



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ
ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

ΑΛΕΞΑΚΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΣΟΦΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται λεπτομερής ανάλυση στις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, στο τομέα της ρομποτικής και στο πως τα ρομποτικά συστήματα βραχιόνων μπορούν να βοηθήσουν στην υλοποίηση των μη καταστροφικών ελέγχων. Αυτή η εργασία είναι χωρισμένη σε τρία μέρη.

Το πρώτο μέρος αρχίζει με αναφορά στη γενική έννοια των μη καταστροφικών ελέγχων και μετά σε κάθε κεφάλαιο του μέρους αναλύεται μια μέθοδος ως προς την ιστορία, τη μέθοδο και τα πεδία εφαρμογής τους. Αρχίζει με ανάλυση στον οπτικό έλεγχο και τις εφαρμογές του συμπεριλαμβανομένου και της χρήσης μηχανικής οράσεως για καλύτερη ανάλυση και λήψη αποτελεσμάτων. Μετά αναπτύσσεται η μέθοδος ραδιογραφίας μαζί με ιστορικό των ακτινών Χ και γάμμα, των ιδιοτήτων τους καθώς και τους κινδύνους και τρόπους προστασίας από την έκθεση ακτινοβολίας στους ανθρώπους. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους υπερήχους όσο αφορά τα είδη κυμάτων και τα χαρακτηριστικά τους. Μετά γίνεται αναφορά στη μέθοδο δινορευμάτων καθώς και τα εργαλεία μελέτης και την εφαρμογή της. Τέλος, στα τελευταία δύο κεφάλαια του πρώτου μέρους γίνεται σύντομη ανάλυση δύο οπτικών μεθόδων για επιφανειακές ατέλειες, τα διεισδυτικά υγρά και τα μαγνητικά σωματίδια αντιστοίχως, σχετικά με τη διαδικασία πράξης της μεθόδου.

Στο δεύτερο κομμάτι αναπτύσσεται ο τομέας της ρομποτικής, συγκεκριμένα οι βασικές έννοιες με ανάλυση στη κινηματική τους και στον έλεγχο εφαρμογών και θέσης τους. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε γνωστά είδη ρομποτικών βραχιόνων που έχουν κατασκευαστεί στο πεδίο αυτό καθώς και λιγότερο γνωστών συστημάτων. Το κάθε είδος ρομποτικού βραχίονα ξεχωρίζεται και αναλύεται βάσει του τρόπου λειτουργίας του, το πεδίο εργασίας τους και την εφαρμογή τους.

Στο τρίτο και τελευταίο κομμάτι γίνεται ανάλυση ως προς το πως τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να βοηθήσουν στη διευκόλυνση της διαδικασίας των μη καταστροφικών ελέγχων. Στην αρχή αναπτύσσονται θεωρητικά πορίσματα σχετικά με το πως κάθε ρομποτικό σύστημα μπορεί να διευκολύνει τη διαδικασία μελέτης και ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Και στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε εταιρίες που ήδη δουλεύουν στο πεδίο της ρομποτικής σε συσχέτισμό με τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο, αποδίδοντας παραδείγματα κατασκευών που βοηθάνε σε πιο ασφαλή και λεπτομερή έλεγχο εγκαταστάσεων.

ABSTRACT

The present diplomatic assignment gives an open analysis in methods of Non-Destructive Testing (NDT), the sector of robotics and the question of how articulated robotic systems can aid in implementing said methods of NDT. This assignment is split in three parts.

The first part begins with a general definition on Non-Destructive Testing, following with the next chapters analyzing different methods regarding any history, the implementation of the method and the fields of application. Beginning, the first chapter opens with optic analysis, regarding its appliance, including the use of engineered optic viewing, for a better assessment of analysis and results. Following it is a chapter based on Radiography along with a historical report on X-rays and gamma rays, along with their properties along with the dangers and measures of protection from radiation exposure on humans. The next chapter analyzes the method of Ultrasounds, regarding the different types of waves along with their properties. The fourth chapter opens about the Foucault currents (or Eddy waves), including the instruments used and the application of the method itself. Finally, the last two chapters provide a brief analysis on two alternative methods of optic analysis, the use of liquid penetrants and the use of magnetic particles respectively, specifically on the steps of the application of the method itself.

The second part develops the sector of robotics, specifically the general concept, analyzing the basis of kinetics along with application and position control. The following chapters include a breakdown of different types of existing articulated robotic systems that have been developed in the field of NDT as well as some lesser known systems. Every type of articulated robot is distinguished in the way it operates, their line of work and their responding application.

The third and final part analysis the topic of this assignment, regarding the way robotic systems can aid with easing the process of NDT. The first chapter opens with theoretical thoughts of the use of robotic systems in easing the process of NDT, regarding the methods themselves and the environment of application. Following afterwards is a brief report on companies, who operate in the field of robotics in combination with NDT, yielding examples of constructs that help with a safer and detailed testing of facilities.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μέρος Α. Εισαγωγή στο Μη Καταστροφικό Έλεγχο.....	8
Κεφάλαιο 1.1 Οπτικός Έλεγχος.....	9
1.1.1 Παράγοντες επιρροής στην ποιότητα των Ο.Ε.	9
1.1.1.1 Ανθρώπινη όραση.....	9
1.1.1.2 Οπτική Αντίθεση.....	9
1.1.2 Εφαρμογές Μεθόδου Ο.Ε.....	10
1.1.3 Μηχανοποιημένη Όραση.....	11
1.1.4 Σύνοψη.....	11
Κεφάλαιο 1.2 Ραδιογραφία.....	12
1.2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	12
1.2.2 Ακτίνες Χ.....	13
1.2.3 Ακτίνες Γάμμα.....	15
1.2.4 Χαρακτηριστικά των ιοντιζουσών ακτινοβολιών.....	16
1.2.4.1 Ένταση ακτινών Χ-γ.....	17
1.2.4.2 Απορρόφηση και Σκέδαση.....	18
1.2.4.3 Διεισδυτικότητα.....	19
1.2.4.4 Ιδιότητες Ακτινών Χ και γάμμα.....	20
1.2.5 Βασικές Αρχές και συστήματα Ραδιογραφίας.....	21
1.2.6 Παράμετροι Ραδιογραφίας.....	21
1.2.6.1 Ραδιογραφική Ευαισθησία.....	21
1.2.6.2 Αντίθεση Αντικειμένου (contrast).....	22
1.2.6.3 Αντίθεση Εικόνας (definition).....	22
1.2.6.4 Δευτερεύουσα Ακτινοβολία.....	22
1.2.7 Προβλήματα έκθεσης και προστασία.....	22
1.2.8 Σύνοψη.....	24
Κεφάλαιο 1.3 Υπέρηχοι.....	25
1.3.1 Είδη κυμάτων.....	25
1.3.1.1 Κύματα χώρου, διαμήκη και εγκάρσια.....	26
1.3.1.2 Καθοδηγούμενα ή Επιφανειακά κύματα (Rayleigh).....	26
1.3.2 Χαρακτηριστικά υπερηχητικών κυμάτων.....	27

1.3.2.1 Διάδοση τασικών κυμάτων.....	27
1.3.2.2 Διασπορά.....	28
1.3.2.3 Εξασθένηση.....	29
1.3.2.4 Απόσβεση.....	30
1.3.2.5 Σκέδαση.....	30
1.3.3 Σύνοψη.....	31
Κεφάλαιο 1.4. Δινορεύματα.....	31
1.4.1 Αρχή και λειτουργία δινορευμάτων.....	31
1.4.2 Διαδικασία ελέγχου με δινορεύματα.....	32
1.4.3 Βάθος διείσδυσης δινορευμάτων.....	35
1.4.4 Όργανα Μέτρησης και μελέτης.....	35
1.4.4.1 Αισθητήρες και πηνία.....	37
1.4.4.2 Πρότυπα δοκίμια αναφοράς.....	38
1.4.5 Έλεγχος μη-μαγνητικών αγώγιμων υλικών.....	38
1.4.6 Εφαρμογές μελέτης δινορευμάτων.....	39
1.4.6.1 Ανίχνευση Ρωγμών.....	39
1.4.6.2 Μέτρηση πάχους Υλικών.....	40
1.4.6.3 Μελέτη αγώγιμων επιστρώσεων σε αγώγιμη βάση.....	41
1.4.6.4 Έλεγχος αποκόλλησης.....	42
1.4.6.5 Έλεγχος σιδηρομαγνητικών υλικών.....	42
1.4.7 Σύνοψη.....	42
Κεφάλαιο 1.5 Διεισδυτικά υγρά.....	44
1.5.1 Βάσεις αρχής μεθόδου.....	44
1.5.2 Καταλληλότητα υλικών.....	44
1.5.3 Ιδιότητες των Δ.Υ.....	45
1.5.4 Εφαρμογή Μεθόδου.....	45
1.5.4.1 Καθαρισμός των Δ.Υ.	45
1.5.5 Διαδικασία μελέτης των Δ.Υ.	46
1.5.6 Σύνοψη.....	47
Κεφάλαιο 1.6 Έλεγχος με τη χρήση μαγνητικών σωματιδίων.....	48
1.6.1 Βασική Αρχή.....	48
1.6.2 Διαδικασία μεθόδου μελέτης.....	49
1.6.3 Απομαγνητισμός.....	50

