα, ϵ η διηλεκτρική σταθερά, A το εμβαδόν των ηλεκτροδίων και d η απόσταση. Στην πράξη, όμως, η υλοποίηση είναι πιο σύνθετη, επειδή υπάρχουν παρασιτικές χωρητικότητες, fringing fields, θόρυβος, μη ιδανική γεωμετρία και περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Από ηλεκτρονική άποψη, η μέτρηση χωρητικότητας μπορεί να γίνει με ταλαντωτές, γέφυρες, charge amplifiers, synchronous demodulation ή ειδικά capacitive sensing integrated circuits. Η

σωστή θωράκιση, η γείωση, η σχεδίαση PCB και η σταθερότητα του καλωδίου παίζουν καθοριστικό ρόλο. Για πολύ μικρές μεταβολές χωρητικότητας, ακόμη και η κίνηση ενός καλωδίου ή η ύπαρξη παρασιτικής σύζευξης μπορεί να επηρεάσει τη μέτρηση.

Οι χωρητικοί αισθητήρες έχουν, όμως, και περιορισμούς. Είναι πιο κατάλληλοι για αγωγίμους στόχους ή για ελεγχόμενα διηλεκτρικά υλικά. Επηρεάζονται από υγρασία, σκόνη, ρύπανση, μεταβολές διηλεκτρικής σταθεράς και γεωμετρικές αποκλίσεις. Επομένως, είναι ιδιαίτερα ισχυρή λύση για εργαστηριακές και καθαρές βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά απαιτούν προσεκτικό έλεγχο περιβάλλοντος.

3.7 Eddy-current αισθητήρες στη μικρομετρική κλίμακα

Οι eddy-current αισθητήρες χρησιμοποιούνται για μη επαφική μέτρηση απόστασης ή μετατόπισης σε αγωγίμους στόχους. Η λειτουργία τους βασίζεται στη δημιουργία μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου από ένα πηνίο. Όταν ένα μεταλλικό αντικείμενο βρίσκεται κοντά στο πηνίο, επάγονται σε αυτό δινορρεύματα. Τα δινορρεύματα μεταβάλλουν την εμπέδηση του πηνίου και αυτή η μεταβολή μπορεί να συσχετιστεί με την απόσταση.

Στη μικρομετρική κλίμακα, οι eddy-current αισθητήρες έχουν σημαντικό ενδιαφέρον επειδή μπορούν να μετρήσουν μικρές μετατοπίσεις σε μεταλλικά αντικείμενα ακόμη και σε περιβάλλοντα όπου οι οπτικοί αισθητήρες δυσκολεύονται. Για παράδειγμα, λάδι, σκόνη ή υγρασία δεν επηρεάζουν απαραίτητα τη μέτρηση στον ίδιο βαθμό που θα επηρέαζαν έναν οπτικό αισθητήρα. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για βιομηχανικές εφαρμογές, μέτρηση ταλαντώσεων, παρακολούθηση άξονων, έλεγχο runout, μέτρηση πάχους και δυναμικές μετατοπίσεις [27].

Από ηλεκτρονική άποψη, οι eddy-current αισθητήρες απαιτούν υψίσυχνη διέγερση, πηνίο αισθητήρα, κύκλωμα μέτρησης πλάτους ή φάσης, αποδιαμόρφωση, φιλτράρισμα και γραμμικοποίηση. Η ακρίβεια επηρεάζεται από το υλικό του στόχου, την αγωγιμότητα, τη μαγνητική διαπερατότητα, τη θερμοκρασία και τη γεωμετρία. Για τον λόγο αυτό, συνήθως απαιτείται βαθμονόμηση για συγκεκριμένο υλικό και συγκεκριμένη διάταξη μέτρησης.

Το βασικό πλεονέκτημα των eddy-current αισθητήρων είναι η ανθεκτικότητα και η δυνατότητα λειτουργίας σε βιομηχανικό περιβάλλον. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν αγωγίμο στόχο και η συμπεριφορά τους εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού.

3.8 Οπτική μικροσκοπία και κάμερα για μέτρηση μικροαποστάσεων

Η μέτρηση μικροαποστάσεων με μικροσκόπιο και κάμερα αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική προσέγγιση, ειδικά όταν η πληροφορία βρίσκεται ήδη σε μορφή εικόνας. Σε αυτήν την περίπτωση, η μικροαπόσταση δεν μετريέται από έναν κλασικό αισθητήρα απόστασης, αλλά υπολογίζεται από την εικόνα. Το μικροσκόπιο παρέχει μεγέθυνση, η κάμερα καταγράφει την εικόνα και ο αλγόριθμος μετατρέπει την απόσταση σε pixel σε πραγματική απόσταση.

Η βασική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. λήψη εικόνας από κάμερα ή μικροσκόπιο,
2. βαθμονόμηση με γνωστή κλίμακα,
3. υπολογισμό συντελεστή μετατροπής, π.χ. $\mu\text{m}/\text{pixel}$,
4. εντοπισμό σημείων, ακμών ή αντικειμένων,
5. υπολογισμό απόστασης σε pixel,
6. μετατροπή της απόστασης σε μικρόμετρα.

Για παράδειγμα, αν από τη βαθμονόμηση προκύπτει ότι 1 pixel αντιστοιχεί σε 2 μm και δύο σημεία απέχουν 150 pixels, τότε η πραγματική απόσταση είναι:

$$d = 150 \times 2 = 300 \mu\text{m}$$

Η ακρίβεια μιας τέτοιας μέτρησης εξαρτάται από τη μεγέθυνση, την ανάλυση της κάμερας, το μέγεθος pixel, τη σταθερότητα φωτισμού, την ποιότητα φακού, το βάθος πεδίου, τη θόλωση, τον θόρυβο και τον αλγόριθμο εντοπισμού. Σε πολλές εφαρμογές, η απλή μέτρηση σε ακέραια pixels δεν είναι αρκετή. Για αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές sub-pixel localization, οι οποίες επιτρέπουν εκτίμηση της θέσης με ακρίβεια μικρότερη από ένα pixel.

Η προσέγγιση μικροσκόπιο + κάμερα είναι πολύ σημαντική για εργασίες όπως η παρακολούθηση μικροαντικειμένων, η μέτρηση διαμέτρων, η ανάλυση μικρομετατοπίσεων, η μέτρηση απόστασης μεταξύ μικρών δομών και η παρακολούθηση παραμορφώσεων. Σε σύγκριση με έναν σημειακό αισθητήρα, η κάμερα δίνει περισσότερη πληροφορία, επειδή μπορεί να καταγράψει ολόκληρο πεδίο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν πρέπει να μετρηθούν πολλά σημεία ή όταν η θέση του αντικειμένου δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή.

3.9 Fiber optic displacement sensors

Οι αισθητήρες μετατόπισης με οπτικές ίνες αποτελούν ακόμη μία κατηγορία αισθητήρων υψηλής ακρίβειας. Μπορούν να βασίζονται σε διαφορετικές αρχές, όπως μεταβολή έντασης, συμβολομετρία, Fabry–Perot κοιλότητες, fiber Bragg gratings ή άλλες οπτικές διατάξεις. Το πλεονέκτημα των οπτικών ινών είναι ότι μπορούν να μεταφέρουν φως σε περιοχές όπου η άμεση χρήση ηλεκτρονικών είναι δύσκολη, ενώ είναι ανθεκτικές σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Οι fiber optic displacement sensors έχουν χρησιμοποιηθεί σε επιστημονικές, βιομηχανικές και ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ευαισθησία, μικρό μέγεθος αισθητήρα ή δυνατότητα μέτρησης σε δύσκολα περιβάλλοντα. Ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας δείχνουν ότι οι τεχνικές αυτές έχουν αναπτυχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές κρίσιμης μέτρησης μετατόπισης [28].

Σε ορισμένες διατάξεις, η μετατόπιση μπορεί να μετρηθεί με πολύ υψηλή ανάλυση μέσω συμβολομετρικής διάταξης οπτικής ίνας. Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί fiber-optic displacement sensor με ανάλυση της τάξης μερικών νανομέτρων, αξιοποιώντας οπτική συμβολομετρία σε μήκος κύματος κοντά στα 1550 nm [29].

3.10 Contact micro-displacement sensors

Παρότι οι μη επαφής αισθητήρες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται αισθητήρες επαφής για μικρομετρικές μετρήσεις. Ένας contact micro-displacement sensor έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο και μετατρέπει τη μετατόπιση σε ηλεκτρικό σήμα. Τέτοια συστήματα μπορεί να βασίζονται σε μηχανικό μοχλό, strain gauge, LVDT, piezoresistive στοιχείο ή άλλο μετατροπέα.

Το πλεονέκτημα των αισθητήρων επαφής είναι ότι μπορούν να είναι απλοί, οικονομικοί και αξιόπιστοι σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η επιφάνεια δεν είναι κατάλληλη για οπτική μέτρηση. Ωστόσο, το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι η επαφή μπορεί να επηρεάσει το αντικείμενο, ειδικά όταν πρόκειται για μαλακά, εύκαμπτα ή πολύ μικρά αντικείμενα. Επίσης, η μηχανική τριβή και η φθορά μπορούν να επηρεάσουν τη μακροχρόνια ακρίβεια.

Έρευνες έχουν παρουσιάσει compact micro-displacement sensors επαφής με υπομικρομετρική ακρίβεια και χαμηλό κόστος, δείχνοντας ότι οι αισθητήρες επαφής εξακολουθούν να έχουν ρόλο σε συγκεκριμένες εργαστηριακές και εκπαιδευτικές εφαρμογές [30].

3.11 Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια

Η ακρίβεια ενός συστήματος μικρομετρικής μέτρησης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι είναι:

Πίνακας 2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια

Παράγοντας	Επίδραση στη μέτρηση
Θόρυβος αισθητήρα	Μειώνει την ανάλυση και αυξάνει τη διακύμανση
Θερμοκρασία	Προκαλεί drift και μηχανική διαστολή
Μηχανική σταθερότητα	Επηρεάζει την επαναληψιμότητα
Φωτισμός	Κρίσιμος σε οπτικά και camera-based συστήματα
Ανακλαστικότητα επιφάνειας	Επηρεάζει laser και confocal αισθητήρες
Υγρασία και διηλεκτρικά	Επηρεάζουν χωρητικούς αισθητήρες
Υλικό στόχου	Κρίσιμο για eddy-current και επαγωγικούς αισθητήρες
Βαθμονόμηση	Καθορίζει τη σωστή μετατροπή σήματος σε απόσταση
Ανάλυση ADC	Περιορίζει τη διακριτική ικανότητα ηλεκτρονικής μέτρησης
Αλγόριθμος επεξεργασίας	Επηρεάζει τον τελικό υπολογισμό της απόστασης

Στη μικρομετρική κλίμακα, ο σχεδιασμός του ηλεκτρονικού συστήματος είναι εξίσου σημαντικός με την επιλογή του αισθητήρα. Ένας αισθητήρας υψηλής ακρίβειας μπορεί να αποδώσει χαμηλά αν το κύκλωμα ανάγνωσης έχει θόρυβο, αν το ADC δεν έχει επαρκή ανάλυση, αν υπάρχει κακή γείωση ή αν ο αλγόριθμος δεν είναι σωστά βαθμονομημένος. Αντίστοιχα, ένα καλό σύστημα επεξεργασίας εικόνας μπορεί να αποτύχει αν ο φωτισμός δεν είναι σταθερός ή αν το μικροσκόπιο δεν έχει σωστή εστίαση.

3.12 Σύγκριση τεχνολογιών μικρομετρικής μέτρησης

Πίνακας 3. Σύγκριση τεχνολογιών μικρομετρικής μέτρησης

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Καταλληλότητα για μικρομετρική μέτρηση
Laser triangulation	Γρήγορη, μη επαφική, βιομηχανική χρήση	Επηρεάζεται από επιφάνεια και γωνία	Υψηλή
Laser interferometry	Εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια	Ακριβή, απαιτεί ευθυγράμμιση	Πολύ υψηλή
Chromatic confocal	Υψηλή αξονική ακρίβεια, μέτρηση επιφανειών	Ευαισθησία σε τραχύτητα/οπτικές ιδιότητες	Πολύ υψηλή
Χωρητικοί αισθητήρες	Πολύ υψηλή ανάλυση, απλή αρχή	Ευαισθησία σε περιβάλλον/διηλεκτρικά	Πολύ υψηλή
Eddy-current	Ανθεκτικοί σε δύσκολα περιβάλλοντα	Μόνο αγώγιμοι στόχοι	Υψηλή
Μικροσκόπιο + κάμερα	Πλήρης εικόνα, πολλαπλές μετρήσεις	Απαιτεί calibration και image processing	Πολύ υψηλή
Fiber optic	Αντοχή σε EMI, μικρό μέγεθος αισθητήρα	Πιο σύνθετη οπτική διάταξη	Υψηλή
Contact micro-sensors	Απλοί, χαμηλότερο κόστος	Επηρεάζουν το αντικείμενο	Μέτρια έως υψηλή

Η μέτρηση αποστάσεων σε μικρομετρική κλίμακα απαιτεί τεχνολογίες υψηλής ακρίβειας και προσεκτικό σχεδιασμό ολόκληρης της αλυσίδας μέτρησης. Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η laser triangulation, η laser interferometry, η chromatic confocal μέτρηση, οι χωρητικοί αισθητήρες, οι eddy-current αισθητήρες, οι αισθητήρες οπτικής ίνας και τα συστήματα

μικροσκοπίου με κάμερα. Κάθε τεχνολογία έχει διαφορετική φυσική αρχή λειτουργίας, διαφορετικές απαιτήσεις ηλεκτρονικών και διαφορετικούς περιορισμούς.

Συνήθως δεν υπάρχει μία τεχνολογία που να είναι ιδανική για όλες τις εφαρμογές μικρομετρικής μέτρησης. Η επιλογή πρέπει να γίνεται με βάση το αντικείμενο μέτρησης, το περιβάλλον, την απαιτούμενη ακρίβεια, το κόστος, την ταχύτητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο τελικό σύστημα. Για την παρούσα πτυχιακή εργασία, ιδιαίτερη σημασία έχει η μέθοδος μικροσκοπίου και κάμερας, επειδή μπορεί να συνδυάσει αισθητήρες εικόνας, οπτική μεγέθυνση, ηλεκτρονικό σύστημα λήψης και αλγορίθμους Python για τον υπολογισμό μικροαποστάσεων.

Κεφάλαιο 4ο: Μέτρηση Απόστασης με Laser

Η μέτρηση απόστασης με laser αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές και διαδεδομένες τεχνολογίες μη επαφικής μέτρησης. Η βασική ιδέα είναι ότι μία δέσμη laser εκπέμπεται προς ένα αντικείμενο ή μία επιφάνεια, αλληλεπιδρά με αυτήν και ένα μέρος της ακτινοβολίας επιστρέφει προς τον αισθητήρα. Από την ανάλυση του επιστρεφόμενου σήματος μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση ή η μετατόπιση του αντικειμένου. Σε αντίθεση με απλές οπτικές πηγές, το laser παρουσιάζει υψηλή κατευθυντικότητα, μικρή διασπορά, δυνατότητα εστίασης σε μικρή κηλίδα και σχετικά υψηλή ισχύ σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται σε αισθητήρες απόστασης, βιομηχανικά συστήματα μέτρησης, LiDAR, laser rangefinders, συστήματα ρομποτικής και εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου [31].

Η μέτρηση με laser δεν είναι μία ενιαία μέθοδος. Υπάρχουν διαφορετικές τεχνικές, ανάλογα με το εύρος της απόστασης, την απαιτούμενη ακρίβεια, την ταχύτητα μέτρησης και το είδος του αντικειμένου. Οι βασικότερες τεχνικές είναι η μέτρηση χρόνου πτήσης, η μέτρηση διαφοράς φάσης και η laser triangulation. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιούνται συχνά τεχνικές χρόνου πτήσης ή φάσης, ενώ σε μικρότερες αποστάσεις και σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιείται συχνά η τριγωνομετρική μέτρηση με laser [32].