1.6.4 Σύνοψη.....	50
Μέρος Β. Εισαγωγή στα ρομποτικά συστήματα.....	51
Κεφάλαιο 2.1 Αναπαράσταση και Λειτουργία των ρομποτικών συστημάτων.....	53
2.1.1 Ταξινόμηση των ρομποτικών συστημάτων.....	54
2.1.2 Η ακρίβεια και επαναληψιμότητα.....	56
2.1.3 Κινηματική ρομποτικών συστημάτων.....	57
2.1.3.1 Ευθεία κινηματική.....	58
2.1.3.2 Αντίστροφη κινηματική.....	59
2.1.3.3 Κινηματική ταχύτητας.....	61
2.1.4 Δυναμική.....	62
2.1.5 Έλεγχος Θέσης.....	62
2.1.6 Έλεγχος Δύναμης.....	62
2.1.7 Όραση.....	62
Κεφάλαιο 2.2 Αρθρωτά ρομποτικά συστήματα.....	63
2.2.1 Ανατομία αρθρωτών ρομπότ.....	63
2.2.2 Χρήση αρθρωτών ρομπότ.....	64
2.2.3 Επαγγελματική υπόθεση.....	65
2.2.4 Σύνοψη.....	66
Κεφάλαιο 2.3 Καρτεσιανά Ρομποτικά συστήματα.....	67
2.3.1 Σύνοψη.....	68
Κεφάλαιο 2.4 Κυλινδρικά Ρομποτικά συστήματα.....	69
2.4.1 Δομή και λειτουργία.....	69
2.4.2 Χρήση.....	70
2.4.3 Σύνοψη.....	71
Κεφάλαιο 2.5 Σφαιρικά ρομποτικά συστήματα.....	72
2.5.1 Σύνοψη.....	73
Κεφάλαιο 2.6 SCARA -- Selective Compliance Articulated Robot Arm (Αρθρωτός Ρομποτικός Βραχίονας Επίλεκτης Συμμόρφωσης).....	74
2.6.1 Σύνοψη.....	75
Κεφάλαιο 2.7 Ρ.Σ. Δέλτα.....	76
2.7.1 Δομή και σχεδιασμός.....	77
2.7.2 Εφαρμογές για Ρομπότ Δέλτα.....	78
Μέρος Γ.Η Υποστήριξη των ρομποτικών συστημάτων στη μελέτη ΜΚΕ.....	79

Κεφάλαιο 3.1 Η τεχνολογία των μη επανδρωμένων σκαφών.....	80
3.1.1 Η ανάπτυξη των UAV.....	80
3.1.2 Ταξινόμηση των UAV.....	81
3.1.3 Αντοχή και αξιοπιστία κατασκευής.....	83
3.1.4 Σύνοψη.....	84
Κεφάλαιο 3.2 Τομείς Διεργασιών μελετών ΜΚΕ με ΡΣ.....	88
3.2.1 Ανάπτυξη πορισμάτων συσχέτισης μελετών ΜΚΕ με ΡΣ.....	90
3.2.2 Σύνοψη.....	94
Κεφάλαιο 3.3 Η τεχνολογία του σήμερα.....	95
3.3.1 Οπτικός Έλεγχος.....	95
3.3.2 Ραδιογραφία.....	97
3.3.2.1. Εναέρια μη επανδρωμένα της Pacific Imagi.....	98
3.3.3 Υπέρηχοι.....	98
3.3.3.1 Ερπυστιοφόρα Eddyfi.....	100
3.3.3.2 Πλεονεκτήματα των συμβατικών δοκιμών με υπερήχους.....	100
3.3.4 Δινορεύματα.....	101

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κεφάλαιο 4 Βιβλιογραφία και πηγές εικονικών παραδειγμάτων.....	102
--	-----

Μέρος Α. Εισαγωγή στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) είναι οποιαδήποτε από ένα εύρος μεθόδων ανάλυσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία επιστήμης και τεχνολογίας με σκοπό την εξέταση της ακεραιότητας ενός υλικού, εξαρτήματος ή συστήματος χωρίς να προκληθεί μόνιμη ζημιά. Η ΜΚΕ είναι μια πολύτιμη τεχνική που μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα και χρόνο στην αξιολόγηση του προϊόντος, την αντιμετώπιση προβλημάτων και την έρευνα.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ΜΚΕ είναι δινορεύματα, μαγνητικά σωματίδια, διεισδυτικά υγρών, ακτινογραφικές, υπερηχητικές και οπτικές δοκιμές. Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται συνήθως στην ιατροδικαστική μηχανική, τη μηχανολογία, τη μηχανική πετρελαίου, την ηλεκτρική μηχανική, την πολιτική μηχανική, τη μηχανική συστημάτων, αεροναυπηγική μηχανική, ιατρική και τέχνη. Οι καινοτομίες στον τομέα των μη καταστροφικών δοκιμών είχαν βαθύ αντίκτυπο στην ιατρική απεικόνιση, συμπεριλαμβανομένης της καρδιογραφίας, του ιατρικού υπερηχογραφήματος και της ψηφιακής ακτινογραφίας.

Η οπτική επιθεώρηση (Visual Testing), η πιο συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδος ΜΚΕ, ενισχύεται αρκετά συχνά με τη χρήση μεγέθυνσης, σκελετών, καμερών ή άλλων οπτικών διατάξεων για άμεση ή απομακρυσμένη προβολή. Το εσωτερικό της δομής ενός δείγματος μπορεί να εξεταστεί με τη χρήση διεισδυτικής ακτινοβολίας, όπως ακτίνες Χ ή γάμμα. Στη μελέτη υπερήχων, χρησιμοποιούνται ηχητικά κύματα για μετρήσεις όγκου όπου το μηχανικό σήμα (ήχος) ανακλάται από τις συνθήκες στο αντικείμενο δοκιμής και αξιολογείται ως προς το πλάτος και την απόστασή του από τη μονάδα αναζήτησης (μορφοτροπέα). Άλλη ευρέως γνωστή μέθοδος ΜΚΕ που χρησιμοποιείται σε σιδηρούχα υλικά περιλαμβάνει την χρήση μικρών σωματιδίων σιδήρου (είτε αιωρούμενα σε υγρή είτε ξηρή σκόνη - φθορίζουσα ή έγχρωμη) που εφαρμόζονται σε ένα μέρος ενώ μαγνητίζεται, είτε συνεχώς είτε υπολειμματικά. Τα σωματίδια έλκονται σε σημεία διαρροής μαγνητικού πεδίου πάνω ή μέσα στο αντικείμενο δοκιμής και σχηματίζουν ενδείξεις στην επιφάνεια του αντικειμένου, οι οποίες αξιολογούνται οπτικά. Η αντίθεση και η πιθανότητα αντίχτυπου για μια οπτική εξέταση με γυμνό μάτι συχνά ενισχύονται με τη χρήση υγρών διείσδυσης στην επιφάνεια του αντικειμένου προς μελέτη, επιτρέποντας την οπτικοποίηση ελαττωμάτων ή άλλων συνθηκών επιφάνειας. Αυτή η μέθοδος (δοκιμή διεισδυτικού υγρού) (PL) περιλαμβάνει τη χρήση βαφών, φθορίζον ή έγχρωμο (συνήθως κόκκινο), αιωρείται σε υγρά και χρησιμοποιείται για μη μαγνητικά υλικά, συνήθως μέταλλα.

Κεφάλαιο 1.1 Οπτικός Έλεγχος

Ως οπτικό έλεγχο, εννοούμε την εξέταση ενός δοκιμίου για την εύρεση δομικών ατελειών χρησιμοποιώντας μόνο την όραση μας ή με κάποια άλλα μέσα υποστήριξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση και άλλων αισθήσεων. Ο Ο.Ε. αναπτύσσεται σε δύο βασικές διαδικασίες. Αρχικά γίνεται η έρευνα (κυρίως έλεγχος) και μετά είναι ο συνδυασμός γνώσεων και εμπειρίας του ελεγκτή ως προς τις κατεργασίες και γενικές συνθήκες του υλικού ώστε να αναγνωριστούν οι πραγματικές ασυνέχειες που αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα από τις μη σχετικές ενδείξεις. Ο Ο.Ε. υποβοηθηθεί όλες τις άλλες μεθόδους ΜΚΕ και είναι ο πιο βασικός με την έννοια ότι προηγείται οποιουδήποτε άλλου ελέγχου. Η αυτοματοποίηση της μεθόδου είναι εφικτή με τη χρήση ψηφιακών αισθητήρων. Τα χαρακτηριστικά προσδιορισμού κυμαίνονται στην παρουσία ασυνεχειών (π.χ. φθοράς, ρωγμών), τις διαστάσεις κατασκευής, συναρμολόγησης ή απλά συμμόρφωση με άλλους κανόνες (π.χ. χρώμα, ύπαρξη ετικέτας προϊόντος κλπ.)



Εικόνα 1.1 Επιθεώρηση του εσωτερικού ενός αγωγού με τη χρήση κάμερας.

1.1.1 Παράγοντες επιρροής στην ποιότητα των Ο.Ε.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ΟΕ είναι οι παρακάτω:

- Ποιότητα του ανιχνευτή
- Ο φωτισμός
- Δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων
- Το επίπεδο εκπαίδευσης και η προσοχή στη λεπτομέρεια.

1.1.1.1 Ανθρώπινη Όραση

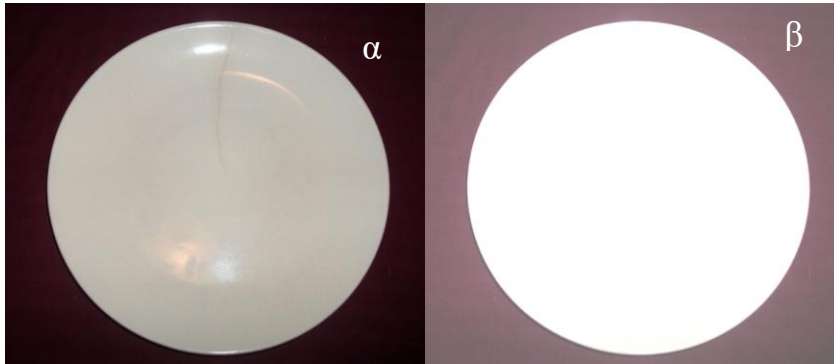
Μολονότι η μηχανική όραση χρησιμοποιείται πιο συχνά, η πλειονότητα των Ο.Ε. γίνεται με την ανθρώπινη όραση. Το πλεονέκτημα του ανθρώπινου ματιού είναι η ικανότητα να προσαρμόζεται άμεσα σε διαφορετικές συνθήκες. Ένα παράδειγμα είναι αν ο φωτισμός στο χώρο μειωθεί, ο άνθρωπος θα προσαρμοστεί, κάτι που δεν μπορεί να συμβεί με ένα μηχανικό σύστημα που βασίζεται σε ψηφιακή κάμερα. Από την άλλη πλευρά η μηχανική όραση είναι πιο γρήγορη και έχει σταθερή απόδοση ενώ ο ανθρώπινος ελεγκτής δεν μπορεί να διατηρήσει το ίδιο επίπεδο συγκέντρωσης για πολλή ώρα ή σε πολλές επαναλήψεις. Για αυτό το λόγο η μηχανική όραση χρησιμοποιείται σε γραμμές παραγωγής, όπου μεγάλος αριθμός τεμαχίων πρέπει να ελεγχθεί σε μικρό χρονικό διάστημα και οι συνθήκες είναι απολύτως ελεγχόμενες.

1.1.1.2 Αντίθεση

Η αντίθεση (contrast) είναι ένα μέτρο που καθορίζει πόσο ξεθωριασμένο μπορεί να είναι ένα αντικείμενο ώστε να μη διακρίνεται σε ένα ομοιόμορφο πεδίο. Έχει αποδειχθεί ότι η

μικρότερη ανιχνεύσιμη διαφοροποίηση (contrast) για το ανθρώπινο μάτι είναι 2% της κλίμακας του ασπρόμαυρου.

Πριν διεξαχθεί ο Ο.Ε. πρέπει να γίνεται έλεγχος των συνθηκών φωτισμού. Η ένταση φωτός μετράται σε «ποδοκηρία». Ένα ποδοκηρίο (foot-candle) είναι η ποσότητα φωτός που φτάνει σε απόσταση ενός ποδός από πηγή ενός κηρίου). Ο Ο.Ε. συνήθως απαιτεί φωτισμό τουλάχιστον 100 fc. Ο φωτισμός πρέπει να είναι επαρκής αλλά όχι υπερβολικός (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 Η σημασία της ανάγκης κατάλληλου φωτισμού. Η ρωγμή στο πιάτο φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα α) αλλά στην εικόνα β) υπάρχει υπερβολικός φωτισμός που καθιστά δύσκολο την καθαρή εμφάνιση της ρωγμής.

Πολλές φορές, ενώ η οπτική πληροφορία είναι συγκεκριμένη, υπάρχει περίπτωση ο ανθρώπινος εγκέφαλος να αδυνατεί να την επεξεργαστεί σωστά. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται καλό επίπεδο συγκέντρωσης και εμπειρία ώστε να αποφεύγονται τέτοιες καταστάσεις. Εξυπακούεται ότι ο ελεγκτής περνά από τακτικούς ελέγχους όρασης ώστε να εξακριβωθεί η κοντινή και μακρινή του όραση όπως και η ικανότητα διάκρισης χρωμάτων. Αντίστοιχα τεστ γίνονται και στην περίπτωση μηχανικής όρασης^[1].

1.1.2 Εφαρμογές Μεθόδου Ο.Ε.

Οι εφαρμογές του ΟΕ είναι πολλές και ποικίλες. Οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις:

- Ανίχνευσης επιφανειακών ασυνεχειών και αποχρωματισμών.
- Ανίχνευσης ρωγμών, πορώδους, διάβρωσης.
- Διαστασιολογικής συμμόρφωσης.
- Ανίχνευσης ξένων σωμάτων.
- Έλεγχου συναρμολόγησης.

Κατά βάση οι οπτικοί έλεγχοι γίνονται σε γέφυρες οδικών δικτύων. Η διαδικασία είναι χρονοβόρα, επειδή το μάτι του ελεγκτή πρέπει να περάσει όλη την εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Σε αποστάσεις πιο υψηλές από την επιφάνεια χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα ανύψωσης όπως γερανοί. Σκοπός είναι η εύρεση προβληματικών ενδείξεων όπως σημάδια αλάτων που σημαίνει ροή νερού μέσα από το σκυρόδεμα, σκουριά που υποδηλώνει διάβρωση οπλισμού και φυσικά ρωγμών και αποκολλήσεων.

Το 80% των μη καταστροφικών ελέγχων στην αεροπορική βιομηχανία γίνονται με οπτικούς ελέγχους. Τα εργαλεία που βοηθούν στη μελέτη είναι συνήθως κοινά ενώ δεν εξαιρούνται και τα πιο εξειδικευμένα. Ο χάρακας είναι το πιο συχνό εργαλείο μέτρησης ενώ για πιο υψηλή ακρίβεια υπάρχουν τα παχύμετρα και με ακρίβεια έως και 2,5 μm τα μικρόμετρα.

1.1.3 Μηχανοποιημένη όραση

Η τεχνολογία μηχανοποιημένης (μηχανικής) όρασης (Μ.Ο.) χρησιμοποιεί κάμερα και υπολογιστή συνοδευόμενο από ένα σύστημα λήψης αποφάσεων. Η Μ.Ο. εξαλείφει τη πιθανότητα σφάλματος του ανθρώπινου ελεγκτή λόγω κούρασης ή έλλειψης συγκέντρωσης και μπορεί να λειτουργεί όλη την ημέρα σε μια γραμμή παραγωγής. Η Μ.Ο. βασίζεται στα ακόλουθα βήματα:

- Καταγραφή εικόνας. Η εικόνα καταγράφεται σε ένα σύστημα και αποθηκεύεται σε ψηφιακή μορφή.
- Επεξεργασία εικόνας. Με τη χρήση εφαρμογών, ο υπολογιστής τα απολύτως σημαντικά στοιχεία της εικόνας.
- Εξαγωγή παραμέτρων. Ο επεξεργαστής ξεκαθαρίζει και καταμετρά τα κρίσιμα στοιχεία της εικόνας (π.χ. θέση οπών, προσανατολισμός τεμαχίου) και στέλνει τα δεδομένα στην κεντρική μονάδα.
- Απόφαση και τελικός έλεγχος. Το λογισμικό βγάζει τελική ετυμηγορία (που βρίσκονται οι οπές, είναι ο προσανατολισμός του δοκιμίου σωστός).

Όπως έχει αναφερθεί η Μ.Ο. χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές παραγωγής, όπου μεγάλος αριθμός τεμαχίων πρέπει να ελεγχθεί γρήγορα εφόσον υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες. Παραδείγματα είναι ο έλεγχος συναρμολόγησης, επιφανειακός έλεγχος για φθορές, πόρους, τραχύτητα, χρωματισμός, σωστή τοποθέτηση ετικετών σε τρόφιμα και φάρμακα, μέτρηση διαστάσεων.

1.1.4 Σύνοψη

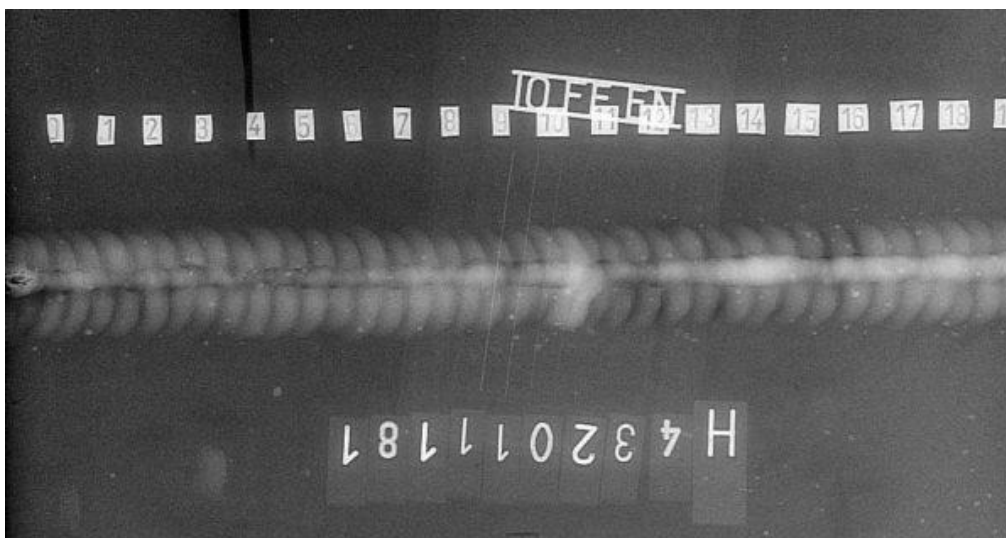
Σε πλεονεκτήματα οι οπτικές μέθοδοι:

- Πολύ ανοιχτό εύρος εφαρμογής
- Απλή εφαρμογή
- Χαμηλό κόστος
- Σχετικά γρήγορος έλεγχος
- Τα αποτελέσματα μπορούν να καταγραφούν σε μόνιμο αρχείο
- Δυνατότητα αυτοματοποίησης.