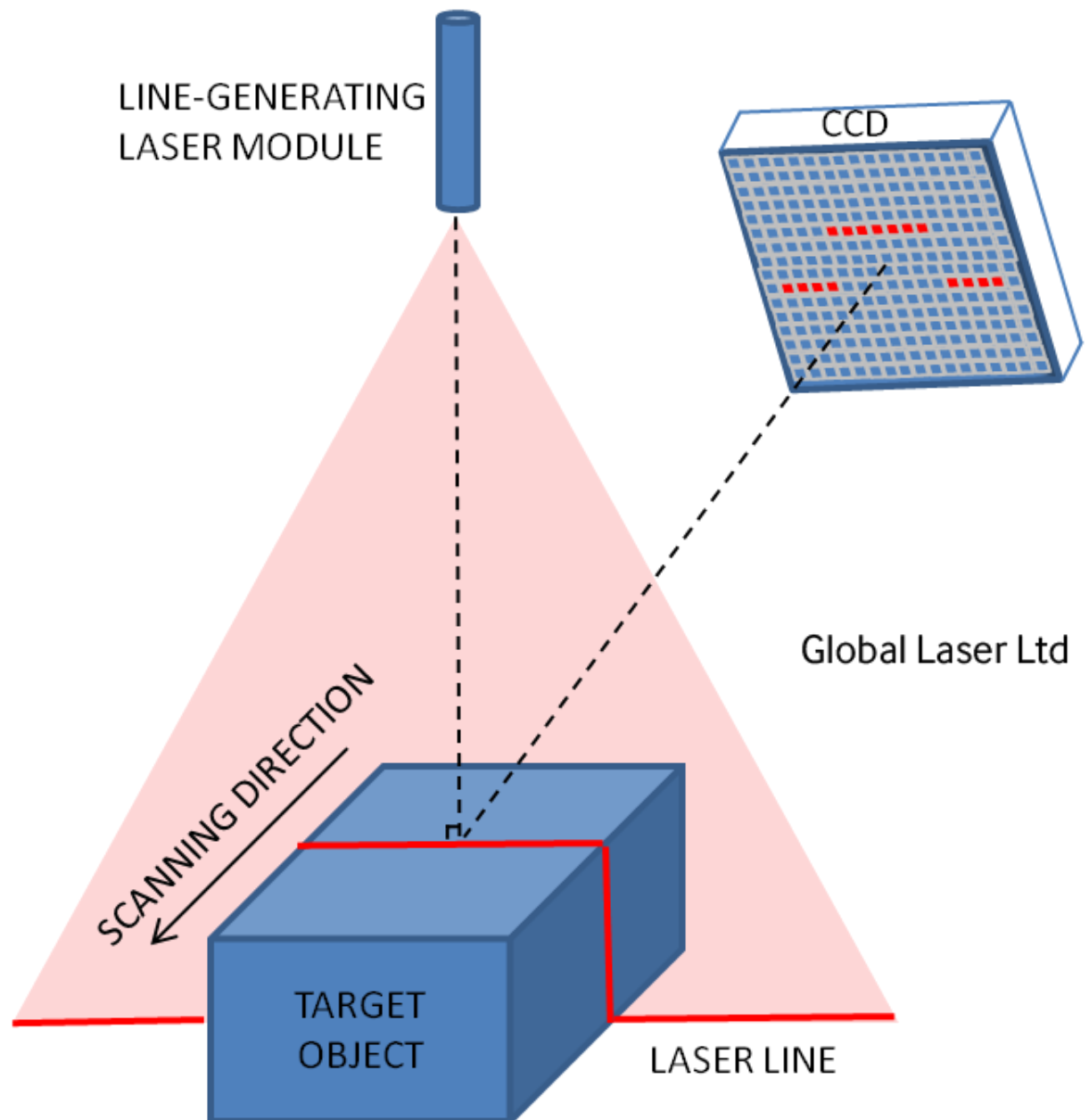
4.1 Βασική δομή ενός laser συστήματος μέτρησης

Ένα τυπικό σύστημα μέτρησης απόστασης με laser αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

Πίνακας 4. Σύστημα μέτρησης απόστασης με laser

Τμήμα συστήματος	Ρόλος
Πηγή laser	Εκπέμπει τη δέσμη φωτός προς τον στόχο
Οπτικό σύστημα εκπομπής	Διαμορφώνει, εστιάζει ή κατευθύνει τη δέσμη
Αντικείμενο/στόχος	Ανακλά ή διαχέει μέρος της ακτινοβολίας
Οπτικό σύστημα λήψης	Συλλέγει το επιστρεφόμενο φως
Φωτοανιχνευτής ή αισθητήρας εικόνας	Μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό σήμα
Αναλογικά ηλεκτρονικά	Ενισχύουν, φιλτράρουν και προσαρμόζουν το σήμα
ADC / ψηφιακή μονάδα	Μετατρέπει το σήμα σε ψηφιακή μορφή
Αλγόριθμος επεξεργασίας	Υπολογίζει την απόσταση

Τμήμα συστήματος	Ρόλος
Εξοδος συστήματος	Παρέχει τιμή απόστασης, προφίλ ή σήμα ελέγχου



Εικόνα 4.1: Τυπικό σύστημα μέτρησης απόστασης με laser
[\[https://globallasertech.com/wp-content/uploads/2025/04/Laser-Line-Triangulation.png\]](https://globallasertech.com/wp-content/uploads/2025/04/Laser-Line-Triangulation.png)

Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται από όλα τα παραπάνω στάδια. Η ποιότητα της πηγής laser επηρεάζει τη σταθερότητα και τη γεωμετρία της δέσμης. Το οπτικό σύστημα καθορίζει το μέγεθος της κηλίδας, τη γωνία πρόσπτωσης και την ποσότητα φωτός που επιστρέφει στον ανιχνευτή. Ο φωτοανιχνευτής και τα αναλογικά ηλεκτρονικά καθορίζουν το επίπεδο θορύβου, την ευαισθησία και το bandwidth. Τέλος, ο αλγόριθμος επεξεργασίας μετατρέπει το μετρούμενο σήμα σε απόσταση, λαμβάνοντας υπόψη τη βαθμονόμηση και τα πιθανά σφάλματα.

4.2 Μέτρηση χρόνου πτήσης

Η μέθοδος χρόνου πτήσης, γνωστή ως *time-of-flight* ή ToF, βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται ώστε ένας παλμός φωτός να διανύσει την απόσταση από τον αισθητήρα μέχρι το αντικείμενο και να επιστρέψει. Επειδή το φως ταξιδεύει με πολύ μεγάλη ταχύτητα, η μέτρηση μικρών χρόνων απαιτεί ηλεκτρονικά πολύ υψηλής ταχύτητας.

Η απόσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

όπου d είναι η απόσταση, c είναι η ταχύτητα του φωτός και t είναι ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής του παλμού. Ο παράγοντας 2 υπάρχει επειδή το φως διανύει δύο φορές την απόσταση: μία από τον αισθητήρα προς το αντικείμενο και μία από το αντικείμενο πίσω στον αισθητήρα.

Η μέθοδος ToF είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μεσαίες και μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιείται σε laser rangefinders, LiDAR, ρομποτικά συστήματα, οχήματα, γεωδαιτικές εφαρμογές και συστήματα χαρτογράφησης. Το βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να μετρήσει απευθείας την απόσταση με βάση τον χρόνο διάδοσης. Ωστόσο, για μικρές αποστάσεις η απαιτούμενη χρονική ανάλυση γίνεται εξαιρετικά απαιτητική. Για παράδειγμα, μεταβολή απόστασης μερικών χιλιοστών ή μικρομέτρων αντιστοιχεί σε εξαιρετικά μικρές χρονικές διαφορές, οι οποίες είναι δύσκολο να μετρηθούν με απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Από ηλεκτρονική άποψη, ένα ToF σύστημα απαιτεί παλμική πηγή laser, γρήγορο φωτοανιχνευτή, ενισχυτή υψηλού bandwidth, κύκλωμα χρονισμού και ψηφιακή μονάδα υπολογισμού. Σε πιο εξελιγμένα συστήματα χρησιμοποιούνται time-to-digital converters, avalanche photodiodes ή single-photon avalanche diodes, ώστε να επιτευχθεί υψηλή χρονική ανάλυση. Η ακρίβεια επηρεάζεται από την ισχύ του laser, την ανακλαστικότητα του αντικειμένου, το επίπεδο θορύβου, τον περιβαλλοντικό φωτισμό και την ποιότητα της χρονικής μέτρησης [33].

4.3 Μέτρηση διαφοράς φάσης

Η μέτρηση διαφοράς φάσης αποτελεί μία εναλλακτική τεχνική μέτρησης απόστασης με laser. Σε αυτήν την περίπτωση, η δέσμη laser δεν εκπέμπεται απλώς ως παλμός, αλλά διαμορφώνεται περιοδικά, συνήθως κατά πλάτος, με γνωστή συχνότητα. Το σήμα ανακλάται από το αντικείμενο και επιστρέφει στον δέκτη. Λόγω της διαδρομής που έχει διανύσει, το επιστρεφόμενο σήμα παρουσιάζει διαφορά φάσης σε σχέση με το εκπεμπόμενο. Αυτή η διαφορά φάσης σχετίζεται με την απόσταση.

Σε απλοποιημένη μορφή, η απόσταση μπορεί να συσχετιστεί με τη φάση ως εξής:

$$d = \frac{c \cdot \Delta\phi}{4\pi f}$$

όπου d είναι η απόσταση, c η ταχύτητα του φωτός, $\Delta\phi$ διαφορά φάσης και f η συχνότητα διαμόρφωσης. Η σχέση αυτή δείχνει ότι η ακρίβεια εξαρτάται από το πόσο καλά μπορεί το σύστημα να μετρήσει τη φάση.

Η μέθοδος διαφοράς φάσης είναι κατάλληλη για αποστάσεις όπου η άμεση μέτρηση χρόνου είναι δύσκολη, αλλά η μέτρηση φάσης μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια. Χρησιμοποιείται σε ορισμένους laser distance sensors, σε συστήματα με συνεχή διαμορφωμένη δέσμη και σε εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή και σχετικά ακριβής μέτρηση.

Από ηλεκτρονική σκοπιά, η τεχνική αυτή απαιτεί κύκλωμα διαμόρφωσης της πηγής laser, φωτοανιχνευτή, κύκλωμα σύγκρισης φάσης, φίλτρα και ψηφιακή επεξεργασία. Το σύστημα πρέπει να είναι σταθερό ως προς τη συχνότητα και να έχει χαμηλό θόρυβο φάσης. Ένας περιορισμός της μεθόδου είναι η πιθανή αμφισημία φάσης, επειδή η φάση επαναλαμβάνεται κάθε 2π . Για τον λόγο αυτό, σε πρακτικά συστήματα μπορεί να χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία συχνότητες διαμόρφωσης ή κατάλληλες τεχνικές αποσαφήνισης της απόστασης [32].

4.4 Laser triangulation

Η laser triangulation είναι μία από τις σημαντικότερες τεχνικές μέτρησης μικρών και μεσαίων αποστάσεων με laser. Σε αντίθεση με τη μέτρηση χρόνου πτήσης, δεν βασίζεται στον χρόνο που χρειάζεται το φως για να επιστρέψει, αλλά στη γεωμετρία του συστήματος. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε laser displacement sensors, επειδή μπορεί να προσφέρει υψηλή ακρίβεια σε μικρές περιοχές μέτρησης.

Στη βασική διάταξη, μία δέσμη laser προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου. Το σημείο πρόσπτωσης ανακλά ή διαχέει φως, το οποίο συλλέγεται από φακό και προβάλλεται σε έναν φωτοανιχνευτή ή αισθητήρα εικόνας. Ο ανιχνευτής μπορεί να είναι PSD, CCD ή CMOS. Όταν το αντικείμενο μετακινείται, αλλάζει η θέση του φωτεινού σημείου στον ανιχνευτή. Η αλλαγή αυτή συσχετίζεται με τη μεταβολή της απόστασης [34].

Με απλά λόγια, το laser δημιουργεί ένα φωτεινό σημείο πάνω στο αντικείμενο και το οπτικό σύστημα παρατηρεί αυτό το σημείο από διαφορετική γωνία. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται πιο κοντά ή πιο μακριά, το σημείο φαίνεται σε διαφορετική θέση πάνω στον αισθητήρα. Έτσι, το σύστημα μετατρέπει μία μεταβολή απόστασης σε μεταβολή θέσης πάνω σε έναν ανιχνευτή.

Η laser triangulation είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μέτρηση πάχους, ύψους, προφίλ, παραμορφώσεων, ταλαντώσεων και θέσης. Στα βιομηχανικά συστήματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο ποιότητας, μέτρηση επιφανειών, αυτοματισμούς και συστήματα παραγωγής. Σε σχέση με το ToF, η laser triangulation είναι πιο κατάλληλη για μικρές αποστάσεις και υψηλότερη ακρίβεια. Το μειονέκτημά της είναι ότι επηρεάζεται από τις οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας, όπως η ανακλαστικότητα, το χρώμα, η τραχύτητα και η κλίση [35-39].

4.5 Φωτοανιχνευτές και αισθητήρες εικόνας

Η επιλογή του ανιχνευτή είναι κρίσιμη σε ένα laser σύστημα μέτρησης. Ανάλογα με την τεχνική, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φωτοδίοδοι, avalanche photodiodes, PSD, CCD ή CMOS αισθητήρες.

Οι φωτοδίοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως όταν ενδιαφέρει η ένταση ή ο χρόνος άφιξης του φωτός. Είναι κατάλληλες για ToF και phase-based συστήματα, επειδή μπορούν να έχουν γρήγορη απόκριση. Οι avalanche photodiodes έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου το επιστρεφόμενο φως είναι ασθενές. Σε πιο απαιτητικά ToF συστήματα χρησιμοποιούνται και SPAD αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύσουν πολύ χαμηλά επίπεδα φωτός.

Οι PSD, CCD και CMOS αισθητήρες χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα laser triangulation. Εκεί δεν ενδιαφέρει μόνο το αν επιστρέφει φως, αλλά και το πού ακριβώς προβάλλεται το φωτεινό σημείο. Ο PSD δίνει αναλογική πληροφορία θέσης, ενώ οι CCD/CMOS αισθητήρες παρέχουν εικόνα ή γραμμική κατανομή έντασης. Με επεξεργασία του σήματος μπορεί να υπολογιστεί το κέντρο του φωτεινού σημείου και στη συνέχεια η απόσταση.

Στα σύγχρονα συστήματα, οι CMOS αισθητήρες έχουν σημαντικό ρόλο, επειδή επιτρέπουν ψηφιακή ανάγνωση, υψηλή ταχύτητα και ενσωμάτωση με επεξεργαστές ή μικροελεγκτές. Ωστόσο,

η ακρίβεια εξαρτάται από το μέγεθος pixel, τον θόρυβο, το δυναμικό εύρος και τον αλγόριθμο εντοπισμού του spot.

4.6 Ηλεκτρονικό σύστημα λήψης και επεξεργασίας

Το ηλεκτρονικό σύστημα ενός laser αισθητήρα έχει καθοριστική σημασία για την τελική ποιότητα της μέτρησης. Η επιστρεφόμενη ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από τον φωτοανιχνευτή. Το σήμα αυτό είναι συχνά ασθενές και μπορεί να περιέχει θόρυβο από το περιβάλλον, από τον ίδιο τον ανιχνευτή, από την πηγή τροφοδοσίας και από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται κατάλληλη αναλογική προσαρμογή.

Σε ένα απλό σύστημα φωτοδιόδου, το ρεύμα της φωτοδιόδου μετατρέπεται σε τάση μέσω ενός transimpedance amplifier. Στη συνέχεια, μπορεί να ακολουθήσει φιλτράρισμα, ενίσχυση και ψηφιοποίηση. Σε phase-based συστήματα, απαιτείται επίσης αποδιαμόρφωση και σύγκριση φάσης. Σε ToF συστήματα, η ακρίβεια εξαρτάται από την ικανότητα του ηλεκτρονικού κυκλώματος να εντοπίσει με ακρίβεια τη χρονική στιγμή επιστροφής του παλμού. Σε συστήματα triangulation, η ηλεκτρονική ανάγνωση πρέπει να προσδιορίσει με ακρίβεια τη θέση του φωτεινού σημείου στον ανιχνευτή.

Η αναλογικοψηφιακή μετατροπή πρέπει να έχει επαρκή ανάλυση και ταχύτητα. Αν το ADC έχει χαμηλή ανάλυση, μπορεί να χαθούν μικρές μεταβολές του σήματος. Αν έχει χαμηλή ταχύτητα, μπορεί να μην καταγραφούν δυναμικές μεταβολές. Επίσης, η σταθερότητα της τροφοδοσίας, η σωστή γείωση και η θωράκιση είναι σημαντικές, ειδικά όταν η μέτρηση απαιτεί υψηλή ακρίβεια.

4.7 Παράγοντες σφάλματος

Η μέτρηση απόστασης με laser επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Οι σημαντικότεροι είναι:

Πίνακας 5. Παράγοντες σφάλματος

Παράγοντας	Επίδραση στη μέτρηση
Ανακλαστικότητα στόχου	Επηρεάζει την ποσότητα επιστρεφόμενου φωτός
Χρώμα επιφάνειας	Σκούρες επιφάνειες επιστρέφουν λιγότερο φως
Τραχύτητα	Προκαλεί διάχυση και μεταβολή του spot
Κλίση επιφάνειας	Μπορεί να απομακρύνει την ανάκλαση από τον δέκτη
Περιβαλλοντικός φωτισμός	Εισάγει θόρυβο στον ανιχνευτή

Παράγοντας	Επίδραση στη μέτρηση
Θερμοκρασία	Επηρεάζει laser, φακούς και ηλεκτρονικά
Μηχανικές ταλαντώσεις	Προκαλούν μεταβολές θέσης αισθητήρα/στόχου
Θόρυβος ηλεκτρονικών	Μειώνει την ανάλυση
Κακή βαθμονόμηση	Δημιουργεί συστηματικό σφάλμα
Μη γραμμικότητα	Επηρεάζει τη μετατροπή σήματος σε απόσταση

Στα laser συστήματα, η επιφάνεια του αντικειμένου παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο. Μια γυαλιστερή επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει έντονη κατοπτρική ανάκλαση, ενώ μια τραχιά επιφάνεια διαχέει το φως. Μια πολύ σκοτεινή επιφάνεια μπορεί να επιστρέφει μικρό σήμα, ενώ μια πολύ φωτεινή ή μεταλλική επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει κορεσμό στον ανιχνευτή. Επομένως, σε πρακτικές εφαρμογές απαιτείται σωστή επιλογή μήκους κύματος, ισχύος laser, φίλτρων και αλγορίθμου επεξεργασίας.

4.8 Εφαρμογές laser μέτρησης απόστασης

Οι laser αισθητήρες απόστασης χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές όπως Βιομηχανία, Ρομποτική Αυτοκινητοβιομηχανία, Γεωδαισία, Ποιοτικός έλεγχος, Μικρομηχανική, Έρευνα, Ιατρική/βιοτεχνολογία. Η επιλογή της τεχνικής laser εξαρτάται από την εφαρμογή. Για μεγάλες αποστάσεις, το ToF είναι πιο συνηθισμένο. Για μεσαίες αποστάσεις και μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέτρηση φάσης. Για μικρές αποστάσεις και υψηλή ακρίβεια, η laser triangulation είναι συχνά η πιο πρακτική λύση. Για εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια σε μικρομετρική ή νανομετρική κλίμακα, χρησιμοποιείται συμβολομετρία, η οποία θα αναλυθεί περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο.

Η μέτρηση απόστασης με laser είναι μία ισχυρή τεχνολογία μη επαφικής μέτρησης, η οποία καλύπτει μεγάλο εύρος εφαρμογών και αποστάσεων. Οι βασικές τεχνικές είναι η μέτρηση χρόνου πτήσης, η μέτρηση διαφοράς φάσης και η laser triangulation. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές. Το ToF είναι κατάλληλο για μεγαλύτερες αποστάσεις, η μέτρηση φάσης για ακριβείς μετρήσεις σε μεσαίες αποστάσεις και η laser triangulation για μικρές αποστάσεις και υψηλή ακρίβεια.

Από την πλευρά των αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων, η μέτρηση με laser απαιτεί σωστή επιλογή πηγής laser, οπτικού συστήματος, φωτοανιχνευτή, αναλογικών ηλεκτρονικών, ψηφιακής επεξεργασίας και βαθμονόμησης. Η τελική ακρίβεια δεν εξαρτάται μόνο από τη φυσική αρχή μέτρησης, αλλά από το σύνολο της διάταξης. Για αυτόν τον λόγο, τα laser συστήματα

μέτρησης απόστασης αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα ολοκληρωμένου μετρητικού συστήματος, όπου συνδυάζονται οπτική, ηλεκτρονική, επεξεργασία σήματος και αλγόριθμοι υπολογισμού.

Κεφάλαιο 5ο: Μέτρηση Μικροαποστάσεων με RF ή Παρόμοιες Τεχνικές

Η μέτρηση μικροαποστάσεων με RF, μικροκυματικές ή παρόμοιες ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές αποτελεί ένα πιο εξειδικευμένο πεδίο σε σχέση με τις οπτικές και laser μεθόδους που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Οι τεχνικές αυτές δεν βασίζονται στην οπτική απεικόνιση ή στην ανάκλαση φωτός, αλλά στην αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με το αντικείμενο μέτρησης. Η απόσταση ή η μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί από μεταβολές στη φάση, στη συχνότητα, στο πλάτος, στη σύνθετη αντίσταση ή στη συχνότητα συντονισμού ενός κυκλώματος.

Σε γενικές γραμμές, οι RF και microwave τεχνικές δεν αποτελούν την πιο συνηθισμένη επιλογή για μικρομετρική μέτρηση σε εργαστηριακά ή οπτικά συστήματα, επειδή το μήκος κύματος των ραδιοσυχνοτήτων είναι πολύ μεγαλύτερο από το μικρόμετρο. Παρ' όλα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές εφαρμογές όπου η οπτική πρόσβαση είναι δύσκολη, όπου το περιβάλλον περιέχει σκόνη, υγρασία, καπνό ή ακαθαρσίες, ή όπου απαιτείται ηλεκτρομαγνητική, ασύρματη ή μη οπτική μέτρηση. Επίσης, σε μικροκυματικές και χιλιοστομετρικές συχνότητες, όπως στα 60 GHz ή 77–81 GHz, η ανάλυση μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά, ειδικά όταν αξιοποιείται η φάση του σήματος [40].

5.1 Βασική αρχή RF μέτρησης μετατόπισης

Η RF μέτρηση απόστασης βασίζεται στην εκπομπή ή δημιουργία ηλεκτρομαγνητικού σήματος και στην ανάλυση της αλληλεπίδρασής του με τον στόχο. Η μετατόπιση ενός αντικειμένου μπορεί να επηρεάσει διαφορετικά χαρακτηριστικά του σήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να αλλάξει η φάση του ανακλώμενου κύματος, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, η συχνότητα συντονισμού ενός κυκλώματος ή η σύζευξη μεταξύ δύο στοιχείων.

Στην πιο γενική περίπτωση, όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ανακλάται από έναν στόχο, η μεταβολή της απόστασης προκαλεί μεταβολή της φάσης του ανακλώμενου σήματος. Η φάση σχετίζεται με το μήκος διαδρομής του κύματος. Επομένως, μικρές μετατοπίσεις μπορούν να ανιχνευθούν ως μικρές μεταβολές φάσης. Η βασική σχέση που δείχνει τη σύνδεση φάσης και μετατόπισης είναι:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta d}{\lambda}$$

όπου $\Delta\phi$ είναι η μεταβολή φάσης, Δd είναι η μετατόπιση του αντικειμένου και λείναι το μήκος κύματος. Ο παράγοντας 4π εμφανίζεται επειδή το κύμα διανύει τη διαδρομή προς τον στόχο και επιστρέφει πίσω στον δέκτη.

Η σχέση αυτή δείχνει ότι όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη μεταβολή φάσης προκαλείται για την ίδια μετατόπιση. Για αυτόν τον λόγο, οι χιλιοστομετρικές συχνότητες, όπως τα 60 GHz ή 77 GHz, είναι πιο κατάλληλες για ακριβείς μετρήσεις μετατόπισης σε σχέση με χαμηλότερες RF συχνότητες.

5.2 FMCW radar για μέτρηση μετατόπισης

Μία σημαντική RF τεχνική είναι το FMCW radar, δηλαδή *Frequency-Modulated Continuous-Wave radar*. Σε αυτήν την τεχνική, το σύστημα εκπέμπει συνεχές σήμα του οποίου η συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά στον χρόνο. Το ανακλώμενο σήμα από τον στόχο συγκρίνεται με το εκπεμπόμενο και από τη διαφορά συχνότητας μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση.

Σε εφαρμογές μικρομετρικής ή πολύ μικρής μετατόπισης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει όχι μόνο η συχνότητα beat, αλλά και η φάση του ενδιάμεσου σήματος. Με κατάλληλη επεξεργασία της φάσης σε διαδοχικές μετρήσεις, μπορεί να εκτιμηθεί η μικρή μετακίνηση ενός στόχου. Πρόσφατες μελέτες με millimeter-wave FMCW radar δείχνουν ότι η ακρίβεια της μετατόπισης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ακριβή εξαγωγή της φάσης του ενδιάμεσου σήματος σε διαδοχικά chirps [41].

Ένα FMCW radar σύστημα περιλαμβάνει συνήθως ταλαντωτή ή PLL, RF πομπό, κεραία εκπομπής, κεραία λήψης, μίκτη, ενισχυτές, φίλτρα, ADC και ψηφιακή επεξεργασία. Από πλευράς ηλεκτρονικών, είναι πιο σύνθετο από έναν απλό αισθητήρα laser ή χωρητικό αισθητήρα, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να λειτουργήσει χωρίς οπτική επαφή και σε δυσμενέστερα περιβάλλοντα.

Τα πλεονεκτήματα του FMCW radar είναι η μη επαφική λειτουργία, η δυνατότητα μέτρησης σε περιβάλλοντα με σκόνη ή καπνό, η δυνατότητα μέτρησης ταχύτητας και η ενσωμάτωση σε ολοκληρωμένα millimeter-wave transceivers. Τα μειονεκτήματα είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα, η πιθανή αμφισημία φάσης, οι πολλαπλές ανακλάσεις και η ανάγκη για προσεκτική επεξεργασία σήματος.

5.3 RF και μικροκυματικοί συντονιστικοί αισθητήρες

Μία άλλη προσέγγιση για μικρομετρική μέτρηση είναι η χρήση συντονιστικών RF ή microwave διατάξεων. Σε αυτές τις τεχνικές, το αντικείμενο που μετακινείται επηρεάζει τη συχνότητα συντονισμού, το πλάτος ή τη φάση ενός κυκλώματος. Για παράδειγμα, ένα μεταλλικό ή διηλεκτρικό αντικείμενο που πλησιάζει έναν μικροκυματικό συντονιστή μπορεί να αλλάξει την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη και επομένως τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος.

Τέτοιες διατάξεις μπορούν να βασίζονται σε LC ταλαντωτές, μικροκυματικές κοιλότητες, split-ring resonators, coplanar waveguides ή άλλες planar microwave δομές. Η μετατόπιση δεν υπολογίζεται από τον χρόνο πτήσης, αλλά από τη μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του συντονιστή. Για παράδειγμα, έχουν προταθεί microwave inductive proximity sensors που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες και επιδιώκουν υψηλή ανάλυση σε μετρήσεις εγγύτητας [42]. Επίσης, έχουν παρουσιαστεί passive metamaterial-based αισθητήρες που επιτρέπουν ασύρματη παρακολούθηση υπομικρομετρικών μετατοπίσεων μέσω μεταβολής των τοπικών συχνοτικών κορυφών συντονισμού [43].

Η βασική ιδέα των συντονιστικών RF αισθητήρων είναι πολύ ενδιαφέρουσα από πλευράς ηλεκτρονικών. Το αισθητήριο δεν είναι απαραίτητα ένας κλασικός αισθητήρας απόστασης, αλλά ένα ηλεκτρομαγνητικό κύκλωμα του οποίου η απόκριση αλλάζει όταν μεταβάλλεται η γεωμετρία ή το περιβάλλον του. Έτσι, η μικρομετατόπιση μετατρέπεται σε μεταβολή συχνότητας, πλάτους ή φάσης, η οποία μπορεί να μετρηθεί από ηλεκτρονικό κύκλωμα ή από vector network analyzer σε εργαστηριακές συνθήκες.

5.4 Παρόμοιες τεχνικές: επαγωγικές και χωρητικές RF προσεγγίσεις

Οι RF τεχνικές συνδέονται συχνά με επαγωγικές και χωρητικές αρχές μέτρησης. Σε μικρές αποστάσεις, η μέτρηση μπορεί να βασιστεί στο κοντινό πεδίο, δηλαδή όχι στη διάδοση κύματος σε μεγάλη απόσταση, αλλά στη σύζευξη ανάμεσα σε ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Σε αυτή την περίπτωση, η μετατόπιση του αντικειμένου αλλάζει τη χωρητικότητα, την αυτεπαγωγή ή την αμοιβαία σύζευξη.

Οι χωρητικές τεχνικές είναι πιο συνηθισμένες για μικρομετρικές αποστάσεις, επειδή η χωρητικότητα είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων. Οι επαγωγικές και eddy-current τεχνικές είναι κατάλληλες κυρίως για μεταλλικά αντικείμενα. Όταν οι τεχνικές αυτές λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες ή όταν αξιοποιούν μικροκυματικές δομές, μπορούν να θεωρηθούν συγγενείς με RF/microwave sensing.

Η διαφορά είναι ότι στις καθαρά RF τεχνικές ενδιαφέρει συχνά η ηλεκτρομαγνητική διάδοση, η ανάκλαση και η φάση, ενώ στις χωρητικές/επαγωγικές τεχνικές ενδιαφέρει κυρίως η τοπική σύζευξη. Και οι δύο κατηγορίες όμως μετατρέπουν μια μετατόπιση σε ηλεκτρική μεταβολή, η οποία πρέπει να μετρηθεί με κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

5.5 Ηλεκτρονικά κυκλώματα και επεξεργασία σήματος

Ένα RF σύστημα μικρομέτρησης μπορεί να περιλαμβάνει αρκετά ηλεκτρονικά στάδια. Αν πρόκειται για radar-based σύστημα, απαιτούνται RF ταλαντωτές, PLL, μίκτες, κεραίες, φίλτρα, ενισχυτές χαμηλού θορύβου, ADC και ψηφιακή επεξεργασία. Αν πρόκειται για συντονιστικό αισθητήρα, απαιτείται κύκλωμα διέγερσης, μέτρηση συχνότητας ή φάσης και συχνά ανίχνευση της μεταβολής του συντονισμού.

Η επεξεργασία σήματος έχει κρίσιμο ρόλο. Σε phase-based μετρήσεις πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια η φάση και να αντιμετωπίζεται η αμφισημία όταν η μετατόπιση ξεπερνά ένα μέρος του μήκους κύματος. Σε FMCW radar απαιτείται επεξεργασία των chirps, εξαγωγή beat frequency, φασματική ανάλυση και συχνά παρακολούθηση φάσης σε διαδοχικές μετρήσεις. Σε συντονιστικούς αισθητήρες απαιτείται εντοπισμός μετατόπισης συχνότητας ή μεταβολής πλάτους.

Από πλευράς μικροελεγκτή ή υπολογιστικού συστήματος, οι RF τεχνικές είναι συνήθως πιο απαιτητικές από έναν απλό αισθητήρα. Ωστόσο, η ύπαρξη έτοιμων ολοκληρωμένων mmWave radar transceivers έχει κάνει αυτές τις τεχνικές πιο προσιτές σε ερευνητικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

5.6 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Οι RF και microwave τεχνικές παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς.

Πίνακας 6. RF και microwave τεχνικές - πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Μη επαφική μέτρηση	Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα ηλεκτρονικών
Λειτουργία χωρίς οπτική πρόσβαση	Μικρότερη χωρική ανάλυση σε σχέση με laser σε πολλές εφαρμογές
Αντοχή σε σκόνη, καπνό ή μη οπτικά εμπόδια	Ευαισθησία σε πολλαπλές ανακλάσεις
Δυνατότητα ασύρματης ή απομακρυσμένης μέτρησης	Αμφισημία φάσης

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Κατάλληλες για μεταλλικούς ή ειδικούς στόχους	Απαιτούν προσεκτική βαθμονόμηση
Δυνατότητα χρήσης ολοκληρωμένων radar chipsets	Δυσκολία σε πολύ μικρά αντικείμενα χωρίς ειδική διάταξη

Συγκριτικά με τις laser τεχνικές, οι RF μέθοδοι συνήθως δεν προσφέρουν την ίδια ευκολία επίτευξης μικρομετρικής ακρίβειας σε απλές διατάξεις. Ωστόσο, είναι χρήσιμες όταν το περιβάλλον δεν επιτρέπει οπτική μέτρηση ή όταν χρειάζεται ειδική ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση με τον στόχο. Επίσης, οι συντονιστικές RF διατάξεις μπορούν να πετύχουν πολύ υψηλή ευαισθησία σε μικρές μεταβολές γεωμετρίας, ειδικά όταν σχεδιαστούν ειδικά για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η μέτρηση μικροαποστάσεων με RF ή παρόμοιες τεχνικές αποτελεί ένα λιγότερο συνηθισμένο αλλά τεχνολογικά ενδιαφέρον πεδίο. Οι βασικές προσεγγίσεις είναι η phase-based μέτρηση, το FMCW radar, οι RF/microwave συντονιστικοί αισθητήρες και οι συγγενείς χωρητικές ή επαγωγικές τεχνικές κοντινού πεδίου. Σε αυτές τις μεθόδους, η μικρομετατόπιση μετατρέπεται σε μεταβολή φάσης, συχνότητας, πλάτους, εμπεδήσης ή συντονισμού.

Από την πλευρά των αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων, οι RF τεχνικές έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή συνδυάζουν ηλεκτρομαγνητική θεωρία, RF κυκλώματα, κεραίες, μίκτες, ταλαντωτές, φίλτρα και ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Αν και οι laser και οπτικές τεχνικές είναι συχνά πιο κατάλληλες για άμεση μικρομετρική μέτρηση, οι RF τεχνικές μπορούν να είναι χρήσιμες σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται μη οπτική, ανθεκτική ή ασύρματη μέτρηση.

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία, οι RF τεχνικές παρουσιάζονται ως εναλλακτική προσέγγιση και ως τεχνολογικό πεδίο σύγκρισης με τις laser, χωρητικές και camera-based μεθόδους. Το επόμενο και πιο κεντρικό κεφάλαιο εστιάζει στη μέτρηση μικροαποστάσεων με κάμερα ή μικροσκόπιο και κάμερα, επειδή αυτή η προσέγγιση συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη αλγορίθμου σε Python για ανάλυση εικόνας.

Κεφάλαιο 6ο: Μέτρηση Μικροαπόστασης με Κάμερα ή Μικροσκόπιο και Κάμερα

Η μέτρηση μικροαπόστασης με κάμερα ή με μικροσκόπιο και κάμερα αποτελεί μία από τις πιο ευέλικτες και πρακτικές μεθόδους για εφαρμογές όπου απαιτείται μη επαφική παρακολούθηση μικρών αντικειμένων, μικρομετατοπίσεων ή γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Σε αντίθεση με έναν σημειακό αισθητήρα, όπως ένας laser displacement sensor ή ένας χωρητικός αισθητήρας, η κάμερα παρέχει ολόκληρη εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη παρακολούθηση πολλών σημείων, την ανάλυση σχήματος, την αναγνώριση ακμών και τον υπολογισμό αποστάσεων σε δύο διαστάσεις.