Αλλά σε μειονεκτήματα:

- Περιορίζεται κυρίως στις επιφανειακές ατέλειες
- Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται εμπειρία από τον χρήστη ενώ το αποτέλεσμα εξαρτάται από τις γνώσεις του χειριστή και την οπτική του οξύτητα.
- Η απόκτηση του απαραίτητου επιπέδου εμπειρίας μπορεί να είναι δύσκολη για έναν χειριστή.

Κεφάλαιο 1.2 Ραδιογραφία



Εικόνα 1.3 Ραδιογραφική μελέτη συγκόλλησης TIG.

Η ραδιογραφία είναι η μελέτη με χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής διεισδυτικότητας. Χρησιμοποιημένη σε ένα ευρύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών όπως οι συσκευές ακτινογραφίας στην ιατρική και εγκληματολογία ή σε συσκευές ασφάλειας για την δυνατότητα λήψης αναλυτικών αποτελεσμάτων, η ραδιογραφική απεικόνιση παραμένει μία από τις πιο γνωστές και ταυτόχρονα πιο εξειδικευμένες μεθόδους δειγματοληψίας και μελέτης.

Η μέθοδος βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία βραχέος μήκους κύματος (φωτόνια υψηλής ενέργειας) να διαπερνά σε διαφορετικό βαθμό τα υλικά. Η ποσότητα της εξερχόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από το πάχος διείσδυσης και την πυκνότητα του υλικού. Η ένταση της ακτινοβολίας αποτυπώνεται είτε σε ένα βιομηχανικό φιλμ το οποίο τοποθετείται πίσω από το δοκίμιο ελέγχου, ή σε μια επίπεδη σειρά ευαίσθητων στην ακτινοβολία αισθητήρων. Η ραδιογραφική απεικόνιση, η οποία είναι ανάλογη του βαθμού απορρόφησης της ακτινοβολίας από το υπό έλεγχο δοκίμιο, είναι μια μέθοδος ανίχνευσης ατελειών στο εσωτερικό των υλικών.

1.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ακτινοβολία ανακαλύφθηκε πρώτα το 1895 από τον φυσικό Wilhelm Conrad Roentgen όταν, κατά τη διάρκεια πειραμάτων, χρησιμοποίησε ένα σωλήνα κενού καλυμμένο με μαύρο χαρτί φωτογραφίας και παρατήρησε φθορισμό σε ένα πίνακα επιστρωμένο με κρυστάλλους βαρίου με κυανιούχο λευκόχρυσο. Παρατήρησε επίσης ότι όταν μείωνε την απόσταση του σωλήνα από τον πίνακα, ο φθορισμός αυξανόταν, κάτι που συνειδητοποίησε ότι η ακτινοβολία πήγαζε από τον σωλήνα. Αργότερα άρχισε να λαμβάνει τις πρώτες ακτινογραφίες, με τη πρώτη να είναι αυτή του χεριού της συζύγου του (Εικόνα 1.4). Στην αρχή, αποκαλούσε την ακτινοβολία ως 'φως X' μέχρι το 1900 που θεμελιώθηκε ως ακτίνες X.

Ενώ κάποιες εργασίες συνέχισαν, η σημασία των ακτίνων X για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών δεν έγινε πλήρως γνωστή, ούτε η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε ευρέως, μέχρι τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η σημασία της βιομηχανικής ραδιογραφίας αντικατοπτρίζεται

στο παλαιότερο όνομα της Αμερικάνικης Εταιρείας Μη Καταστροφικού ελέγχου (American Society for Non Destructive Testing – ASNT) που ιδρύθηκε το 1941 υπό το όνομα Αμερικανική Εταιρεία Βιομηχανικού Ραδίου και ακτινών X (The American Industrial Radium and X-ray Society). Οι εξελίξεις λόγω του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου οδήγησαν σε σημαντικές καινοτομίες και εφευρέσεις στον ακτινογραφικό εξοπλισμό ώστε να παράγει περισσότερο έντονες δέσμες και υψηλότερες ενέργειες^[1].

Μετά, κατά τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, το ζεύγος Curie ανακάλυψε ένα μέταλλευμα παρόμοιο με το ουράνιο που απέδιδε ακτινοβολία αλλά περιείχε και άλλα στοιχεία ραδιενέργειας. Το υλικό το ονόμασαν πολώνιο. Λίγο καιρό αργότερα, άρχισαν να χρησιμοποιούν τον όρο “ραδιενέργεια” για να χαρακτηρίζουν τα υλικά που αποδίδουν ακτινοβολία και κατά τα τέλη το 1898 απέδειξαν την ύπαρξη ενός υλικού χημικά σχεδόν ίδιο με το καθαρό βάριο και το ονόμασαν ράδιο. Οι ακτίνες γ βασίστηκαν στην αρχή στο ράδιο ως πηγή. Από τότε μέχρι σήμερα, έχουν ανακαλυφθεί και άλλες πηγές, με το Ιρίδιο 192 και το Κοβάλτιο 60 να είναι κυρίαρχες στις πηγές παραγωγής ακτινών γ.

1.2.2 Ακτίνες X

^[2]Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής ακτινών X είναι μέσω της επιτάχυνσης ηλεκτρονίων από δυναμικό τάξης μεγέθους των δεκάδων χιλιάδων βολτ και την πρόσπτωσή τους σε στόχο ο οποίος αποτελείται από μεταλλικό υλικό μεγάλου ατομικού αριθμού, συνήθως βολφράμιο ή μολυβδαίνιο για τις ακτινογραφίες. Τα ηλεκτρόνια προσπίπτοντας στο στόχο χάνουν σταδιακά την ενέργεια τους, εφ' όσον υφίστανται επιβραδύνσεις από τα άτομα του υλικού του στόχου. Εντούτοις η ενέργεια που αποδίδουν στα άτομα του στόχου είναι αρκετή για να διεγείρει και ηλεκτρόνια των εσωτερικών στιβάδων των ατόμων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η συμπλήρωση των στιβάδων αυτών από ηλεκτρόνια υψηλότερων ενεργειακά στιβάδων και έτσι παράγονται τα φωτόνια των ακτινών X.



Εικόνα 1.4 Η πρώτη ακτινογραφία που απεικονίζει το χέρι της συζύγου του Wilhelm Roentgen.

Επειδή τα ηλεκτρόνια που έχουν επιταχυνθεί αρχικά εναποθέτουν συγκεκριμένες τιμές ενέργειας στα άτομα του στόχου, το φάσμα που προέρχεται από την αυτοδιέγερση και συμπλήρωση των στιβάδων των ατόμων του μεταλλικού στόχου, είναι γραμμικό. Υπάρχει όμως και ένα συνεχές τμήμα του φάσματος των ακτινών X το οποίο προέρχεται από τη λεγόμενη ακτινοβολία πέδησης (*Bremsstrahlung*) που δίνεται από τα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει κοντά στον μεγάλου ατομικού αριθμού πυρήνα. Οι ακτίνες X διοχετεύονται από έναν αγωγό ακτινών X, ένας αγωγός κενού που παράγει υψηλή τάση που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που αποδίδονται από μια θερμοϊονική κάθοδο σε υψηλή ταχύτητα. Τα υψηλής ταχύτητας ηλεκτρόνια προσπίπτουν με το μεταλλικό στόχο, την άνοδο, δημιουργώντας τις ακτίνες X.

Στην ιατρική, ο στόχος είναι φτιαγμένος από βολφράμιο ή από ένα κράμα με 95% βολφράμιο και 5% ρήνιο που έχει μεγαλύτερη αντίσταση στις ρωγμές με αρκετές φορές να

χρησιμοποιείται μολυβδαίνιο σε ειδικές περιπτώσεις όπως σε ήπιες ακτινογραφίες για κυοφορούσες γυναίκες. Στη κρυσταλλογραφία εκμεταλλεύεται ο χαλκός για στόχο με αρκετές φορές να γίνεται χρήση κοβάλτιου όταν υπάρχουν ψήγματα σιδήρου στο δείγμα διαφορετικά θα παρουσιαστούν προβλήματα.

Η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια των φωτονίων ακτινών X είναι περιορισμένη από την ενέργεια των προσπίπτων ηλεκτρονίων, που είναι ίση με την τάση στα άκρα του αγωγού επί την φόρτιση των ηλεκτρονίων, οπότε ένας αγωγός φορτισμένος στα 80 kV δεν μπορεί να παράγει ακτίνες X με ενέργεια μεγαλύτερη των 80 keV.

Όταν τα ηλεκτρόνια χτυπάνε το στόχο, οι ακτίνες X παράγονται με δύο ατομικές διαδικασίες:

- i. Χαρακτηριστική εκπομπή (ή φωτοβολία ηλεκτρονίων): Αν το ηλεκτρόνιο έχει αρκετή ενέργεια, θα 'σπρώξει' ένα ηλεκτρόνιο που περιφέρεται σε τροχιά, μακριά από την ηλεκτροστιβάδα του στοχευόμενου ατόμου. Μετά, τη θέση τους παίρνουν τα υψηλότερης ενέργειας ηλεκτρόνια και παράγουν φωτόνια ακτινών X. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί ένα φάσμα εκπομπής σε διακριτές συχνότητες, που συχνά αναφέρονται ως φασματικές γραμμές. Συνήθως γίνονται μεταβάσεις από τα ανώτερα κελύφη στα αντίστοιχα K και L. Αν η μετάβαση είναι από 2p σε 1s, τότε λέγεται μετάβαση K_α, ενώ αν είναι από 3p σε 1s είναι μετάβαση K_β. Η συχνότητα αυτών των γραμμών βασίζεται στο υλικό του στόχου και επομένως ονομάζονται χαρακτηριστικές γραμμές.