Η μέθοδος αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία, επειδή συνδυάζει τρεις βασικούς άξονες: την οπτική διάταξη, το ηλεκτρονικό σύστημα λήψης εικόνας και τον αλγόριθμο επεξεργασίας. Το μικροσκόπιο προσφέρει την απαραίτητη μεγέθυνση, η κάμερα μετατρέπει την οπτική πληροφορία σε ψηφιακή εικόνα και ο αλγόριθμος υπολογίζει τη μικροαπόσταση με βάση τη γεωμετρία της εικόνας. Στη βιβλιογραφία της μηχανικής όρασης, η μέτρηση μετατόπισης οργανώνεται συνήθως σε στάδια βαθμονόμησης κάμερας, παρακολούθησης στόχου και υπολογισμού μετατόπισης [44]. Αντίστοιχα, εργαστηριακές διατάξεις για IPMC ενεργοποιητές έχουν αξιοποιήσει κάμερα και λογισμικό ανάλυσης εικόνας για την εκτίμηση μικρών μετατοπίσεων [48].

6.1 Βασική αρχή μέτρησης με κάμερα

Η βασική αρχή της μέτρησης με κάμερα είναι ότι η πραγματική απόσταση μεταξύ δύο σημείων μπορεί να υπολογιστεί από την αντίστοιχη απόσταση των σημείων στην εικόνα. Η εικόνα αποτελείται από pixels. Αν είναι γνωστό πόσα μικρόμετρα αντιστοιχούν σε κάθε pixel, τότε η απόσταση σε pixels μπορεί να μετατραπεί σε πραγματική απόσταση.

Η απλούστερη σχέση είναι:

$$d_{\mu m} = d_{px} \cdot S$$

όπου $d_{\mu m}$ είναι η πραγματική απόσταση σε μικρόμετρα, d_{px} είναι η απόσταση σε pixels και S είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης σε $\mu m/pixel$.

Για παράδειγμα, αν δύο σημεία απέχουν 200 pixels και η βαθμονόμηση δείχνει ότι κάθε pixel αντιστοιχεί σε 0.5 μm , τότε η πραγματική απόσταση είναι:

$$d = 200 \cdot 0.5 = 100 \mu m$$

Στην πράξη, η μέτρηση αυτή απαιτεί προσοχή. Ο συντελεστής $\mu m/pixel$ πρέπει να υπολογιστεί με γνωστό πρότυπο βαθμονόμησης, όπως μικρομετρική κλίμακα. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η παραμόρφωση φακού, η εστίαση, η γωνία θέασης, ο φωτισμός και η ποιότητα του αισθητήρα εικόνας.

6.2 Διάταξη μικροσκοπίου και κάμερας

Μία τυπική διάταξη μέτρησης μικροαπόστασης με μικροσκόπιο και κάμερα περιλαμβάνει:

Πίνακας 7. Τυπική διάταξη μέτρησης μικροαπόστασης με μικροσκόπιο και κάμερα

Τμήμα διάταξης	Ρόλος
Μικροσκόπιο ή οπτικό σύστημα μεγέθυνσης	Μεγεθύνει την περιοχή ενδιαφέροντος
Φακός / αντικειμενικός φακός	Καθορίζει μεγέθυνση, ευκρίνεια και βάθος πεδίου
Ψηφιακή κάμερα	Μετατρέπει την οπτική εικόνα σε ψηφιακά δεδομένα
Φωτισμός LED	Δημιουργεί σταθερή αντίθεση
Μηχανική βάση	Διατηρεί σταθερή τη θέση κάμερας και δείγματος
Υπολογιστής ή μικροϋπολογιστής	Εκτελεί τη λήψη και την επεξεργασία εικόνας
Λογισμικό / αλγόριθμος	Εντοπίζει σημεία και υπολογίζει αποστάσεις

Η ποιότητα της διάταξης επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της μέτρησης. Ο φακός καθορίζει πόσο καθαρά προβάλλεται το αντικείμενο στον αισθητήρα. Η κάμερα καθορίζει την ανάλυση, τον θόρυβο και τον ρυθμό λήψης. Ο φωτισμός καθορίζει την αντίθεση μεταξύ αντικειμένου και φόντου. Η μηχανική βάση καθορίζει τη σταθερότητα του συστήματος. Αν ένα από αυτά τα στοιχεία δεν είναι σωστά επιλεγμένο ή σταθερό, η μέτρηση μπορεί να παρουσιάσει σημαντικό σφάλμα. Παρόμοια λογική συναντάται σε μεθοδολογίες vision-based displacement measurement, όπου η μέτρηση οργανώνεται γύρω από τη βαθμονόμηση της κάμερας, την παρακολούθηση στόχου και τον υπολογισμό της μετατόπισης [44]. Επιπλέον, εργασίες μη επαφικής μέτρησης μετατόπισης

έχουν αξιοποιήσει τεχνικές sub-pixel edge detection για πιο ακριβή εντοπισμό ακμών σε εικόνες [45].

6.3 Βαθμονόμηση εικόνας

Η βαθμονόμηση είναι το σημαντικότερο βήμα για να μετατραπεί η μέτρηση από pixels σε πραγματικές μονάδες μήκους. Χωρίς βαθμονόμηση, η εικόνα δίνει μόνο σχετική πληροφορία. Με τη βαθμονόμηση, κάθε pixel αντιστοιχίζεται σε συγκεκριμένη φυσική απόσταση.

Η διαδικασία μπορεί να γίνει ως εξής:

1. Τοποθετείται κάτω από το μικροσκόπιο ένα γνωστό πρότυπο, όπως μικρομετρική κλίμακα.
2. Λαμβάνεται εικόνα της κλίμακας.
3. Επιλέγονται δύο σημεία γνωστής πραγματικής απόστασης.
4. Υπολογίζεται η απόσταση των σημείων σε pixels.
5. Υπολογίζεται ο συντελεστής $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

Αν η πραγματική απόσταση μεταξύ δύο σημείων του προτύπου είναι $D_{\mu\text{m}}$ και η απόσταση στην εικόνα είναι D_{px} , τότε:

$$S = \frac{D_{\mu\text{m}}}{D_{\text{px}}}$$

όπου S είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης.

Η βαθμονόμηση πρέπει να γίνεται για τη συγκεκριμένη μεγέθυνση, τη συγκεκριμένη κάμερα και τη συγκεκριμένη απόσταση εργασίας. Αν αλλάξει ο φακός, η μεγέθυνση, η θέση της κάμερας ή η ανάλυση λήψης, πρέπει να γίνει νέα βαθμονόμηση. Σε μετρήσεις μικρομετρικής ακρίβειας είναι καλό να ελέγχεται και η παραμόρφωση του φακού, επειδή η αντιστοιχία $\mu\text{m}/\text{pixel}$ μπορεί να μην είναι ακριβώς ίδια στο κέντρο και στα άκρα της εικόνας.

6.4 Εντοπισμός σημείων, ακμών και αντικειμένων

Μετά τη βαθμονόμηση, το επόμενο βήμα είναι ο εντοπισμός των σημείων ή των ακμών από τις οποίες θα υπολογιστεί η απόσταση. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αλγόριθμος μπορεί να εντοπίζει:

Στοιχείο προς εντοπισμό	Παράδειγμα μέτρησης
Δύο σημεία	Απόσταση μεταξύ δύο μικροδομών
Ακμές αντικειμένου	Πλάτος, διάμετρος ή μετατόπιση
Κέντρο αντικειμένου	Θέση σωματιδίου ή μικροαντικειμένου
Ελεύθερο άκρο	Μετατόπιση εύκαμπτου ενεργοποιητή
Περιοχή ενδιαφέροντος	Παρακολούθηση μεταβολής σε συγκεκριμένο τμήμα
Γραμμή/ίχνος	Μέτρηση καμπύλωσης ή τροχιάς

Οι κλασικές μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας περιλαμβάνουν μετατροπή σε grayscale, φιλτράρισμα θορύβου, thresholding, edge detection και contour detection. Για παράδειγμα, αν το αντικείμενο είναι σκοτεινό και το φόντο φωτεινό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί thresholding για να διαχωριστεί το αντικείμενο από το φόντο. Αν ενδιαφέρει η ακριβής θέση μιας ακμής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν Sobel, Canny ή άλλοι αλγόριθμοι ανίχνευσης ακμών.

Σε εργασίες μη επαφικής μέτρησης μετατόπισης με κάμερα έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον ακριβή εντοπισμό ακμών και σημείων αναφοράς. Ενδεικτικά, οι Bai et al. παρουσιάζουν σύστημα μέτρησης μετατόπισης με sub-pixel Zernike edge detection, ενώ οι Tang et al. συγκρίνουν μεθόδους edge detection και Digital Image Correlation ως προς την ακρίβεια και την ταχύτητα υπολογισμού [45], [46].

6.5 Περιοχή ενδιαφέροντος και μείωση υπολογιστικού κόστους

Σε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου, δεν είναι πάντα αποδοτικό να γίνεται αναζήτηση σε ολόκληρη την εικόνα. Αν το αντικείμενο κινείται σε σχετικά προβλέψιμη περιοχή, μπορεί να οριστεί μία περιοχή ενδιαφέροντος ή *Region of Interest* (ROI). Η χρήση ROI μειώνει το πλήθος των pixels που πρέπει να επεξεργαστεί ο αλγόριθμος και επομένως μειώνει τον χρόνο υπολογισμού.

Η λογική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στη δική μας εργασία. Αν γνωρίζουμε περίπου πού βρίσκεται το αντικείμενο ή προς τα πού κινείται, μπορούμε να περιορίσουμε την αναζήτηση σε μία μικρή περιοχή γύρω από την προηγούμενη θέση του. Έτσι, ο αλγόριθμος γίνεται πιο γρήγορος και πιο σταθερός. Η χρήση μικρών περιοχών ενδιαφέροντος μειώνει επίσης την πιθανότητα να εντοπιστούν λανθασμένες ακμές σε άσχετα σημεία της εικόνας.

Αυτή η προσέγγιση συνδέεται άμεσα με τη γενικότερη βιβλιογραφία της οπτικής μέτρησης μετατοπίσεων. Οι Xu et al. παρουσιάζουν τη γενική ροή camera calibration, target tracking και

displacement calculation, ενώ οι Zhuang et al. αναδεικνύουν τη σημασία των vision-based τεχνικών για μη επαφική παρακολούθηση παραμορφώσεων και μετατοπίσεων [44], [47]. Αντίστοιχα, σε εργαστηριακές μελέτες IPMC ενεργοποιητών έχουν χρησιμοποιηθεί κάμερα και λογισμικό ανάλυσης εικόνας για την εκτίμηση της μετατόπισης, στοιχείο που ενισχύει τη σύνδεση της παρούσας εργασίας με πρακτικές διατάξεις μικρομετρήσεων [48].

6.6 Sub-pixel μέτρηση

Σε μικρομετρικές μετρήσεις, η απλή μέτρηση σε ακέραια pixels μπορεί να μην είναι αρκετή. Για παράδειγμα, αν η βαθμονόμηση είναι 1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, τότε η ελάχιστη θεωρητική μεταβολή με απλή pixel-based μέτρηση είναι περίπου 1 μm . Αν όμως θέλουμε καλύτερη ακρίβεια, πρέπει να εκτιμήσουμε τη θέση ενός σημείου ή μιας ακμής με ακρίβεια μικρότερη από ένα pixel. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται sub-pixel localization.

Η sub-pixel μέτρηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν το σύστημα έχει καλή αντίθεση, σταθερό φωτισμό και μικρό θόρυβο. Ωστόσο, δεν πρέπει να θεωρείται μαγική λύση. Αν η εικόνα είναι θολή, αν υπάρχει θόρυβος ή αν η ακμή δεν είναι καλά ορισμένη, η sub-pixel εκτίμηση μπορεί να δώσει ψευδή ακρίβεια. Για αυτό πρέπει πάντα να συνδυάζεται με επαναληπτικές μετρήσεις και υπολογισμό αβεβαιότητας.

6.7 Ηλεκτρονικό σύστημα λήψης εικόνας

Η κάμερα είναι ο βασικός αισθητήρας της διάταξης. Μπορεί να είναι USB camera, industrial camera, CMOS camera ή κάμερα μικροσκοπίου. Από ηλεκτρονική άποψη, η κάμερα είναι ένας αισθητήρας εικόνας με δικό του κύκλωμα ανάγνωσης, χρονισμό, ADC και ψηφιακή έξοδο. Η ποιότητα της μέτρησης εξαρτάται όχι μόνο από τον φακό αλλά και από τη σταθερότητα του αισθητήρα, τον θόρυβο ανάγνωσης και τον τρόπο έκθεσης. Για δυναμικές μετρήσεις είναι σημαντικό να επιλέγεται κατάλληλος χρόνος έκθεσης, ώστε να αποφεύγεται το motion blur.

Ο φωτισμός είναι επίσης κρίσιμος. Σε πολλές διατάξεις μικρομέτρησης χρησιμοποιείται LED backlighting, επειδή δημιουργεί καθαρό περίγραμμα του αντικειμένου. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για edge detection. Αντίθετα, ασταθής ή ανομοιόμορφος φωτισμός μπορεί να δημιουργήσει ψευδείς ακμές και να μειώσει την ακρίβεια.

6.8 Σύνδεση με την παρούσα πτυχιακή εργασία

Η παρούσα εργασία μπορεί να στηριχθεί στη λογική ότι η μικροαπόσταση μετριέται μέσω εικόνας. Η εικόνα παρέχει τη χωρική πληροφορία, ενώ ο αλγόριθμος μετατρέπει αυτή την πληροφορία σε αριθμητική μέτρηση. Σε αντίθεση με έτοιμους εμπορικούς αισθητήρες, η συγκεκριμένη

προσέγγιση επιτρέπει καλύτερη κατανόηση όλων των σταδίων του συστήματος: από την οπτική λήψη μέχρι το τελικό αποτέλεσμα.

Η συμβολή της εργασίας μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: μελετάται και παρουσιάζεται ένα σύστημα μέτρησης μικροαποστάσεων με χρήση κάμερας, όπου η απόσταση υπολογίζεται μέσω βαθμονόμησης εικόνας και αλγοριθμικού εντοπισμού σημείων ή ακμών. Το σύστημα αντιμετωπίζεται ως ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό και υπολογιστικό σύστημα μέτρησης, το οποίο περιλαμβάνει αισθητήρα εικόνας, οπτικό σύστημα, φωτισμό, ψηφιακή λήψη και λογισμικό επεξεργασίας.

Η σύνδεση με τη διεθνή βιβλιογραφία της camera-based και vision-based μέτρησης είναι σημαντική, επειδή δείχνει ότι η χρήση κάμερας και image-based tracking για μικρομετατοπίσεις δεν είναι απλώς μία θεωρητική ιδέα, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές πειραματικές και εργαστηριακές διατάξεις για μη επαφική μέτρηση μετατόπισης, με στόχο τη βαθμονόμηση, την παρακολούθηση θέσης και την υποστήριξη ελέγχου [44]–[48]. Έτσι, το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στη βιβλιογραφική μελέτη και στο πρακτικό μέρος της πτυχιακής, όπου θα αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος Python για μέτρηση μικροαποστάσεων από εικόνες.

Η μέτρηση μικροαπόστασης με κάμερα αποτελεί μία ισχυρή και ευέλικτη προσέγγιση για μη επαφικές μετρήσεις μικρών αντικειμένων και μικρομετατοπίσεων. Η βασική αρχή είναι η μετατροπή της απόστασης σε pixels σε πραγματική απόσταση, μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης. Η μέθοδος απαιτεί σωστή οπτική διάταξη, σταθερό φωτισμό, αξιόπιστη κάμερα, μηχανική σταθερότητα και κατάλληλο αλγόριθμο επεξεργασίας.

Κεφάλαιο 7ο: Αλγόριθμοι και Μεθοδολογίες για Μέτρηση Απόστασης από Εικόνα

Η μέτρηση απόστασης με χρήση κάμερας δεν βασίζεται μόνο στο οπτικό σύστημα αλλά κυρίως στην κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας. Η εικόνα περιέχει τη χωρική πληροφορία, όμως η πληροφορία αυτή πρέπει να μετατραπεί σε αριθμητική μέτρηση. Για να γίνει αυτό, απαιτείται ένας αλγόριθμος που θα εντοπίζει σημεία, ακμές, αντικείμενα ή περιοχές ενδιαφέροντος και θα υπολογίσει την απόστασή τους σε pixels. Στη συνέχεια, με βάση τη βαθμονόμηση του συστήματος, η απόσταση σε pixels μετατρέπεται σε πραγματική απόσταση, για παράδειγμα σε μm , mm ή cm.

Στη μικρομετρική κλίμακα, η επιλογή αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Μία μικρή αστοχία στον εντοπισμό μιας ακμής ή ενός σημείου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα. Για παράδειγμα, αν η βαθμονόμηση του συστήματος είναι $0.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$, τότε ένα σφάλμα δύο pixels αντιστοιχεί σε σφάλμα $1 \mu\text{m}$. Σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, αυτό το σφάλμα μπορεί να είναι σημαντικό. Για τον λόγο αυτό, οι αλγόριθμοι μέτρησης πρέπει να είναι σταθεροί, επαναλήψιμοι και κατάλληλα προσαρμοσμένοι στο είδος της εικόνας.

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για μέτρηση απόστασης από εικόνα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις κλασικές μεθόδους επεξεργασίας εικόνας, όπως grayscale conversion, thresholding, edge detection, contour detection, template matching, optical flow και sub-pixel localization. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και βαθιάς μάθησης, όπως object detection, segmentation και μοντέλα τύπου YOLO. Οι κλασικές μέθοδοι είναι συνήθως πιο απλές, πιο ελεγχόμενες και πιο εύκολες στην ερμηνεία. Οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης είναι πιο ισχυρές σε σύνθετες εικόνες, αλλά απαιτούν δεδομένα εκπαίδευσης και προσεκτική αξιολόγηση.

7.1 Γενική ροή ενός αλγορίθμου μέτρησης απόστασης

Ένας τυπικός αλγόριθμος μέτρησης απόστασης από εικόνα ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια. Τα στάδια αυτά μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με την εφαρμογή, αλλά η βασική ροή είναι συνήθως παρόμοια.

Βήμα	Περιγραφή
1	Λήψη εικόνας ή video
2	Βαθμονόμηση εικόνας σε πραγματικές μονάδες

Βήμα	Περιγραφή
3	Προεπεξεργασία εικόνας
4	Επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος
5	Εντοπισμός σημείων, ακμών ή αντικειμένων
6	Υπολογισμός απόστασης σε pixels
7	Μετατροπή pixels σε πραγματική απόσταση
8	Φιλτράρισμα ή εξομάλυνση αποτελεσμάτων
9	Αποθήκευση και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η λήψη της εικόνας είναι το πρώτο στάδιο. Η ποιότητα της εικόνας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία του αλγορίθμου. Αν η εικόνα είναι θολή, σκοτεινή, υπερφωτισμένη ή έχει χαμηλή αντίθεση, τότε ακόμη και ένας καλός αλγόριθμος μπορεί να αποτύχει. Για αυτόν τον λόγο, η σωστή εστίαση, ο σταθερός φωτισμός και η μηχανική σταθερότητα είναι απαραίτητα στοιχεία.

Η βαθμονόμηση είναι το δεύτερο κρίσιμο στάδιο. Χωρίς βαθμονόμηση, ο αλγόριθμος γνωρίζει μόνο αποστάσεις σε pixels, όχι πραγματικές αποστάσεις. Η βαθμονόμηση συνδέει τον ψηφιακό χώρο της εικόνας με τον πραγματικό χώρο. Σε μικροσκοπικές μετρήσεις, η βαθμονόμηση γίνεται συνήθως με μικρομετρική κλίμακα και οδηγεί σε συντελεστή $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

Η προεπεξεργασία βελτιώνει την εικόνα πριν γίνει η μέτρηση. Μπορεί να περιλαμβάνει μετατροπή σε grayscale, φιλτράρισμα θορύβου, αύξηση αντίθεσης, διόρθωση φωτισμού και επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εντοπίζει τα σημεία ή τις ακμές που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση. Τέλος, η απόσταση σε pixels μετατρέπεται σε πραγματική απόσταση.

7.2 Βαθμονόμηση κάμερας και μετατροπή pixel σε φυσική απόσταση

Η βαθμονόμηση κάμερας περιλαμβάνει τον υπολογισμό εσωτερικών παραμέτρων, όπως εστιακή απόσταση, κέντρο εικόνας και συντελεστές παραμόρφωσης φακού. Το OpenCV παρέχει εργαλεία για βαθμονόμηση κάμερας μέσω εικόνων γνωστού μοτίβου, όπως checkerboard, και υπολογισμών των παραμέτρων που επιτρέπουν τη διόρθωση παραμορφώσεων [49]. Η βαθμονόμηση αυτή είναι

ιδιαίτερα σημαντική όταν η μέτρηση γίνεται σε μεγάλο πεδίο εικόνας ή όταν χρησιμοποιούνται φακοί που προκαλούν παραμόρφωση στα άκρα.

Στη μικρομετρική μέτρηση, η απλή αντιστοίχιση $\mu\text{m}/\text{pixel}$ μπορεί να είναι αρκετή όταν η περιοχή ενδιαφέροντος είναι μικρή, η κάμερα είναι σταθερή και το αντικείμενο βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο. Ωστόσο, αν υπάρχει παραμόρφωση φακού ή αν το αντικείμενο κινείται εκτός επιπέδου εστίασης, τότε απαιτούνται πιο σύνθετες διορθώσεις.

7.3 Προεπεξεργασία εικόνας

Η προεπεξεργασία εικόνας έχει στόχο να βελτιώσει την ποιότητα της πληροφορίας που θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση. Συνήθως εφαρμόζεται πριν από τον εντοπισμό ακμών, σημείων ή αντικειμένων. Τα πιο συνηθισμένα βήματα είναι:

Τεχνική	Σκοπός
Grayscale conversion	Απλοποίηση εικόνας σε μία ένταση ανά pixel
Gaussian blur	Μείωση θορύβου
Median filter	Αφαίρεση salt-and-pepper noise
Histogram equalization	Βελτίωση αντίθεσης
Background subtraction	Αφαίρεση σταθερού φόντου
Thresholding	Διαχωρισμός αντικειμένου από φόντο
Morphological operations	Καθαρισμός μικρών σφαλμάτων

Η μετατροπή σε grayscale είναι συχνά το πρώτο βήμα. Πολλές μετρήσεις δεν απαιτούν πληροφορία χρώματος, αλλά μόνο πληροφορία έντασης. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου.

Το φιλτράρισμα θορύβου είναι επίσης σημαντικό. Ένα Gaussian φίλτρο μπορεί να μειώσει τον τυχαίο θόρυβο, αλλά αν χρησιμοποιηθεί υπερβολικά μπορεί να θολώσει τις ακμές. Το median filter είναι χρήσιμο όταν υπάρχουν μεμονωμένα φωτεινά ή σκοτεινά pixels. Σε κάθε περίπτωση, το φιλτράρισμα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά, επειδή μπορεί να επηρεάσει τη θέση της ακμής.

Το thresholding χρησιμοποιείται όταν υπάρχει καλή αντίθεση μεταξύ αντικειμένου και φόντου. Αν το αντικείμενο είναι σκοτεινό και το φόντο φωτεινό, τότε με κατάλληλο κατώφλι μπορεί να

δημιουργηθεί δυαδική εικόνα. Σε πιο δύσκολες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί adaptive thresholding, όπου το κατώφλι αλλάζει τοπικά ανάλογα με τον φωτισμό.

7.4 Ανίχνευση ακμών

Η ανίχνευση ακμών είναι μία από τις πιο σημαντικές τεχνικές για μέτρηση απόστασης από εικόνα. Μία ακμή εμφανίζεται εκεί όπου υπάρχει απότομη μεταβολή της φωτεινότητας. Σε πολλές μετρήσεις, η θέση της ακμής αντιστοιχεί στο όριο ενός αντικειμένου. Αν εντοπιστούν δύο ακμές, μπορεί να υπολογιστεί το πλάτος ενός αντικειμένου. Αν παρακολουθείται μία ακμή σε διαδοχικές εικόνες, μπορεί να υπολογιστεί η μετατόπισή της.

Οι κλασικοί αλγόριθμοι ανίχνευσης ακμών περιλαμβάνουν Sobel, Prewitt, Roberts και Canny. Ο Sobel υπολογίζει την τοπική μεταβολή φωτεινότητας σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Ο Canny είναι πιο σύνθετος και περιλαμβάνει φιλτράρισμα, υπολογισμό gradient, non-maximum suppression και hysteresis thresholding. Για αυτόν τον λόγο, ο Canny χρησιμοποιείται συχνά όταν απαιτείται πιο καθαρός εντοπισμός ακμών.

Σε μετρήσεις υψηλής ακρίβειας, η απλή ακέραια θέση της ακμής μπορεί να μην είναι αρκετή. Για αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές sub-pixel edge detection. Έρευνα σε μη επαφική μέτρηση μετατοπίσεων έχει δείξει ότι οι sub-pixel τεχνικές μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με μεθόδους που βασίζονται μόνο σε ακέραιες θέσεις pixel [50]. Ειδικότερα, μέθοδοι όπως Zernike subpixel edge detection έχουν χρησιμοποιηθεί για οπτική παρακολούθηση μετατοπίσεων και ταλαντώσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια [50].

Η ανίχνευση ακμών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη δική μας εργασία, επειδή η μικροαπόσταση μπορεί να υπολογιστεί από τη θέση δύο ακμών ή από τη μετατόπιση μιας ακμής στον χρόνο. Αν η εικόνα έχει καλό φωτισμό και έντονη αντίθεση, η edge-based μέτρηση είναι απλή, γρήγορη και εύκολα ερμηνεύσιμη.

7.5 Εντοπισμός contours και γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Οι contours είναι συνεχόμενες καμπύλες που περιγράφουν τα όρια ενός αντικειμένου σε μια δυαδική ή επεξεργασμένη εικόνα. Μετά το thresholding ή την ανίχνευση ακμών, μπορούν να εντοπιστούν τα περιγράμματα των αντικειμένων. Από αυτά τα περιγράμματα μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Παραδείγματα χαρακτηριστικών είναι:

Χαρακτηριστικό	Χρήση
Περίγραμμα	Όριο αντικειμένου
Bounding box	Προσεγγιστική θέση και μέγεθος αντικειμένου
Κέντρο μάζας	Θέση αντικειμένου
Εμβαδόν	Μέγεθος περιοχής
Περίμετρος	Μήκος ορίου
Ελάχιστο/μέγιστο x,y	Ακραία σημεία
Προσανατολισμός	Γωνία αντικειμένου

Για μέτρηση απόστασης, ιδιαίτερα χρήσιμα είναι το κέντρο μάζας, τα ακραία σημεία και το bounding box. Αν για παράδειγμα παρακολουθούμε ένα μικρό σωματίδιο, μπορούμε να υπολογίσουμε το κέντρο του σε κάθε εικόνα και στη συνέχεια να υπολογίσουμε τη μετατόπιση. Αν μετράμε το πλάτος ενός αντικειμένου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα ακραία x σημεία του περιγράμματος.

Η contour-based μέθοδος είναι χρήσιμη όταν το αντικείμενο διαχωρίζεται καλά από το φόντο. Αν όμως υπάρχουν σκιές, θόρυβος ή πολλά αντικείμενα, μπορεί να απαιτηθεί επιπλέον φιλτράρισμα και επιλογή της σωστής περιοχής.

7.6 Template matching

Το template matching είναι μία μέθοδος κατά την οποία ένα γνωστό πρότυπο εικόνας αναζητείται μέσα σε μια μεγαλύτερη εικόνα. Το πρότυπο μπορεί να είναι ένα μικρό τμήμα της εικόνας που περιέχει το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Ο αλγόριθμος συγκρίνει το πρότυπο με διάφορες περιοχές της εικόνας και βρίσκει τη θέση όπου υπάρχει η μεγαλύτερη ομοιότητα.

Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη όταν το αντικείμενο έχει σταθερό σχήμα και εμφάνιση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παρακολούθηση αντικειμένου σε video και για υπολογισμό μετατόπισης. Αν η θέση του αντικειμένου στην πρώτη εικόνα είναι γνωστή, τότε το template matching μπορεί να εντοπίσει τη νέα θέση του στις επόμενες εικόνες.

7.7 Optical flow

Το optical flow είναι μία τεχνική που εκτιμά την κίνηση pixels ή χαρακτηριστικών σημείων ανάμεσα σε διαδοχικές εικόνες. Αν ένα αντικείμενο μετακινηθεί από τη μία εικόνα στην επόμενη, το optical flow προσπαθεί να υπολογίσει το διάνυσμα μετατόπισης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε παρακολούθηση κίνησης, ρομποτική, video analysis και μετρήσεις μετατόπισης.

Υπάρχουν διάφορες μορφές optical flow. Ορισμένες υπολογίζουν πυκνό πεδίο μετατοπίσεων για σχεδόν όλα τα pixels, ενώ άλλες παρακολουθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σημεία. Για παράδειγμα, η μέθοδος Lucas–Kanade χρησιμοποιείται συχνά για παρακολούθηση χαρακτηριστικών σημείων σε διαδοχικές εικόνες.

Για μέτρηση μικρομετατοπίσεων, το optical flow μπορεί να είναι χρήσιμο όταν η κίνηση είναι μικρή και συνεχής. Αντί να εντοπίζεται κάθε φορά μία νέα ακμή από την αρχή, ο αλγόριθμος μπορεί να παρακολουθεί την κίνηση ενός σημείου ή μιας περιοχής. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε δυναμικές μετρήσεις, όπως ταλαντώσεις ή μικρές μετακινήσεις ενεργοποιητών.

Ωστόσο, το optical flow έχει περιορισμούς. Επηρεάζεται από αλλαγές φωτισμού, θόλωση, θόρυβο και απουσία χαρακτηριστικών. Αν το αντικείμενο δεν έχει αρκετή υφή ή αν η εικόνα είναι πολύ ομοιόμορφη, η μέθοδος μπορεί να μην είναι αξιόπιστη.

7.8 Digital Image Correlation

Η Digital Image Correlation, γνωστή ως DIC, είναι μία μεθοδολογία που χρησιμοποιείται ευρέως για μέτρηση μετατόπισης και παραμόρφωσης από εικόνες. Η βασική ιδέα είναι ότι η εικόνα χωρίζεται σε μικρές περιοχές ή subsets, και η μετατόπιση κάθε περιοχής υπολογίζεται μέσω συσχέτισης ανάμεσα στην αρχική και τη μεταγενέστερη εικόνα.

Η DIC είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν θέλουμε να μετρήσουμε πεδίο μετατοπίσεων και όχι μόνο μία απόσταση. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί πώς παραμορφώνεται μια επιφάνεια, πώς μετακινείται ένα υλικό ή πώς αλλάζει η γεωμετρία ενός αντικειμένου υπό φόρτιση. Σε συγκριτικές μελέτες, η DIC έχει εξεταστεί μαζί με μεθόδους edge detection ως προς την ακρίβεια και την ταχύτητα υπολογισμού [51].

Η DIC απαιτεί καλή υφή ή μοτίβο στην επιφάνεια. Αν η επιφάνεια είναι ομοιόμορφη, συχνά προστίθεται τεχνητό μοτίβο, για παράδειγμα στίγματα. Για τη δική μας εργασία, η DIC μπορεί να αναφερθεί ως σημαντική γενική μεθοδολογία, αλλά πιθανόν ο δικός μας αλγόριθμος θα βασιστεί

περισσότερο σε edge detection, contour detection ή tracking, επειδή αυτά είναι πιο άμεσα εφαρμόσιμα σε εικόνες μικροσκοπίου με καθαρό περίγραμμα.

7.9 Sub-pixel localization

Η sub-pixel localization είναι μία από τις πιο σημαντικές τεχνικές όταν η μέτρηση απαιτεί ακρίβεια καλύτερη από το μέγεθος ενός pixel. Στην απλή περίπτωση, η θέση ενός σημείου ή μιας ακμής δίνεται με ακέραιες συντεταγμένες pixel. Όμως στην πραγματικότητα, η ακμή μπορεί να βρίσκεται ανάμεσα σε δύο pixels. Με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί αυτή η ενδιάμεση θέση.

Η sub-pixel προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις:

Περίπτωση	Παράδειγμα sub-pixel μεθόδου
Φωτεινό spot	Κέντρο βάρους ή Gaussian fitting
Ακμή	Παρεμβολή gradient ή Zernike moments
Template matching	Παρεμβολή γύρω από το μέγιστο συσχέτισης
Object center	Υπολογισμός κέντρου μάζας με εντάσεις
Optical flow	Sub-pixel displacement estimation

Σε μετρήσεις με μικροσκόπιο, η sub-pixel μέτρηση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ανάλυση, ειδικά όταν η εικόνα έχει καλή ποιότητα. Ωστόσο, πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά. Η sub-pixel ακρίβεια δεν σημαίνει απαραίτητα και πραγματική φυσική ακρίβεια, αν το σύστημα δεν είναι σταθερό ή αν η βαθμονόμηση δεν είναι σωστή. Για παράδειγμα, ένας αλγόριθμος μπορεί να δώσει τιμή 0.1 pixel, αλλά αν η εικόνα είναι θολή ή αν η βάση δονείται, η πραγματική αβεβαιότητα μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη.

Πρόσφατες εργασίες στη vision-based displacement sensing αναφέρουν ότι οι τεχνικές sub-pixel refinement μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ακρίβεια μέτρησης, ειδικά όταν συνδυάζονται με σταθερή εικόνα και κατάλληλη επεξεργασία [52].

7.10 Object detection και YOLO

Τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για εντοπισμό αντικειμένων σε εικόνες. Ένα από τα πιο γνωστά μοντέλα είναι το YOLO, από το *You Only Look Once*. Η βασική ιδέα του YOLO είναι ότι μπορεί να εντοπίζει αντικείμενα σε μία εικόνα με μία μόνο διέλευση από το νευρωνικό δίκτυο. Αυτό το κάνει γρήγορο και κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Τα νεότερα μοντέλα της οικογένειας YOLO χρησιμοποιούνται για object detection, segmentation και pose estimation. Σύμφωνα με την επίσημη τεκμηρίωση της Ultralytics, η νεότερη γενιά YOLO26 παρουσιάζεται ως μοντέλο πραγματικού χρόνου για object detection και segmentation, με έμφαση σε end-to-end inference και αξιοποίηση σε edge ή low-power συσκευές [53]. Αυτό είναι σημαντικό για εφαρμογές αισθητήρων και embedded systems, επειδή επιτρέπει εντοπισμό αντικειμένων χωρίς να απαιτείται απαραίτητα ισχυρός υπολογιστής.

Στο πλαίσιο μέτρησης απόστασης, το YOLO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει αντικείμενα ή περιοχές ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, μπορεί να εντοπίσει ένα μικρό εξάρτημα, ένα άκρο, ένα marker ή ένα αντικείμενο μέσα στην εικόνα. Στη συνέχεια, η θέση του bounding box ή του κέντρου του αντικειμένου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση μετατόπισης.