Υλικό Ανόδου	Ατομικός Αριθμός	Ενέργεια Φωτονίων [keV]		Μάκρος Κύματος [nm]	
		K _α	K _β	K _α	K _β
W	74	59.3	67.2	0.0209	0.0184
Mo	42	17.5	19.6	0.0709	0.0632
Cu	29	8.05	8.91	0.1540	0.1390
Ag	47	22.2	24.9	0.0559	0.0497
Ga	31	9.25	10.26	0.1340	0.1210
In	49	24.2	27.3	0.0512	0.4550

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικές γραμμές εκπομπής για κάποια κοινά υλικά ανόδου.

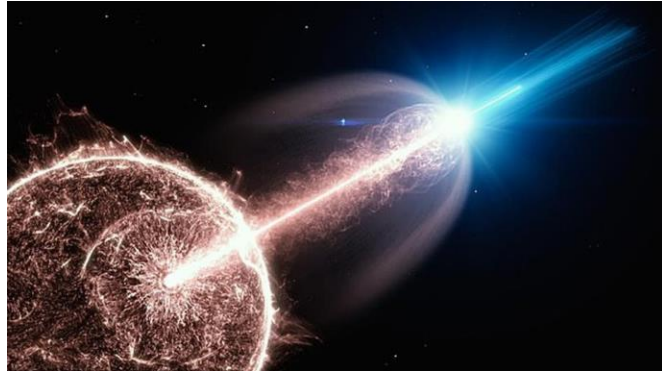
Η γραμμή K_α είναι προτιμότερη εξαιτίας της έντασής της που είναι μεγαλύτερη από αυτή της γραμμής K_β που την κάνει από επιθυμητή σε πειράματα περίθλασης. Έτσι η γραμμή K_β φιλτράρεται εκτός του φάσματος με τη χρήση φίλτρου. Το φίλτρο αυτό φτιάχνεται από ένα μέταλλο το οποίο έχει ένα πρωτόνιο λιγότερο από το υλικό της ανόδου, δηλαδή Νικέλιο (Ni) για άνοδο Χαλκού (Cu) ή Νιόβιο (Nb) για άνοδο Μολυβδαίνιου (Mo).

- ii. Bremsstrahlung (ακτινοβολία Brems): Είναι η ακτινοβολία που αποδίδουν τα ηλεκτρόνια όταν είναι διάσπαρτα από το ηλεκτρικό πεδίο κοντά στο πυρήνα του υψηλού-Z. Οι παραγόμενες ακτίνες X έχουν συνεχές φάσμα. Η συχνότητα της ακτινοβολίας Brems περιορίζεται από την ενέργεια των προσπίπτων ηλεκτρονίων.

Έτσι η συνολική παραγωγή ενός αγωγού που διαρρέεται από ακτινοβολία Brems συνεχούς φάσματος χαμηλώνει στο μηδέν στην τάση του αγωγού και επιπλέον δημιουργούνται 'αναπηδήσεις' στη χαρακτηριστική γραμμή.

1.2.3 Ακτίνες γάμμα

Η ακτινοβολία γάμμα είναι μια διατρητική μορφή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δημιουργείται από την ραδιενεργή διάσπαση ατομικών πυρήνων. Τα μήκη ηλεκτρομαγνητικού κύματος που παράγει είναι μικρότερα μέχρι και από τα κύματα των ακτινών X. Με συχνότητες να ξεπερνάμε τα 30 εξahertz ($30 * 10^{18}$ Hz), η ενέργεια φωτονίων που παράγεται είναι η μεγαλύτερη καταγεγραμμένα^[3].



Εικόνα 1.5 Έκρηξη κοσμικής ακτινοβολίας στο διάστημα

Οι ακτινοβολία γάμμα ανακαλύφθηκε το 1900 από τον Γάλλο φυσικοχημικό Paul Villard, όταν μελετούσε την ραδιενέργεια που απέδιδε το στοιχείο Ράδιο (Ra). Κατά το 1903 ο φυσικός Ernest Rutherford ονόμασε την ακτινοβολία γάμμα βάσει της υψηλής υλικής διεισδυτικότητάς της. Ο ίδιος ονόμασε και τις άλλες δύο μορφές ακτινοβολίας, τότε ανακαλυφθέντες από τον Henri Becquerel, την ακτινοβολία άλφα και βήτα σε αύξουσα θέση βάσει της διεισδυτικής τους ικανότητας.

Στην επίγεια φύση, η ακτινοβολία γάμμα είναι αποτέλεσμα διάσπασης ραδιοϊσοτόπων και δευτερεύον ακτινοβολίας όταν έρχεται σε επαφή στην ατμόσφαιρα με σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας. Υπάρχουν και άλλες φυσικές αλλά σπάνιες πηγές που δημιουργούν ακτινοβολία γάμμα όπως ο 'σκοτεινός κεραυνός', που παράγει τέτοια ακτινοβολία όταν τα ηλεκτρόνια δράνε πάνω στον ραδιοπυρήνα. Αξιοσημείωτες είναι και οι τεχνητές μορφές παραγωγής που περιλαμβάνουν τη διαδικασία σχάσης, που συμβαίνει στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και υψηλής ενέργειας πειράματα φυσικής όπως στη αποσύνθεση ποινών ή στη πυρηνική τήξη.

Η ακτινοβολία γάμμα που δημιουργείται από διάσπαση ραδιοϊσοτόπων, που βρίσκεται στο εύρος ενέργειας φωτονίων από 100 keV (κιλοηλεκτροβόλτ), μεγαλύτερη από ότι το προσεγγιστικό μέγιστο των ακτινών X, μέχρι και 8 MeV (μεγαηλεκτροβόλτ), ανάλογα με τα επίπεδα ενέργειας των πυρήνων με σχετικά υψηλή διάρκεια ζωής. Το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας γάμμα χρησιμοποιείται για την εύρεση ραδιενεργών πυρήνων με τη χρήση της φασματοσκοπίας γάμμα. Υπερύψηλης ενέργειας ακτινοβολία γάμμα, στο εύρος των 100 με 1000 TeV (τεραηλεκτροβόλτ), έχουν παρατηρηθεί από πηγές όπως το Cygnus X-3 microquasar.

Με παρατεταμένη χρήση στο χρόνο όμως, τα ραδιοϊσότοπα αρχίζουν να χάνουν την ενεργότητά τους (activity). Η ενεργότητα χαρακτηρίζει ως η ποσότητα της ραδιενέργειας ενός στοιχείου και ορίζεται ως ο αριθμός των πυρήνων που διασπώνται ανά μονάδα χρόνου. Δηλαδή, η ενεργότητα είναι η δυνατότητα παραγωγής ακτινοβολίας από μια καθορισμένη ποσότητα υλικού. Για τα ραδιενεργά υλικά χρησιμοποιείται ο όρος χρόνος ημιζωής για να καθορίσει το χρόνο που θα χρειαστεί για το υλικό να μειωθεί στο μισό της ενεργότητάς του. Η ενεργότητα μετράται σε μονάδες Ci (Curie) ή Bq (Becquerel). Ένα Ci είναι ίσο με $3,7 * 10^{10}$ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο ενώ ένα Bq είναι ίσο με μία διάσπαση το δευτερόλεπτο. Για παράδειγμα, μια πηγή Ιριδίου 192 έχει αρχική ενεργότητα 100 Ci με χρόνο ημιζωής 75 ημέρες. Αυτό σημαίνει ότι σε τόσες ημέρες η ενεργότητα θα μειωθεί στα 50 Ci και μετά από μια ακόμα περίοδο ημιζωής, θα πέσει στα 25 Ci και μετά στα 12.5 Ci μέχρι να έχει φτάσει στο σημείο να μην αποδίδει πολλή

ακτινοβολία. Το ιρίδιο 192 εκπέμπει ακτινοβολία γάμμα στα 310 KeV, 470 KeV και 600 KeV, ενώ το κοβάλτιο 60 εκπέμπει σε δυο διακριτές ενέργειες ακτινοβολίας γάμμα, 1,17 και 1,33 MeV. Έχοντας υψηλότερη ενέργεια, οι πηγές κοβαλτίου 60 χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο παχύτερων και μεγαλύτερης πυκνότητας υλικών^[1].

Η εξίσωση 1.1 παρακάτω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό ενεργότητας ενός ραδιενεργού υλικού με γνωστό χρόνο ημιζωής μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Η εξίσωση υπολογίζει το κλάσμα διάσπασης, δηλαδή το εναπομένον τμήμα της αρχικής ενεργότητας:

$$f_D = \frac{A}{A_0} = (0.5)^{\frac{t}{L_H}} \quad (1.1)$$

Όπου:

f_D : κλάσμα διάσπασης (δηλ. εναπομένον τμήμα ενεργότητας A, της αρχικής ενεργότητας A_0)

L_H : χρόνος ημιζωής (σε ώρες, ημέρες, έτη, κλπ.)

t : χρόνος που παρήλθε (σε ώρες, ημέρες, έτη, κλπ.)