Ωστόσο, πρέπει να γίνει σαφές ότι το YOLO από μόνο του δεν είναι μετρολογικός αλγόριθμος. Το YOLO εντοπίζει αντικείμενα, αλλά η ακριβής μέτρηση μικροαπόστασης απαιτεί επιπλέον στάδια: βαθμονόμηση, μετατροπή pixel σε πραγματικές μονάδες, έλεγχο ακρίβειας και πιθανώς sub-pixel refinement. Επίσης, τα bounding boxes έχουν περιορισμένη ακρίβεια σε σχέση με τεχνικές edge detection ή sub-pixel localization. Για αυτό, σε μικρομετρικές μετρήσεις, το YOLO μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως ως εργαλείο εντοπισμού περιοχής ενδιαφέροντος, ενώ η τελική μέτρηση καλό είναι να γίνεται με πιο ακριβείς γεωμετρικές μεθόδους.

7.11 Segmentation

Η segmentation είναι η διαδικασία διαχωρισμού της εικόνας σε περιοχές. Σε αντίθεση με το object detection, που συνήθως δίνει ένα bounding box γύρω από το αντικείμενο, η segmentation μπορεί να δώσει το ακριβές σχήμα του αντικειμένου σε επίπεδο pixel. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν θέλουμε να μετρήσουμε γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως μήκος, πλάτος, εμβαδόν ή περίγραμμα.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες segmentation:

Κατηγορία	Περιγραφή
Classical segmentation	Thresholding, region growing, watershed
Deep learning segmentation	U-Net, Mask R-CNN, YOLO segmentation

Για μικροσκοπικές εικόνες, η segmentation μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη όταν το αντικείμενο έχει σαφές περίγραμμα. Αν το αντικείμενο διαχωρίζεται καλά από το φόντο, απλές τεχνικές thresholding μπορεί να είναι αρκετές. Αν όμως η εικόνα έχει θόρυβο, ανομοιόμορφο φωτισμό ή σύνθετο φόντο, τότε μπορεί να χρειαστούν πιο εξελιγμένες μέθοδοι.

7.12 Tracking σε ακολουθία εικόνων ή video

Όταν η μέτρηση αφορά μετατόπιση στον χρόνο, δεν αρκεί να αναλυθεί μία μόνο εικόνα. Πρέπει να παρακολουθείται η θέση του αντικειμένου σε διαδοχικά frames. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται tracking.

Το tracking μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:

Μέθοδος tracking	Χρήση
Edge tracking	Παρακολούθηση ακμής
Centroid tracking	Παρακολούθηση κέντρου αντικειμένου
Template tracking	Παρακολούθηση γνωστού προτύπου
Optical flow	Παρακολούθηση σημείων ή περιοχών
Kalman filter	Πρόβλεψη και εξομάλυνση κίνησης
Deep learning tracking	Παρακολούθηση σύνθετων αντικειμένων

Σε μικρομετρικές μετρήσεις, η παρακολούθηση πρέπει να είναι σταθερή και να μην «πηδάει» από σημείο σε σημείο λόγω θορύβου. Για αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιορισμός περιοχής ενδιαφέροντος γύρω από την προηγούμενη θέση. Αν το αντικείμενο βρέθηκε στο frame n , τότε στο frame $n + 1$ ο αλγόριθμος μπορεί να ψάξει σε μικρή περιοχή γύρω από την προηγούμενη θέση. Αυτό μειώνει τα λάθη και αυξάνει την ταχύτητα.

7.13 Εκτίμηση σφάλματος και αβεβαιότητας

Μία μέτρηση απόστασης δεν πρέπει να δίνεται μόνο ως αριθμός, αλλά πρέπει να συνοδεύεται από εκτίμηση σφάλματος ή αβεβαιότητας. Στη μικρομετρική κλίμακα, αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Οι βασικές πηγές σφάλματος είναι:

Πηγή σφάλματος	Περιγραφή
Σφάλμα βαθμονόμησης	Λάθος υπολογισμός $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Σφάλμα εντοπισμού ακμής	Λανθασμένη θέση λόγω θορύβου
Θόλωση εικόνας	Μη σαφές περίγραμμα
Παραμόρφωση φακού	Μη ομοιόμορφη κλίμακα εικόνας
Μηχανικές δονήσεις	Ψευδείς μετατοπίσεις
Αλλαγές φωτισμού	Μεταβολή threshold ή ακμών
Θόρυβος αισθητήρα	Διακύμανση έντασης pixels
Αλγοριθμικό σφάλμα	Λάθος ROI ή λάθος αντικείμενο

Η αβεβαιότητα μπορεί να εκτιμηθεί με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Για παράδειγμα, αν το αντικείμενο παραμένει ακίνητο, ο αλγόριθμος μπορεί να μετρήσει τη θέση του σε πολλά frames. Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων δείχνει τον θόρυβο και τη σταθερότητα του συστήματος. Αν η θέση ενός ακίνητου αντικειμένου μεταβάλλεται κατά ± 1 pixel λόγω θορύβου, τότε αυτή η μεταβολή πρέπει να ληφθεί υπόψη στην τελική αξιολόγηση.

7.14 Σύγκριση αλγοριθμικών προσεγγίσεων

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Καταλληλότητα για δική μας εργασία
Thresholding	Απλό, γρήγορο	Ευαίσθητο σε φωτισμό	Υψηλή, αν υπάρχει καλό contrast
Edge detection	Καλό για όρια αντικειμένων	Θόρυβος/θόλωση επηρεάζουν	Πολύ υψηλή
Contour detection	Δίνει γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Απαιτεί καθαρή δυαδική εικόνα	Υψηλή

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Καταλληλότητα για δική μας εργασία
Template matching	Απλό tracking	Ευαίσθητο σε αλλαγές σχήματος	Μέτρια έως υψηλή
Optical flow	Καλό για συνεχόμενη κίνηση	Θέλει χαρακτηριστικά/υφή	Μέτρια
DIC	Ισχυρό για πεδία μετατόπισης	Πιο σύνθετο	Μέτρια
Sub-pixel localization	Βελτιώνει ακρίβεια	Θέλει καλή εικόνα	Πολύ υψηλή
YOLO	Ισχυρό object detection	Δεν είναι μετρολογικό από μόνο του	Χρήσιμο για ROI
Segmentation	Ακριβές σχήμα αντικειμένου	Θέλει καλή εκπαίδευση ή contrast	Υψηλή

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι για τη δική μας εργασία οι πιο κατάλληλες μέθοδοι είναι το thresholding, το edge detection, το contour detection και η sub-pixel localization. Το YOLO μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά για εντοπισμό αντικειμένου ή περιοχής ενδιαφέροντος, αλλά η τελική μικρομετρική μέτρηση πρέπει να βασίζεται σε γεωμετρικά και βαθμονομημένα χαρακτηριστικά.

Κεφάλαιο 8ο: Προτεινόμενος Αλγόριθμος σε Python για Μέτρηση Μικροαποστάσεων από Εικόνα

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί το πιο σημαντικό πρακτικό μέρος της εργασίας καθώς παρουσιάζει την προτεινόμενη μεθοδολογία για τη μέτρηση μικροαποστάσεων με χρήση εικόνας από κάμερα. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν οι βασικές τεχνολογίες αισθητήρων, οι laser τεχνικές, οι RF προσεγγίσεις και οι μέθοδοι μέτρησης με εικόνα. Στο κεφάλαιο αυτό, οι παραπάνω γνώσεις αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου αλγορίθμου σε Python, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μικρομετρικών αποστάσεων από ψηφιακές εικόνες.

Η βασική ιδέα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ότι η εικόνα που λαμβάνεται από την κάμερα περιέχει γεωμετρική πληροφορία. Η πληροφορία αυτή αρχικά βρίσκεται σε μορφή pixels. Με κατάλληλη βαθμονόμηση, τα pixels μπορούν να μετατραπούν σε πραγματικές μονάδες μήκους, όπως μικρόμετρα. Επομένως, αν εντοπιστούν δύο σημεία, δύο ακμές ή δύο περιοχές ενδιαφέροντος στην εικόνα, η απόστασή τους μπορεί να υπολογιστεί αρχικά σε pixels και στη συνέχεια να μετατραπεί σε μm .

Η δική μας προσέγγιση στηρίζεται σε τέσσερα βασικά στοιχεία:

1. λήψη εικόνας από κάμερα ή μικροσκόπιο,
2. βαθμονόμηση της εικόνας σε $\mu\text{m}/\text{pixel}$,
3. εντοπισμό σημείων, ακμών ή αντικειμένων,
4. υπολογισμό και παρουσίαση της απόστασης.

Η μεθοδολογία αυτή δεν αντιμετωπίζει την εικόνα απλώς ως φωτογραφία, αλλά ως μετρητικό δεδομένο. Δηλαδή, η εικόνα χρησιμοποιείται ως έξοδος ενός αισθητήρα εικόνας και με κατάλληλη επεξεργασία μετατρέπεται σε αριθμητική μέτρηση. Με αυτόν τον τρόπο, η κάμερα λειτουργεί ως αισθητήρας μέτρησης μικροαποστάσεων.

8.1 Στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου

Ο βασικός στόχος του αλγορίθμου είναι να υπολογίζει την απόσταση μεταξύ δύο σημείων ή δύο χαρακτηριστικών περιοχών σε μία εικόνα μικροσκοπίου. Η απόσταση αυτή αρχικά υπολογίζεται σε pixels και στη συνέχεια μετατρέπεται σε μικρόμετρα μέσω συντελεστή βαθμονόμησης.

Ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιπτώσεις, όπως:

Περίπτωση χρήσης	Παράδειγμα
Μέτρηση απόστασης δύο σημείων	Απόσταση μεταξύ δύο μικροδομών
Μέτρηση πλάτους αντικειμένου	Πλάτος μικρού εξαρτήματος
Μέτρηση μετατόπισης	Κίνηση ελεύθερου άκρου μικροενεργοποιητή
Μέτρηση διαμέτρου	Διάμετρος μικροσωματιδίου
Παρακολούθηση κίνησης	Μεταβολή θέσης σε διαδοχικές εικόνες
Σύγκριση πριν/μετά	Μεταβολή θέσης πριν και μετά από διέγερση

Η προτεινόμενη υλοποίηση μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την εφαρμογή. Αν η εικόνα έχει καθαρό φόντο και έντονη αντίθεση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλό thresholding και contour detection. Αν ενδιαφέρει η ακριβής θέση μιας ακμής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί edge detection. Αν το αντικείμενο κινείται σε video, μπορεί να προστεθεί tracking.

8.2 Γενική αρχιτεκτονική της μεθοδολογίας

Η συνολική μεθοδολογία του αλγορίθμου μπορεί να παρουσιαστεί ως αλυσίδα επεξεργασίας. Η αλυσίδα αυτή ξεκινά από τη λήψη της εικόνας και καταλήγει στην τελική αριθμητική τιμή της μικροαπόστασης.

Στάδιο	Περιγραφή
1. Είσοδος εικόνας	Φόρτωση εικόνας από αρχείο ή κάμερα
2. Βαθμονόμηση	Ορισμός συντελεστή $\mu\text{m}/\text{pixel}$
3. Προεπεξεργασία	Grayscale, φιλτράρισμα, βελτίωση αντίθεσης
4. Περιοχή ενδιαφέροντος	Επιλογή ROI για μείωση θορύβου
5. Εντοπισμός χαρακτηριστικών	Ακμές, contours, σημεία ή κέντρο αντικειμένου
6. Υπολογισμός απόστασης	Απόσταση σε pixels
7. Μετατροπή μονάδων	Pixels σε μικρόμετρα
8. Οπτικοποίηση	Σχεδίαση γραμμής μέτρησης πάνω στην εικόνα
9. Αποθήκευση αποτελεσμάτων	Πίνακας, αρχείο CSV, γράφημα

Η αρχιτεκτονική αυτή είναι απλή αλλά επιστημονικά πλήρης. Το σημαντικό είναι ότι κάθε στάδιο μπορεί να ελεγχθεί, να τροποποιηθεί και να αξιολογηθεί. Αυτό είναι πλεονέκτημα σε σχέση με ένα «μαύρο κουτί» τεχνητής νοημοσύνης, γιατί ο χρήστης μπορεί να γνωρίζει πώς ακριβώς προέκυψε η μέτρηση.

8.3 Βαθμονόμηση εικόνας

Η βαθμονόμηση είναι το πρώτο και πιο κρίσιμο βήμα. Χωρίς βαθμονόμηση, ο αλγόριθμος μπορεί να υπολογίσει μόνο απόσταση σε pixels. Για να μετατραπεί αυτή η απόσταση σε μικρόμετρα, πρέπει να γνωρίζουμε πόσα μm αντιστοιχούν σε κάθε pixel.

Η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με χρήση μικρομετρικής κλίμακας. Η διαδικασία είναι η εξής:

1. Τοποθετείται κάτω από το μικροσκόπιο μία γνωστή κλίμακα.
2. Λαμβάνεται εικόνα της κλίμακας.
3. Επιλέγονται δύο σημεία γνωστής απόστασης.
4. Υπολογίζεται η απόστασή τους σε pixels.
5. Υπολογίζεται ο συντελεστής $\mu m/pixel$.

Αν η πραγματική απόσταση είναι:

$$D_{\mu m}$$

και η αντίστοιχη απόσταση στην εικόνα είναι:

$$D_{px}$$

τότε ο συντελεστής βαθμονόμησης είναι:

$$S = \frac{D_{\mu m}}{D_{px}}$$

όπου S είναι ο συντελεστής σε $\mu m/pixel$.

Για παράδειγμα, αν μια γνωστή απόσταση 100 μm αντιστοιχεί σε 200 pixels στην εικόνα, τότε:

$$S = \frac{100}{200} = 0.5 \mu m/pixel$$

Αυτό σημαίνει ότι κάθε pixel αντιστοιχεί σε 0.5 μm . Άρα, αν ο αλγόριθμος μετρήσει μια απόσταση 300 pixels, η πραγματική απόσταση είναι:

$$D = 300 \cdot 0.5 = 150 \mu\text{m}$$

Η βαθμονόμηση πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε φορά που αλλάζει η μεγέθυνση, ο φακός, η θέση της κάμερας ή η ανάλυση της εικόνας.

8.4 Προεπεξεργασία εικόνας

Η προεπεξεργασία έχει στόχο να βελτιώσει την εικόνα πριν από τη μέτρηση. Σε πολλές περιπτώσεις, η αρχική εικόνα μπορεί να περιέχει θόρυβο, ανομοιόμορφο φωτισμό ή περιοχές που δεν ενδιαφέρουν. Για αυτόν τον λόγο, πριν γίνει ο εντοπισμός ακμών ή αντικειμένων, εφαρμόζονται βασικά φίλτρα και μετασχηματισμοί.

Τα βασικά βήματα προεπεξεργασίας είναι:

Βήμα	Σκοπός
Μετατροπή σε grayscale	Απλοποίηση εικόνας
Gaussian blur	Μείωση τυχαίου θορύβου
Thresholding	Διαχωρισμός αντικειμένου από φόντο
Morphological filtering	Καθαρισμός μικρών θορύβων
ROI selection	Εστίαση στην περιοχή μέτρησης

Η μετατροπή σε grayscale μειώνει την πολυπλοκότητα, επειδή η εικόνα περιγράφεται πλέον από μία τιμή έντασης ανά pixel. Το φιλτράρισμα μειώνει μικρές διακυμάνσεις θορύβου. Το thresholding μετατρέπει την εικόνα σε δυαδική, όπου το αντικείμενο εμφανίζεται με λευκό και το φόντο με μαύρο ή αντίστροφα.

Η επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αν ο αλγόριθμος αναζητά χαρακτηριστικά σε ολόκληρη την εικόνα, μπορεί να εντοπίσει λάθος ακμές ή άσχετα αντικείμενα. Αντίθετα, αν η αναζήτηση περιοριστεί στην περιοχή όπου βρίσκεται το αντικείμενο, η μέτρηση γίνεται πιο γρήγορη και πιο αξιόπιστη.

8.5 Εντοπισμός ακμών ή αντικειμένων

Μετά την προεπεξεργασία, ο αλγόριθμος πρέπει να εντοπίσει τα χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση. Ανάλογα με την εφαρμογή, αυτά μπορεί να είναι δύο σημεία, δύο ακμές, το κέντρο ενός αντικειμένου ή το ελεύθερο άκρο ενός κινούμενου στοιχείου.

Για παράδειγμα:

Σενάριο	Τι εντοπίζεται
Μέτρηση πλάτους	Δύο πλευρικές ακμές
Μέτρηση μετατόπισης	Θέση ακμής σε δύο frames
Μέτρηση απόστασης δύο αντικειμένων	Κέντρα ή πλησιέστερες ακμές
Μέτρηση διαμέτρου	Ακραία σημεία περιγράμματος
Παρακολούθηση άκρου	Ελεύθερο άκρο αντικειμένου

Στην απλή εκδοχή του αλγορίθμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί contour detection. Ο αλγόριθμος εντοπίζει τα περιγράμματα των αντικειμένων και στη συνέχεια επιλέγει το κατάλληλο περίγραμμα με βάση το μέγεθος, τη θέση ή το σχήμα του. Από το περίγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα ακραία σημεία, το κέντρο μάζας ή το bounding box.

Σε περίπτωση που ενδιαφέρει η ακριβής θέση μιας ακμής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί Canny edge detection. Μετά την ανίχνευση των ακμών, επιλέγεται η ακμή που αντιστοιχεί στο αντικείμενο και υπολογίζεται η θέση της.

9.6 Υπολογισμός απόστασης σε pixels

Αφού εντοπιστούν τα δύο σημεία μέτρησης, η απόσταση υπολογίζεται σε pixels. Αν τα σημεία έχουν συντεταγμένες:

$$P_1 = (x_1, y_1)$$

και

$$P_2 = (x_2, y_2)$$

τότε η ευκλείδεια απόσταση είναι:

$$D_{px} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Αν η μέτρηση αφορά μόνο οριζόντια μετατόπιση, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

$$D_{px} = |x_2 - x_1|$$

Αν αφορά μόνο κατακόρυφη μετατόπιση, τότε:

$$D_{px} = |y_2 - y_1|$$

Η επιλογή εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Για παράδειγμα, αν παρακολουθείται η κάμψη ενός μικροενεργοποιητή προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση, μπορεί να ενδιαφέρει μόνο η κατακόρυφη μετατόπιση. Αν όμως μετριέται η απόσταση μεταξύ δύο σημείων σε γενική θέση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ευκλείδεια απόσταση.

8.6 Μετατροπή από pixels σε μικρόμετρα

Η τελική μέτρηση προκύπτει όταν η απόσταση σε pixels πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή βαθμονόμησης:

$$D_{\mu m} = D_{px} \cdot S$$

όπου:

Σύμβολο	Περιγραφή
$D_{\mu m}$	Απόσταση σε μικρόμετρα
D_{px}	Απόσταση σε pixels
S	Συντελεστής βαθμονόμησης σε $\mu m/pixel$

Αν η βαθμονόμηση είναι διαφορετική στους δύο άξονες, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο συντελεστές:

$$S_x$$

και

$$S_y$$

Σε αυτήν την περίπτωση, η πραγματική απόσταση υπολογίζεται ως:

$$D_{\mu m} = \sqrt{(x_2 - x_1)S_x)^2 + ((y_2 - y_1)S_y)^2}$$

Αυτή η μορφή είναι πιο ακριβής όταν η εικόνα έχει διαφορετική κλίμακα στους δύο άξονες ή όταν υπάρχει μικρή μη ισοτροπία στην απεικόνιση.

8.7 Προτεινόμενος ψευδοκώδικας

Η γενική μορφή του αλγορίθμου μπορεί να παρουσιαστεί ως εξής:

Είσοδος:

εικόνα

συντελεστής βαθμονόμησης S σε $\mu\text{m}/\text{pixel}$

Βήματα:

1. Φόρτωσε την εικόνα
2. Μετέτρεψε την εικόνα σε grayscale
3. Εφάρμοσε φιλτράρισμα για μείωση θορύβου

4. Εφάρμοσε thresholding ή edge detection
5. Εντόπισε τα αντικείμενα ή τις ακμές
6. Επίλεξε τα δύο σημεία μέτρησης
7. Υπολόγισε την απόσταση σε pixels
8. Μετέτρεψε την απόσταση σε μm
9. Σχεδίασε τη γραμμή μέτρησης πάνω στην εικόνα
10. Εμφάνισε και αποθήκευσε το αποτέλεσμα

Έξοδος:

απόσταση σε pixels

απόσταση σε μm

εικόνα με σημειωμένη τη μέτρηση

Ο ψευδοκώδικας αυτός δείχνει τη λογική του προγράμματος ανεξάρτητα από την τελική υλοποίηση. Στην πράξη, η υλοποίηση μπορεί να γίνει με Python και OpenCV.

8.8 Ενδεικτική υλοποίηση σε Python

Παρακάτω παρουσιάζεται μία βασική μορφή κώδικα σε Python. Ο κώδικας φορτώνει μία εικόνα, εφαρμόζει επεξεργασία, εντοπίζει contours και υπολογίζει ενδεικτικά την απόσταση μεταξύ δύο σημείων.

```
import cv2
import numpy as np
import math
# Ρυθμίσεις βαθμονόμησης
# -----
MICRONS_PER_PIXEL = 0.50 # παράδειγμα: 0.50  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 
# -----
# Φόρτωση εικόνας
# -----
```

```

image_path = "sample_image.png"
image = cv2.imread(image_path)

if image is None:
    raise FileNotFoundError("Δεν βρέθηκε η εικόνα.")

# -----
# Προεπεξεργασία
# -----
gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Μείωση θορύβου
blurred = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)

# Thresholding
_, binary = cv2.threshold(
    blurred,
    0,
    255,
    cv2.THRESH_BINARY + cv2.THRESH_OTSU
)

# -----
# Εντοπισμός περιγραμμάτων
# -----
contours, _ = cv2.findContours(
    binary,
    cv2.RETR_EXTERNAL,
    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE
)

if len(contours) == 0:
    raise ValueError("Δεν εντοπίστηκαν αντικείμενα στην εικόνα.")

# Επιλογή μεγαλύτερου αντικειμένου
largest_contour = max(contours, key=cv2.contourArea)

# Bounding box
x, y, w, h = cv2.boundingRect(largest_contour)

# Δύο σημεία μέτρησης: αριστερή και δεξιά πλευρά του αντικειμένου
point1 = (x, y + h // 2)
point2 = (x + w, y + h // 2)

# -----
# Υπολογισμός απόστασης
# -----
distance_pixels = math.sqrt(
    (point2[0] - point1[0]) ** 2 +
    (point2[1] - point1[1]) ** 2
)

distance_microns = distance_pixels * MICRONS_PER_PIXEL

# -----
# Οπτικοποίηση
# -----
output = image.copy()

cv2.circle(output, point1, 5, (0, 0, 255), -1)
cv2.circle(output, point2, 5, (0, 0, 255), -1)
cv2.line(output, point1, point2, (0, 255, 0), 2)

text = f"distance_microns: {distance_microns:.2f} um"
cv2.putText(
    output,
    text,
    (x, y - 10),
    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
    0.7,
    (0, 255, 0),
    2
)

# Αποθήκευση αποτελέσματος
cv2.imwrite("measurement_result.png", output)

print(f"Απόσταση σε pixels: {distance_pixels:.2f}")
print(f"Απόσταση σε μικρόμετρα: {distance_microns:.2f} μm")

```

8.9 Βελτιωμένη εκδοχή με επιλογή δύο σημείων από τον χρήστη

Σε πολλές περιπτώσεις, ειδικά στην αρχική φάση ανάπτυξης, είναι χρήσιμο ο χρήστης να επιλέγει χειροκίνητα δύο σημεία πάνω στην εικόνα. Έτσι, μπορεί να ελέγξει αν η βαθμονόμηση και ο υπολογισμός λειτουργούν σωστά. Η χειροκίνητη επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέθοδος αναφοράς για τη σύγκριση με τον αυτόματο αλγόριθμο.

Η λογική είναι η εξής:

1. εμφανίζεται η εικόνα,
2. ο χρήστης επιλέγει δύο σημεία με το ποντίκι,
3. ο αλγόριθμος υπολογίζει την απόσταση σε pixels,
4. η απόσταση μετατρέπεται σε μm ,
5. το αποτέλεσμα εμφανίζεται πάνω στην εικόνα.

```
import cv2
import math

MICRONS_PER_PIXEL = 0.50

points = []

def click_event(event, x, y, flags, param):
    global points, image_display

    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        points.append((x, y))
        cv2.circle(image_display, (x, y), 4, (0, 0, 255), -1)

    if len(points) == 2:
        p1, p2 = points

        distance_pixels = math.sqrt(
            (p2[0] - p1[0])**2 +
            (p2[1] - p1[1])**2
        )

        distance_microns = distance_pixels * MICRONS_PER_PIXEL

        cv2.line(image_display, p1, p2, (0, 255, 0), 2)

        text = f"distance_microns:.2f um"
        cv2.putText(
            image_display,
            text,
            (min(p1[0], p2[0]), min(p1[1], p2[1]) - 10),
            cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
            0.7,
            (0, 255, 0),
            2
        )

        print(f"Απόσταση: {distance_pixels:.2f} pixels")
        print(f"Απόσταση: {distance_microns:.2f} μm")

    cv2.imshow("Measurement", image_display)

image = cv2.imread("sample_image.png")

if image is None:
    raise FileNotFoundError("Δεν βρέθηκε η εικόνα.")

image_display = image.copy()

cv2.imshow("Measurement", image_display)
cv2.setMouseCallback("Measurement", click_event)

cv2.waitKey(0)
```

Αυτή η εκδοχή είναι χρήσιμη για εκπαιδευτικούς και πειραματικούς σκοπούς, επειδή επιτρέπει άμεσο έλεγχο της μέτρησης. Στην τελική εργασία, μπορεί να παρουσιαστεί ως πρώτο στάδιο και στη συνέχεια να ακολουθήσει η αυτόματη μέτρηση.

8.10 Αυτόματη μέτρηση μετατόπισης σε διαδοχικές εικόνες

Αν η εφαρμογή αφορά μετατόπιση αντικειμένου στον χρόνο, τότε ο αλγόριθμος πρέπει να αναλύει διαδοχικές εικόνες ή frames από video. Σε αυτήν την περίπτωση, η μέτρηση δεν είναι απλώς η απόσταση δύο σημείων σε μία εικόνα, αλλά η μεταβολή της θέσης ενός σημείου ή αντικειμένου στον χρόνο.

Η διαδικασία μπορεί να είναι:

1. επιλέγεται το αντικείμενο στο πρώτο frame,
2. εντοπίζεται η θέση του,
3. στο επόμενο frame αναζητείται ξανά το αντικείμενο,
4. υπολογίζεται η νέα θέση,
5. η μετατόπιση προκύπτει από τη διαφορά θέσεων,
6. η μετατόπιση μετατρέπεται σε mm.

Αν η αρχική θέση είναι:

$$P_0 = (x_0, y_0)$$

και η θέση στο frame n είναι:

$$P_n = (x_n, y_n)$$

τότε η μετατόπιση σε pixels είναι:

$$\Delta d_{px} = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2}$$

και η μετατόπιση σε mm είναι:

$$\Delta d_{\mu m} = \Delta d_{px} \cdot S$$

Η μέτρηση αυτή μπορεί να αποθηκευτεί σε πίνακα με στήλες:

Frame	Χρόνος	x	y	Μετατόπιση pixels	Μετατόπιση μm
-------	--------	---	---	-------------------	--------------------------

Έτσι, εκτός από τη μέτρηση μιας απόστασης, μπορεί να δημιουργηθεί και γράφημα μετατόπισης ως προς τον χρόνο.

8.11 Ενδεικτικός κώδικας για video tracking

Παρακάτω δίνεται μία ενδεικτική απλή υλοποίηση για παρακολούθηση του μεγαλύτερου αντικειμένου σε video ή ακολουθία frames.

```
import cv2
import numpy as np
import math
import csv

MICRONS_PER_PIXEL = 0.50

video_path = "sample_video.mp4"
cap = cv2.VideoCapture(video_path)

if not cap.isOpened():
    raise FileNotFoundError("Δεν ήταν δυνατό το άνοιγμα του video.")

initial_center = None
results = []

frame_index = 0
fps = cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS)

while True:
    ret, frame = cap.read()

    if not ret:
        break

    gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    blurred = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)

    _, binary = cv2.threshold(
        blurred,
        0,
        255,
        cv2.THRESH_BINARY + cv2.THRESH_OTSU
    )

    contours, _ = cv2.findContours(
        binary,
        cv2.RETR_EXTERNAL,
        cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE
    )

    if len(contours) > 0:
        largest_contour = max(contours, key=cv2.contourArea)
        area = cv2.contourArea(largest_contour)

        if area > 50:
            M = cv2.moments(largest_contour)

            if M["m00"] != 0:
                cx = int(M["m10"] / M["m00"])
                cy = int(M["m01"] / M["m00"])

                if initial_center is None:
                    initial_center = (cx, cy)

                dx = cx - initial_center[0]
```

```

dy = cy - initial_center[1]

displacement_pixels = math.sqrt(dx**2 + dy**2)
displacement_microns = displacement_pixels * MICRONS_PER_PIXEL

time_sec = frame_index / fps if fps > 0 else 0

results.append([
    frame_index,
    time_sec,
    cx,
    cy,
    displacement_pixels,
    displacement_microns
])

cv2.circle(frame, (cx, cy), 5, (0, 0, 255), -1)
cv2.putText(
    frame,
    f'{displacement_microns:.2f} um',
    (cx + 10, cy),
    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
    0.6,
    (0, 255, 0),
    2
)

cv2.imshow("Tracking", frame)

if cv2.waitKey(1) & 0xFF == 27:
    break

frame_index += 1

cap.release()
cv2.destroyAllWindows()

# Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε CSV
with open("displacement_results.csv", "w", newline="", encoding="utf-8") as file:
    writer = csv.writer(file)
    writer.writerow([
        "Frame",
        "Time_s",
        "X_px",
        "Y_px",
        "Displacement_px",
        "Displacement_um"
    ])
    writer.writerows(results)

print("Η ανάλυση ολοκληρώθηκε.")
print("Τα αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν στο displacement_results.csv")

```

Ο παραπάνω κώδικας δείχνει πώς μπορεί να γίνει αυτόματη παρακολούθηση ενός αντικειμένου σε video. Η μέτρηση βασίζεται στο κέντρο μάζας του μεγαλύτερου αντικειμένου. Για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, η μέθοδος μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να παρακολουθεί συγκεκριμένη ακμή ή συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

8.12 Προτεινόμενη βελτίωση με ROI

Για να γίνει ο αλγόριθμος πιο σταθερός και γρήγορος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιοχή ενδιαφέροντος. Αντί να αναζητείται το αντικείμενο σε ολόκληρη την εικόνα, ο αλγόριθμος αναλύει μόνο ένα συγκεκριμένο τμήμα. Αυτό μειώνει το υπολογιστικό κόστος και την πιθανότητα λανθασμένου εντοπισμού.

Η περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να οριστεί με συντεταγμένες:

$$ROI = (x, y, w, h)$$

όπου x , γείναι η αρχική θέση και w , h το πλάτος και το ύψος της περιοχής.

Στον κώδικα, η ROI μπορεί να εφαρμοστεί ως εξής:

```
roi_x = 100
```

```
roi_y = 80
```

```
roi_w = 300
```

```
roi_h = 200
```

```
roi = frame[roi_y:roi_y + roi_h, roi_x:roi_x + roi_w]
```

Αν ο αλγόριθμος εντοπίσει ένα σημείο μέσα στη ROI, τότε πρέπει να προστεθεί η αρχική θέση της ROI για να βρεθούν οι πραγματικές συντεταγμένες στην αρχική εικόνα:

```
global_x = roi_x + local_x
```

```
global_y = roi_y + local_y
```

Η χρήση ROI είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μικρομετρικές μετρήσεις, όπου η μέτρηση συχνά αφορά ένα συγκεκριμένο μικρό τμήμα της εικόνας.

8.13 Αξιολόγηση της ακρίβειας

Για να θεωρηθεί αξιόπιστος ο αλγόριθμος, πρέπει να αξιολογηθεί η ακρίβειά του. Η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με διαφορετικούς τρόπους.

Πρώτον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντικείμενο γνωστής διάστασης. Ο αλγόριθμος μετρά την απόσταση και το αποτέλεσμα συγκρίνεται με την πραγματική τιμή.

Δεύτερον, μπορεί να γίνει επαναληψιμότητα μέτρησης. Το αντικείμενο παραμένει ακίνητο και ο αλγόριθμος μετρά την ίδια απόσταση πολλές φορές. Αν οι τιμές έχουν μικρή διακύμανση, τότε το σύστημα είναι σταθερό.

Τρίτον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρομετρικό stage. Το αντικείμενο μετακινείται κατά γνωστές αποστάσεις, για παράδειγμα 10 μm, 20 μm, 50 μm, και ο αλγόριθμος πρέπει να μετρήσει αντίστοιχες μετατοπίσεις.

Τα βασικά μεγέθη αξιολόγησης είναι:

Μέγεθος	Περιγραφή
Απόλυτο σφάλμα	Διαφορά μετρούμενης και πραγματικής τιμής
Σχετικό σφάλμα	Απόλυτο σφάλμα ως ποσοστό
Μέση τιμή	Μέσος όρος επαναλαμβανόμενων μετρήσεων
Τυπική απόκλιση	Διακύμανση επαναληπτικών μετρήσεων
Επαναληψιμότητα	Σταθερότητα αποτελεσμάτων
Γραμμικότητα	Αν η μέτρηση ακολουθεί τη γνωστή μετατόπιση

Το απόλυτο σφάλμα υπολογίζεται ως:

$$E = | D_{\text{measured}} - D_{\text{true}} |$$

Το σχετικό σφάλμα υπολογίζεται ως:

$$E_{\%} = \frac{| D_{\text{measured}} - D_{\text{true}} |}{D_{\text{true}}} \cdot 100$$

Η αξιολόγηση αυτή θα δείξει αν ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα για μικρομετρικές μετρήσεις.

8.14 Πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει αρκετά πλεονεκτήματα:

Πλεονέκτημα	Περιγραφή
Χαμηλό κόστος	Μπορεί να υλοποιηθεί με απλή κάμερα και μικροσκόπιο
Μη επαφική μέτρηση	Δεν επηρεάζεται μηχανικά το αντικείμενο
Επεκτασιμότητα	Μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές εφαρμογές
Αποθήκευση δεδομένων	Οι εικόνες και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται
Οπτικός έλεγχος	Ο χρήστης βλέπει τη μέτρηση πάνω στην εικόνα
Python/OpenCV	Χρήση ανοικτών εργαλείων
Δυνατότητα video	Παρακολούθηση μετατόπισης στον χρόνο
Εκπαιδευτική αξία	Συνδυάζει αισθητήρες, ηλεκτρονικά και προγραμματισμό

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι η μέθοδος είναι πλήρως ελέγξιμη. Ο χρήστης μπορεί να δει την εικόνα, τα σημεία μέτρησης, τη γραμμή απόστασης και το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πτυχιακή εργασία, επειδή δείχνει καθαρά τη διαδικασία μέτρησης.