Η ειδική ενεργότητα μιας πηγής εκφράζεται σε Ci (Curie) ανά γραμμάριο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των Ci για ένα φυσικό μέγεθος πηγής, τόσο υψηλότερη είναι η ειδική ενεργότητα της πηγής^[1]. Το πλεονέκτημα μια πηγής υψηλής ενεργότητας είναι η βελτίωση της ανάληψης. Σε σχέση με τις ακτίνες X, οι ακτίνες γ έχουν μεγαλύτερη ενέργεια. Γι' αυτό το λόγο οι ακτίνες γ μπορούν να διεισδύουν μέσα από υλικά μεγάλου πάχους σε μικρό χρόνο έκθεσης. Το πρόβλημα με τέτοιες πηγές όμως είναι ότι είναι ενεργές συνέχεια, γεγονός που καθιστά αναγκαία την προσεκτική μεταχείριση της πηγής.

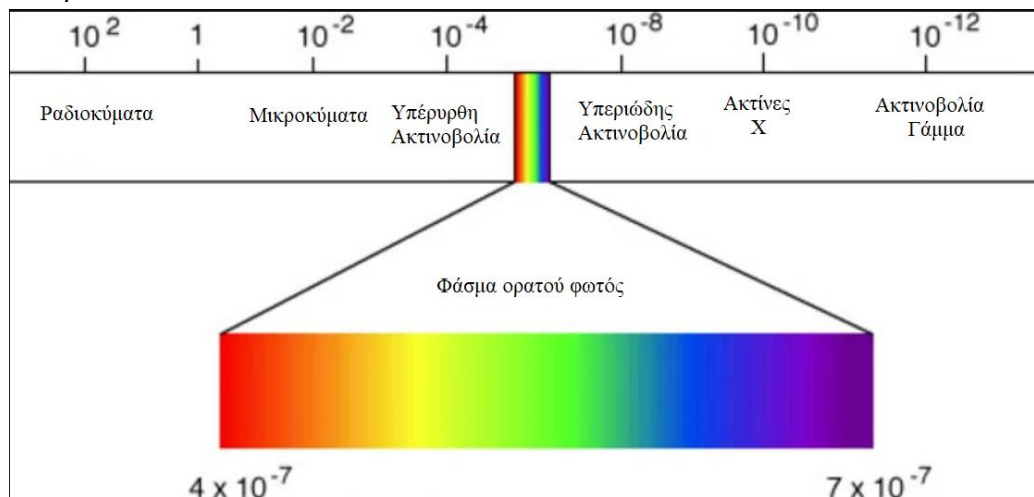
Το μέγεθος ενός ραδιενεργού υλικού διαφέρει μεταξύ κατασκευαστών βάσει της επιθυμητής ενεργότητας, αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται σβόλοι διαστάσεων 1,5 mm x 1.5 mm. Οι σβόλοι αυτοί τοποθετούνται σε μια ασφάλινη κάψουλα η οποία μετέπειτα σφραγίζεται με συγκόλληση. Μετά αυτή η κάψουλα στεγάζεται σε ένα θωρακισμένο δοχείο που λέγεται κάμερα-γ. Τα δοχεία στεγανοποίησης συνήθως φτιάχνονται από απεμπλουτισμένο ουράνιο ή άλλα υλικά που λειτουργούν ως μονωτές ραδιενέργειας και σε διαφέρουν σε συνολικό βάρος ανάλογα με τη πηγή των ακτινών γ. Για παράδειγμα συσκευές ακτινών γ που εκμεταλλεύεται το Ιρίδιο-192 έχει έως 10 φορές μικρότερη θωράκιση σε σχέση με μια συσκευή που χρησιμοποιεί το Κοβάλτιο-60. Για αυτό το λόγο, οι συσκευές κοβαλτίου, χρησιμοποιούνται για μακροπρόθεσμες μελέτες σε εγκαταστάσεις.

1.2.4 Χαρακτηριστικά των ιοντίζουσών ακτινοβολιών.

Η ιοντίζουσα ακτινοβολία αποτελείται από υποατομικά σωματίδια ή ηλεκτρομαγνητικά κύματα που έχουν επαρκή ενέργεια για να ιοντίσουν άτομα ή μόρια αποσπώντας ηλεκτρόνια από αυτά. Ορισμένα σωματίδια μπορούν να ταξιδέψουν έως και το 99% της ταχύτητας του φωτός και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα βρίσκονται στο κομμάτι υψηλής ενέργειας του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

Οι ακτίνες γάμμα, οι ακτίνες X και το υπεριώδες κομμάτι υψηλής ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι ιοντίζουσα ακτινοβολία, ενώ το χαμηλότερης ενέργειας υπεριώδες, το ορατό φως, σχεδόν όλα τα είδη λέιζερ, υπέρυθρες, τα μικροκύματα και τα ραδιοκύματα είναι μη ιοντίζουσα ακτινοβολία. Το όριο μεταξύ ιοντίζουσας και μη ιοντίζουσας

στην υπεριώδης περιοχή δεν είναι καθορισμένο, καθώς διαφορετικά μόρια και άτομα ιονίζονται σε διαφορετικές ενέργειες. Η ενέργεια της ιοντίζουσας ακτινοβολίας ξεκινά ανάμεσα στα 10 ηλεκτροβόλτ (eV) και 33 eV. Η ιοντίζουσα ακτινοβολία δεν είναι άμεσα ανιχνεύσιμη από τις ανθρώπινες αισθήσεις, επομένως όργανα όπως οι μετρητές Geiger χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τη μέτρησή τους. Ωστόσο, τα σωματίδια υπερύψλης ενέργειας μπορούν να παράγουν ορατά αποτελέσματα τόσο στην οργανική και στην ανόργανη ύλη μέχρι και στον άνθρωπο.



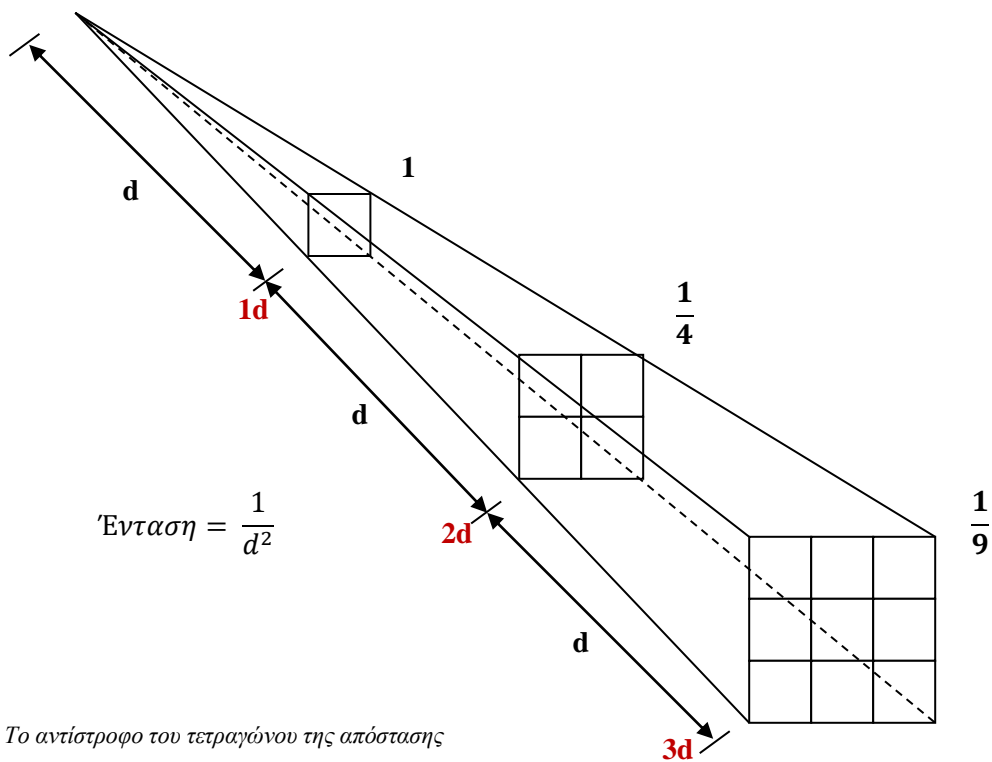
Εικόνα 1.6 Το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ισχύουν για τις ακτίνες X και γάμμα, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών.

1.2.4.1 Ένταση Ακτινών X-γ

Η ένταση της ακτινοβολίας είναι η ποσότητα ενέργειας που διαπερνά μια συγκεκριμένη περιοχή του δοκιμίου που είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας στη μονάδα χρόνου και ορίζεται ως το σύνολο των σωματιδίων ή φωτονίων που περνούν από μια επιφάνεια εμβαδού ενός τετραγωνικού εκατοστού σε ένα δευτερόλεπτο. Μία μέθοδος μέτρησης της έντασης είναι να εκτιμηθεί η ποσότητα ιοντισμού που συμβαίνει στην ατμόσφαιρα. Όταν ο αέρας ιοντίζεται από ακτινοβολία, γίνεται έκθεση (exposure). Η έκθεση μετρείται με τη παλαιά μονάδα Roentgen (R), η οποία ορίζεται ως το ηλεκτρικό φορτίο που απελευθερώνεται από μια πηγή ακτινοβολίας σε καθορισμένο όγκο αέρα δια την μάζα αυτού του αέρα.