8.15 Περιορισμοί και σημεία προσοχής

Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και περιορισμοί που πρέπει να αναφερθούν:

Περιορισμός	Περιγραφή
Εξάρτηση από βαθμονόμηση	Λάθος mm/pixel οδηγεί σε λάθος μέτρηση
Εξάρτηση από φωτισμό	Αλλαγές φωτισμού επηρεάζουν threshold και ακμές
Θόλωση εικόνας	Μειώνει την ακρίβεια εντοπισμού
Παραμόρφωση φακού	Μπορεί να αλλάξει την κλίμακα στα άκρα
Θόρυβος κάμερας	Προκαλεί διακύμανση
Λανθασμένο contour	Ο αλγόριθμος μπορεί να επιλέξει λάθος αντικείμενο
Motion blur	Σε video, η κίνηση μπορεί να θολώσει το αντικείμενο
Περιορισμένη ακρίβεια pixel	Χωρίς sub-pixel μέθοδο υπάρχει όριο ανάλυσης

Για να μειωθούν αυτά τα προβλήματα, προτείνονται τα εξής:

1. σταθερός φωτισμός,
2. σωστή εστίαση,
3. μηχανική σταθερότητα της διάταξης,

4. χρήση ROI,
5. επαναληπτικές μετρήσεις,
6. έλεγχος με γνωστά πρότυπα,
7. πιθανή χρήση sub-pixel τεχνικών.

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί τη μετάβαση από τη θεωρητική μελέτη στην πρακτική εφαρμογή. Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν διαφορετικές τεχνολογίες μέτρησης μικροαποστάσεων, όπως laser, confocal, RF, χωρητικές και camera-based τεχνικές. Στο παρόν κεφάλαιο επιλέγεται η προσέγγιση μικροσκοπίου και κάμερας, επειδή είναι οικονομική, ευέλικτη και επιτρέπει ανάπτυξη δικού μας αλγορίθμου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία δείχνει ότι η μέτρηση μικροαπόστασης μπορεί να υλοποιηθεί με σχετικά απλά μέσα, αρκεί να υπάρχει σωστή βαθμονόμηση και προσεκτική επεξεργασία εικόνας. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για απλή μέτρηση απόστασης σε μία εικόνα είτε για παρακολούθηση μετατόπισης σε video.

Η δική μας συμβολή βρίσκεται στην οργάνωση και υλοποίηση αυτής της αλυσίδας μέτρησης: από τη λήψη της εικόνας έως την εξαγωγή αριθμητικού αποτελέσματος σε μικρόμετρα. Αυτό δίνει πρακτικό χαρακτήρα στην πτυχιακή εργασία και δείχνει ότι η θεωρία των αισθητήρων και της ηλεκτρονικής μέτρησης μπορεί να συνδεθεί με πραγματική υπολογιστική εφαρμογή.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ένας προτεινόμενος αλγόριθμος σε Python για τη μέτρηση μικροαποστάσεων από εικόνες κάμερας ή μικροσκοπίου. Ο αλγόριθμος βασίζεται στη λογική ότι η εικόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετρητικό δεδομένο, εφόσον βαθμονομηθεί σωστά. Η απόσταση υπολογίζεται αρχικά σε pixels και στη συνέχεια μετατρέπεται σε μικρόμετρα μέσω του συντελεστή $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει λήψη εικόνας, προεπεξεργασία, επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος, εντοπισμό χαρακτηριστικών, υπολογισμό απόστασης, μετατροπή μονάδων και αποθήκευση αποτελεσμάτων. Παρουσιάστηκαν επίσης ενδεικτικά αποσπάσματα κώδικα Python για μέτρηση σε στατική εικόνα, χειροκίνητη επιλογή σημείων και αυτόματη παρακολούθηση μετατόπισης σε video.

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η μέτρηση μικροαποστάσεων με κάμερα και Python μπορεί να αποτελέσει μία ολοκληρωμένη, χαμηλού κόστους και εκπαιδευτικά χρήσιμη προσέγγιση. Με κατάλληλη βαθμονόμηση, σταθερό φωτισμό και σωστή επιλογή αλγορίθμου, μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις μικρομετρικής κλίμακας. Έτσι, το κεφάλαιο αυτό αναδεικνύει τη δική μας πρακτική συμβολή στην εργασία και προετοιμάζει το τελικό κεφάλαιο των συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη τεχνολογιών αισθητήρων και ηλεκτρονικών συστημάτων για τη μέτρηση αποστάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στη μικρομετρική κλίμακα. Η μέτρηση απόστασης αποτελεί βασικό πεδίο της σύγχρονης μετρολογίας, καθώς χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών, όπως η βιομηχανία, η ρομποτική, η μικροηλεκτρονική, η οπτική μετρολογία, η μικρομηχανική, τα συστήματα αυτοματισμού και οι πειραματικές διατάξεις υψηλής ακρίβειας.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι η μέτρηση απόστασης δεν αποτελεί ένα απλό πρόβλημα επιλογής αισθητήρα. Αντίθετα, είναι ένα ολοκληρωμένο πρόβλημα συστήματος, στο οποίο συμμετέχουν η φυσική αρχή μέτρησης, το αισθητήριο στοιχείο, τα αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά, η βαθμονόμηση, η επεξεργασία σήματος και ο τελικός αλγόριθμος υπολογισμού. Η ακρίβεια μιας μέτρησης εξαρτάται από όλα αυτά τα στάδια και όχι μόνο από τις προδιαγραφές του αισθητήρα.

Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάστηκαν οι βασικές κατηγορίες συστημάτων μέτρησης απόστασης. Αναλύθηκαν τεχνολογίες όπως οι υπερηχητικοί αισθητήρες, οι οπτικοί αισθητήρες, οι laser αισθητήρες, οι χωρητικοί αισθητήρες, οι επαγωγικοί αισθητήρες, οι αισθητήρες δινορρευσμάτων, τα RF/radar συστήματα και τα συστήματα κάμερας. Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Για παράδειγμα, οι υπερηχητικοί αισθητήρες είναι οικονομικοί και απλοί, αλλά δεν είναι κατάλληλοι για μικρομετρική ακρίβεια. Οι laser αισθητήρες προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και μη επαφική μέτρηση, αλλά επηρεάζονται από τις οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας. Οι χωρητικοί αισθητήρες μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλή ανάλυση, αλλά απαιτούν ελεγχόμενο περιβάλλον και σωστή ηλεκτρονική θωράκιση.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μικρομετρική κλίμακα, όπου οι απαιτήσεις είναι σημαντικά αυξημένες. Σε αυτή την κλίμακα, παράγοντες όπως ο θόρυβος, η θερμοκρασία, οι μηχανικές ταλαντώσεις, η παραμόρφωση φακού, η ακρίβεια βαθμονόμησης και η ανάλυση του αισθητήρα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα. Η μέτρηση μικροαποστάσεων απαιτεί σταθερή διάταξη, κατάλληλη βαθμονόμηση και προσεκτική επεξεργασία των δεδομένων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Micro-Epsilon. (n.d.). Precise sensors for distance, displacement and position measurements. Link: <https://www.micro-epsilon.com/distance-sensors/>
- [2] Micro-Epsilon Optronic. (n.d.). Displacement sensor. Link: <https://www.micro-optronic.com/service/glossar/Wegsensor.html>
- [3] Aerotech. (n.d.). Motion control with precision noncontact displacement sensors. Link: <https://www.aerotech.com/motion-control-with-precision-noncontact-displacement-sensors/>
- [4] Baumer. (n.d.). Functionality and technology of laser distance sensors. Link: https://www.baumer.com/int/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-optical-distance-sensors/a/Know-how_Function_optical-distance-sensors
- [5] Wenglor. (n.d.). Technology for laser sensors for distance measurement. Link: <https://www.wenglor.com/en/Technology-for-Laser-Sensors-for-Distance-Measurement/s/Technologie%2Bvon%2BLasersensoren%2Bzur%2BDistanzmessung>
- [6] Chen, X., Chen, Z., Liu, Z., & Li, Z. (2024). High-precision chromatic confocal technologies: A review. *Micromachines*, 15(10), 1224. <https://doi.org/10.3390/mi15101224>
- [7] Xu, Y., Brownjohn, J. M. W., Hester, D., & Koo, K. Y. (2018). A review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 91–110. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
- [8] Suragus. (n.d.). Displacement measurement. Link: <https://suragus.com/displacement-measurement/>
- [9] Micro-Epsilon. (n.d.). Laser triangulation. Link: <https://www.micro-epsilon.com/wiki/laser-triangulation/>
- [10] Wilson, J. S. (Ed.). (2005). *Sensor technology handbook*. Elsevier/Newnes.
- [11] Qiu, Z., Lu, J., Li, H., & Liu, Y. (2022). Review of ultrasonic ranging methods and their current challenges. *Micromachines*, 13(4), 520. <https://doi.org/10.3390/mi13040520>
- [12] ScienceDirect Topics. (n.d.). Ultrasonic sensor. Link: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ultrasonic-sensor>
- [13] Baumer. (n.d.). Functionality and technology of optical distance sensors. Link: https://www.baumer.com/int/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-optical-distance-sensors/a/Know-how_Function_optical-distance-sensors
- [14] Micro-Epsilon. (n.d.). Laser triangulation. Link: <https://www.micro-epsilon.com/wiki/laser-triangulation/>
- [15] MTI Instruments. (2017). Laser triangulation sensor principles. Link: <https://vitrek.com/mti-instruments/technology-principles/laser-triangulation-sensors/>

- [16] Lion Precision. (n.d.). Comparing capacitive and eddy-current sensors. Link: <https://www.lionprecision.com/comparing-capacitive-and-eddy-current-sensors/>
- [17] Design Products & Applications. (n.d.). Non-contact displacement sensors: A review. Link: <https://www.dpaonthenet.net/article.aspx?articleID=17901&redirect=1>
- [18] Baumer. (n.d.). Inductive distance sensors. Link: <https://www.baumer.com/us/en/product-overview/distance-measurement/inductive-distance-sensors/c/288>
- [19] Xu, Y., Brownjohn, J. M. W., Hester, D., & Koo, K. Y. (2018). A review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 91–110. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
- [20] Micro-Epsilon. (n.d.). Precise non-contact sensors. Link: <https://www.micro-epsilon.com/fileadmin/download/products/T001--en--precise-non-contact-sensors.pdf>
- [21] Aerotech. (n.d.). Motion control with precision noncontact displacement sensors. Link: <https://www.aerotech.com/motion-control-with-precision-noncontact-displacement-sensors/>
- [22] Micro-Epsilon. (n.d.). Laser triangulation. Link: <https://www.micro-epsilon.com/wiki/laser-triangulation/>
- [23] Wang, Y., Zhang, X., & Li, J. (2025). A review on recent advances in signal processing for optical interferometry. *Sensors*, 25(16), 5013. <https://doi.org/10.3390/s25165013>
- [24] Li, J., Chen, Z., & Liu, Y. (2024). High-precision chromatic confocal technologies: A review. *Micromachines*, 15(10), 1224. <https://doi.org/10.3390/mi15101224>
- [25] Liu, H., Zhang, Y., & Wang, C. (2024). Chromatic confocal precision measurement accuracy for rough surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*.
- [26] Physik Instrumente. (n.d.). Nanometer resolution: Capacitance sensors for nano-metrology. Link: <https://www.pi-usa.us/en/products/capacitive-sensors>
- [27] Lion Precision. (n.d.). Comparing capacitive and eddy-current sensors. Link: <https://www.lionprecision.com/comparing-capacitive-and-eddy-current-sensors/>
- [28] Zhu, C., Chen, Y., & Duan, D. W. (2022). Review of fiber optic displacement sensors. *IEEE Sensors Journal*, 22(9), 8262–8272.
- [29] Tian, Z., Yam, S. S.-H., & Loock, H.-P. (2021). Fiber-optic displacement sensor with 4 nm resolution. *Optics Letters*.
- [30] Tsao, C.-C., Cheng, Y.-C., & Chen, C.-H. (2022). Precision low-cost compact micro-displacement sensors with sub-micron accuracy. *Sensors*, 23(1), 220. <https://doi.org/10.3390/s23010220>
- [31] Baumer. (n.d.). Functionality and technology of optical distance sensors. Link: https://www.baumer.com/ca/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-optical-distance-sensors/a/Know-how_Function_optical-distance-sensors
- [32] Meskernel. (2025). Laser distance sensor working principle: ToF, phase shift, and triangulation. Link: <https://meskernel.net/en/laser-distance-sensor-working-principle/>

- [33] ams OSRAM. (2024). Time-of-flight measurement using pulse lasers. Link: <https://look.ams-osram.com/m/1aa92f824173f9d5/original/Time-of-flight-ToF-measurement-using-pulse-lasers.pdf>
- [34] MTI Instruments. (2017). Laser triangulation sensor principles. Link: <https://vitrek.com/mti-instruments/technology-principles/laser-triangulation-sensors/>
- [35] Omron. (2014). Displacement measurement sensors technical guide. Link: https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/56/displacement_measurement_tg%28overview%29.pdf
- [36] MTI Instruments. (2017). Laser triangulation sensor principles. Link: <https://vitrek.com/mti-instruments/technology-principles/laser-triangulation-sensors/>
- [37] Huang, G., Zhang, Y., & Liu, X. (2024). A review of optical interferometry for high-precision displacement measurement. *Micromachines*, 16(1), 6. <https://doi.org/10.3390/mi16010006>
- [38] Keyence. (n.d.). Laser displacement sensors. Link: <https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/>
- [39] Li, J., Chen, Z., & Liu, Y. (2024). High-precision chromatic confocal technologies: A review. *Micromachines*, 15(10), 1224. <https://doi.org/10.3390/mi151012>
- [40] Bhutani, A., Göttel, B., Lipp, S., Pauli, M., Scherr, S., Ayhan, S., Thomas, S., Jaeschke, T., & Zwick, T. (2019). The role of millimeter-waves in the distance measurement accuracy of an FMCW radar sensor. *Sensors*, 19(18), 3938. <https://doi.org/10.3390/s19183938>
- [41] Takamatsu, H., & συνεργάτες. (2025). Experimental analysis of accuracy and precision in millimeter-wave FMCW radar displacement sensing. *Applied Sciences*, 15(6), 3316. <https://doi.org/10.3390/app15063316>
- [42] Matheoud, A. V., Rassel, S., & Russer, P. (2019). Microwave inductive proximity sensors with sub-pm/Hz^{1/2} resolution. *Sensors and Actuators A: Physical*.
- [43] Ozbey, B., Karim, M. F., Unal, E., Ertugrul, H., Mahdi, M. A., & Ozbay, E. (2014). Wireless displacement sensing enabled by metamaterial probes for remote structural health monitoring. *Sensors*, 14(1), 1691–1704. <https://doi.org/10.3390/s140101691>
- [44] Xu, Y., Brownjohn, J. M. W., Hester, D., & Koo, K. Y. (2018). Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8, 91–110. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
- [45] Bai, X., Wang, J., & Zhang, Y. (2020). An advanced edge-detection method for noncontact structural displacement monitoring. *Sensors*, 20(17), 4941. <https://doi.org/10.3390/s20174941>

- [46] Tang, R., Chen, Z., & Zhang, Y. (2023). A comparative study of structural deformation test based on edge detection and digital image correlation. *Sensors*, 23(8), 3834. <https://doi.org/10.3390/s23083834>
- [47] Zhuang, Y., Chen, C., & Jiang, N. (2022). A review of computer vision-based structural deformation monitoring in field environments. *Sensors*, 22(10), 3789. <https://doi.org/10.3390/s22103789>
- [48] Koślik, K., Dudziński, D., & Krawczyk, M. (2023). Design of laboratory stand for displacement measurement of IPMC actuators using camera-based image analysis. *Sensors*, 23(3), 1271. <https://doi.org/10.3390/s23031271>
- [49] OpenCV. (n.d.). Camera calibration and 3D reconstruction. Link: <https://docs.opencv.org/>
- [50] Bai, X., Wang, J., & Zhang, Y. (2020). An advanced edge-detection method for noncontact measurement. *Sensors*, 20(17), 4941. <https://doi.org/10.3390/s20174941>
- [51] Tang, R., Chen, Z., & Zhang, Y. (2023). A comparative study of structural deformation test based on edge detection and digital image correlation. *Sensors*, 23(9), 4342. <https://doi.org/10.3390/s23094342>
- [52] Wang, M., Liu, Y., & Zhang, H. (2026). A robust subpixel refinement technique using self-adaptive fitting for vision-based displacement sensing. *Measurement*.
- [53] Ultralytics. (2025). YOLO26: Real-time object detection and segmentation. Link: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo26/>
- [54] Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- [55] OpenCV. (n.d.). Image processing in OpenCV. Link: <https://docs.opencv.org/>
- [56] Ma, Z., Brownjohn, J. M. W., & Wang, T. (2023). Structural displacement sensing techniques for civil infrastructures: A review. *Smart Construction and Sustainable Cities*, 1, 9. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00016-2>
- [57] Yang, K., Wang, H., & Li, S. (2025). Non-contact measurement of structural dynamic displacement based on improved edge detection and video frame interpolation. *Advances in Structural Engineering*.
- [58] Zhao, W., Li, Y., & Zhang, H. (2025). Semi-dense sub-pixel displacement measurement for vision-based structural monitoring. *Measurement*.