Η ένταση ακτινοβολίας μειώνεται στο αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ της πηγής και το σημείο έκθεσης. Δηλαδή, όσο πιο μεγάλη η απόσταση, τόσο πιο μικρή θα είναι και η ένταση της ακτινοβολίας, και μάλιστα σημαντικά μικρή. Αυτό οφείλεται στη γεωμετρική θεώρηση σύμφωνα με την οποία κάθε σημειακή πηγή η οποία εκπέμπει εξίσου σε όλες τις κατευθύνσεις και χωρίς περιορισμό εμβέλειας, θα υπακούσει στο νόμο του αντίστροφου τετραγώνου της απόστασης.



Σχήμα 1.1 Το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης

Αναλυτικά η απόσταση και η ένταση σχετίζονται ως εξής

$$I_2 = I_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (1.2)$$

όπου, I_1 και I_2 είναι οι εντάσεις στις αποστάσεις d_1 και d_2 από την πηγή, αντιστοίχως. Δηλαδή όταν η απόσταση του προς μελέτη δοκιμίου διπλασιάζεται, η ένταση της ακτινοβολίας θα μειωθεί στο ένα τέταρτο.

1.2.4.2 Απορρόφηση και Σκέδαση

Όταν οι ακτίνες X ή γ διαπερνούν ένα υλικό, εξασθενούν επειδή ένα μέρος απορροφάται ή σκεδάζεται όταν η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τα σωματίδια του υλικού. Η απορρόφηση γίνεται με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους, όλοι εκ των οποίων συνυπολογίζονται στην εξασθένιση της ακτινοβολίας.:

- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο,
- Η σκέδαση Rayleigh (συνεισφέρει στο 20% περίπου της συνολικής εξασθένισης),
- Η σκέδαση Compton (άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ φωτονίων ενέργειας και των ηλεκτρονίων στα άτομα του υλικού), και
- Η παραγωγή ζευγών φωτονίων.

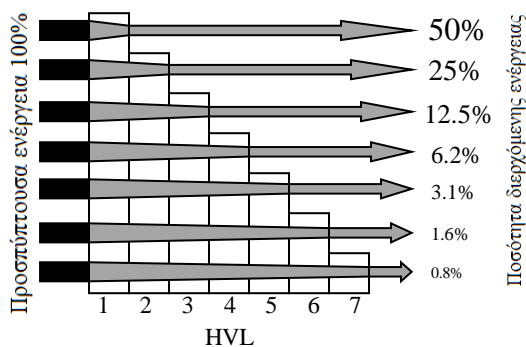
Το σύνολο των φωτονίων που διαπερνούν ένα υλικό βασίζεται στο πάχος, τη πυκνότητα και τον ατομικό αριθμό του υλικού, συμπεριλαμβανομένης και της ενέργειας των μεμονωμένων φωτονίων. Επειδή όμως τα φωτόνια αλληλεπιδρά με τα σωματίδια της ύλης όταν η συνολική απόσταση είναι μεγάλη, το σύνολο των φωτονίων που θα διαπεράσει το υλικό μειώνεται εκθετικά βάσει της απόστασης όπως αναφέρεται στην εξίσωση 1.3.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.3)$$

Όπου $e = 2.7$, I_0 η αρχική ένταση της ακτινοβολίας, μ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης ανά μονάδα απόστασης και x η απόσταση διάνυσης ακτινοβολίας.

1.2.4.3 Διεισδυτικότητα

Εξαιτίας του βραχέος μήκους κύματος, οι ακτίνες X και γ διεισδύουν πιο βαθιά στο υλικό που μελετάται. Η δυνατότητα διεיסδυσης μετράται βάσει του πάχους υποδιπλασιασμού HVL (Half-Value-Layer). Το πάχος υποδιπλασιασμού ορίζεται ως το πάχος του υλικού που χρειάζεται για να μειωθεί η ένταση της διεισδύουσας ακτινοβολίας κατά 50% κάθε φορά. Η τιμή του πάχους εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας μαζί με τον τύπο και το πάχος του υλικού.



Σχήμα 1.2 Αναπαράσταση της επιρροής του πάχους υποδιπλασιασμού στο ποσοστό διεיסδυσης ακτινοβολίας σε ένα υλικό.

Η τιμή του HVL χρησιμοποιείται συχνά επειδή είναι πιο εύκολο για κάποιον να θυμάται έτοιμες τιμές για απλούς υπολογισμούς. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, ένα πάχος HVL αρκεί για να εξασθενίσει την ένταση της ακτινοβολίας στο μισό, οπότε δύο τέτοια πάχη θα το μειώσουν 4 φορές και ούτω κάθε εξής. Ένα παράδειγμα είναι ο υπολογισμός του πάχους θωράκισης, αν η ζητούμενη διεισδύουσα τελική ακτινοβολία είναι στο 1% της αρχικής τιμής της πηγής. Ο λόγος μείωσης της έντασης υπολογίζεται από ένα συγκεκριμένο πάχος υλικού προς την τιμή του HVL, την οποία γνωρίζουμε, ή όπως αναλύεται στην εξίσωση παρακάτω:

$$r = \frac{I}{I_0} = 0.5^{\frac{\text{Πάχος}}{\text{HVL}}} \quad (1.4)$$

Στους παρακάτω Πίνακες 1.2 και 1.3 δίνονται προσεγγιστικά οι τιμές του HVL για κάποια υλικά για μείωση ακτινοβολίας που προέρχεται από πηγή ακτινών X και γ, αντιστοίχως.

Τάση Λυχνίας (kVp)	HVL (mm)	
	Μόλυβδος	Σκυρόδεμα
50	0,06	4,32
100	0,27	15,10
150	0,30	22,32
200	0,52	25,00
250	0,88	28,00
300	1,47	31,21
400	2,50	33,00
1000	7,90	44,45

Πίνακας 1.1 Τιμές του HVL για μόλυβδο και σκυρόδεμα, υλικά που μειώνουν την ακτινοβολία των ακτινών X.

Πηγή	HVL (mm)				
	Σκυρόδεμα	Χάλυβας	Μόλυβδος	Βολφράμιο	Ουράνιο
Ιρίδιο-192	44,5	12,7	4,8	3,3	2,8
Κοβάλτιο-60	60,5	21,6	12,5	7,9	6,9

Πίνακας 1.2 Τιμές του HVL, για υλικά που μειώνουν την ακτινοβολία που προέρχεται από πηγή ακτινών γάμμα.

1.2.4.4 Ιδιότητες Ακτινών X και γάμμα

Οι ιδιότητες των ακτινών X και γάμμα χαρακτηρίζονται ως εξής:

- **Δεν διαθέτουν ηλεκτρικό φορτίο ή μάζα.** Μπορούν να διαδίδονται σε ευθεία χωρίς να παρεμβαίνουν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.
- **Δεν εστιάζονται.** Όταν οι ακτίνες X στοχεύονται σε ένα δοκίμιο, ένα ποσό της ακτινοβολίας θα απορροφηθεί από το υλικό και η περίσσια ακτινοβολία θα διεισδύσει από μέσα του.
- **Δεν ανιχνεύονται από ανθρώπινες αισθήσεις.** Ο ανθρώπινος οργανισμός συνειδητοποιεί την έκθεση στην ακτινοβολία μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα.
- **Προκαλούν φθορισμό σε μερικά υλικά.** Ορισμένα ορυκτά και άλατα φθορίζουν όταν υποβάλλονται σε ακτινοβολία..
- **Προκαλούν ιονισμό της ύλης.** Ως ιονισμός εννοείται η πλήρης απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από ένα άτομο ως αποτέλεσμα της μεταφοράς ενέργειας από διερχόμενο φορτισμένο σωματίδιο.

1.2.5 Αρχές Ραδιογραφίας

Κατά τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών με ραδιογραφία το υπό εξέταση υλικό τοποθετείται ανάμεσα στην πηγή ακτινοβολίας και σε φιλμ ευαίσθητο στην ακτινοβολία^[1].

Όταν εκτίθεται το δοκίμιο στην κάμερα ακτινών, ένα μέρος της ακτινοβολίας θα σταματήσει μέσα στο δοκίμιο και η εναπομένουσα ακτινοβολία θα διαπεράσει το δοκίμιο, θα εκτεθεί στο φιλμ και θα σκιαγραφήσει το δοκίμιο. Το επίπεδο της σκιάς στο φιλμ δείχνει τη πυκνότητα των τμημάτων του υλικού (Σχήμα 1.3). Όσο πιο σκοτεινά δείχνονται τα κομμάτια του δοκιμίου, τόσο πιο μεγάλη και η έκθεση στην ακτινοβολία. Στον μη καταστροφικό χρησιμοποιούνται συσκευές ψηφιακής ραδιογραφίας με επίπεδους ανιχνευτές ακτινοβολίας αντί για βιομηχανικό φιλμ. Έτσι εξαλείφτηκε η ανάγκη χημικής επεξεργασίας του φιλμ, και επιπλέον μπορεί να βελτιωθεί η ευκρίνεια στις ψηφιακές απεικονίσεις. Επιπλέον, η απαιτούμενη ακτινοβολία για την λήψη εικόνων καλής ευκρίνειας είναι μικρότερη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ραδιογραφίας. Τα συστήματα ψηφιακής ραδιογραφίας έρχονται σε δύο μορφές:

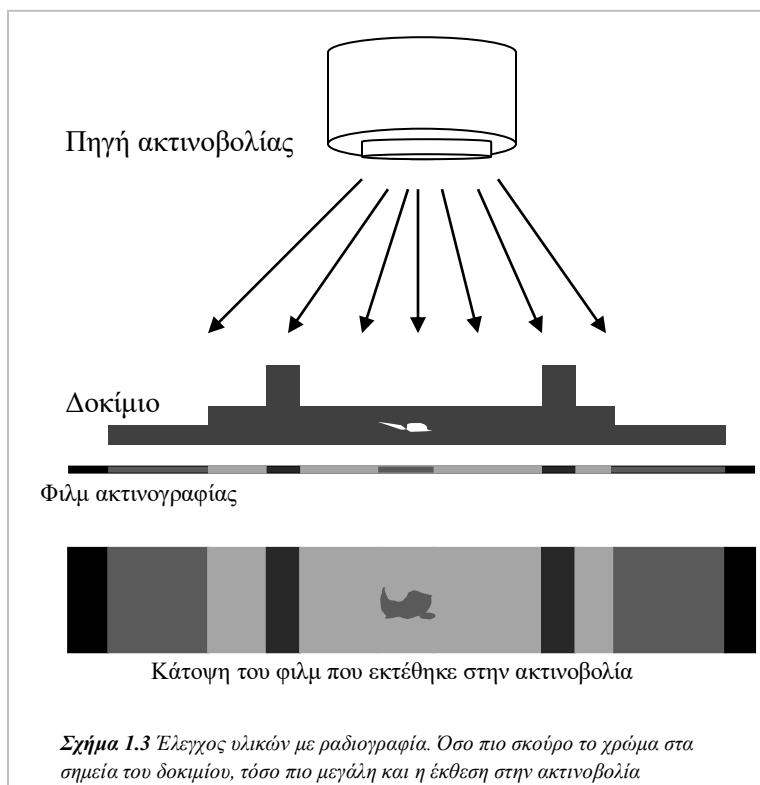
- α) την άμεση ψηφιακή απεικόνιση, που χρησιμοποιεί ανιχνευτή άμορφου πυριτίου με σπινθήρα για να μετατραπούν οι ακτίνες X ή γ σε ορατό φως
- β) την έμμεση ψηφιακή απεικόνιση, στην οποία χρησιμοποιείται επαναχρησιμοποιούμενες πλάκες αντί για φιλμ.

1.2.6 Παράμετροι Ραδιογραφίας

Η ραδιογραφία έχει ως στόχο την λήψη εικόνων με όσο το δυνατόν καλύτερη ευκρίνεια, κάτι που απαιτεί προσοχή στις μεταβλητές που επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας.

1.2.6.1 Ευαισθησία Ραδιογραφίας

Η ευαισθησία είναι ένα μέτρο της ποιότητας της εικόνας που καθορίζει το όσο πιο ξεκάθαρα φαίνονται οι λεπτομέρειες ή ασυνέχειες που μπορούν να διακριθούν και βασίζεται στην αντίθεση και την ασάφεια της εικόνας. Η αντίθεση καθιστά την ευκολία στην διάκριση περιοχών ενδιαφέροντος στο δοκίμιο (π.χ. ατέλειες) από τη γύρω περιοχή του ενώ η ελάττωση της ασάφειας μειώνει τη θολότητα της εικόνας με αποτέλεσμα την καλύτερη απεικόνιση των ατελειών^[1].



1.2.6.2 Αντίθεση αντικειμένου (contrast)

Ως αντίθεση αντικειμένου (contrast) θεωρούμε τη διαφορά πάχους μεταξύ δύο διαφορετικών περιοχών μιας ραδιογραφικής μελέτης. Η αντίθεση κάνει τις ατέλειες πιο σαφείς από το περιβάλλον μελέτης. Η αντίθεση αντικειμένου επηρεάζει και την αντίθεση εικόνας επειδή δεν ορίζεται μόνο για δοκίμια που έχουν τμήματα με διαφορετικά πάχη. Ομοίως ορίζεται για δοκίμια που αποτελούνται από τμήματα με υλικά διαφορετικού ατομικού αριθμού ή διαφορετική πυκνότητα^[1].

2.6.3 Αντίθεση εικόνας (definition)

Η αντίθεση εικόνας είναι η διαφορά οπτικής πυκνότητας μεταξύ των δύο περιοχών σε μια ραδιογραφία. Η αντίθεση μπορεί επίσης να αναφέρεται σε διαφορές οπτικής πυκνότητας που προκύπτουν λόγω του τύπου, έκθεσης και επεξεργασίας του ίδιου του ανιχνευτή (φιλμ) που χρησιμοποιείται^[1].

1.2.6.4 Ακτινοβολία σκέδασης

Η ακτινοβολία σκέδασης είναι ένας τύπος δευτερεύουσας ακτινοβολίας που εμφανίζεται όταν η δέσμη παρεμποδίζει ένα αντικείμενο, προκαλώντας τη διάχυση των ακτίνων X. Κατά τη διάρκεια των περισσότερων απεικονιστικών διαδικασιών, το αντικείμενο εκτρέπει την ακτινοβολία και την αναγκάζει να διασκορπιστεί στο χώρο, πράγμα που σημαίνει ότι όποιος βρίσκεται κοντά πρέπει να λαμβάνει προφυλάξεις^[4].

1.2.7 Προβλήματα έκθεσης και προστασία

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, υπάρχουν κίνδυνοι για την υγεία που συνδέονται με την ακτινοβολία, και αυτό θεωρείται ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της ραδιογραφίας. Το επίπεδο του κινδύνου εξαρτάται από το ποσό της λαμβανόμενης δόσης ακτινοβολίας, ο χρόνος κατά τον οποίο η δόση λαμβάνεται, καθώς και τα μέρη του ανθρώπινου σώματος που εκτίθενται στην ακτινοβολία. Η ιοντίζουσα ακτινοβολία έχει αρκετή ενέργεια για να επηρεάσει τα κύτταρα των ζωντανών οργανισμών σε υπομικροσκοπικό επίπεδο μέχρι και το γενετικό τους υλικό. Το ανθρώπινο σώμα όμως μπορεί να προσαρμοστεί και να αποκαταστήσει τη βλάβη στον οργανισμό αν η έκθεση γίνει αντιληπτή από νωρίς ή αν ήταν σχετικά μικρή. Με μακροχρόνια έκθεση όμως, τα κύτταρα θα καταστρέφονται ή να γίνουν καρκινικά. Οι ακτίνες X και η ακτινοβολία γ δεν είναι αντιληπτές από τις ανθρώπινες αισθήσεις, πράγμα που απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή. Γι'αυτό το λόγο, η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε.) είναι αρμόδια σε θέματα ακτινοπροστασίας, όσο αφορά τη προστασία ατόμων που εκτίθενται σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες μαζί με τις αντίστοιχες επιγραφές κινδύνου ραδιενέργειας (Εικόνα 1.7). Το σύστημα ακτινοπροστασίας εφαρμόζεται βάσει τριών συγκεκριμένων αρχών:



Εικόνα 1.7 Προειδοποιητική επιγραφή κινδύνου ακτινοβολίας

- **Αιτιολόγηση:** κάθε διαδικασία που εμπεριέχει έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, πρέπει να αποφέρει ικανοποιητικό όφελος στα εκτιθέμενα άτομα ή στο κοινωνικό σύνολο.
- **Βελτιστοποίηση:** όλες οι πηγές και τα μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών πρέπει να λειτουργούν κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίας τους, με την καλύτερη δυνατή προστασία και ασφάλεια, έτσι ώστε το μέτρο έκθεσης να είναι όσο το δυνατόν εφικτά μικρό.
- **Όριο δόσεων:** σε διεργασίες που εμπλέκουν περιοδικές εκθέσεις σε ακτινοβολία, θα πρέπει να υπάρχει ένα όριο δόσεων έκθεσης ή κινδύνου, επειδή η υπέρβαση είναι μη αποδεκτή και παράνομη.

Η ύπαρξη συγκεκριμένων επιπτώσεων στην υγεία από την έκθεση στις ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι μια περίπλοκη διαδικασία που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- **Είδος της ακτινοβολίας:** Η κυρίως διαφορά μεταξύ όλων των ειδών ακτινοβολίας είναι κυρίως στο ποσό της ενέργειας που διοχετεύουν και το πόσο είναι αναγκαίο για να προκαλέσει προβλήματα.
- **Μέγεθος της δόσης:** Υψηλότερες δόσεις αποτελούν υψηλότερο κίνδυνο επιπτώσεων στην υγεία.
- **Συχνότητα λαμβανόμενων δόσεων:** Ένας οργανισμός που εκτίθεται σε συνολικά υψηλές δόσεις κατά μεγάλες χρονικές περιόδους μπορεί να μην αναπτύξει προβλήματα σε σχέση με έναν οργανισμό που δέχεται την ίδια ποσότητα μέσα σε μικρό χρόνο.
- **Μέρη του σώματος:** Τα άκρα, όπως χέρια και πόδια, είναι ικανά να δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολίας με μικρότερες επιπτώσεις απ' ό,τι τα αιμοποιητικά όργανα.
- **Ηλικία του ατόμου:** Όσο το άτομο ηλικιώνεται, η κυτταρική διαίρεση επιβραδύνεται και το σώμα είναι λιγότερο ευαίσθητο στις επιδράσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας.
- **Βιολογικές διαφορές:** Υπάρχουν περιπτώσεις ανθρώπων με μεγάλη ευαισθησία στην ακτινοβολία, για ακατανόητους λόγους.

1.2.8 Σύνοψη

Πέραν των πλεονεκτημάτων του μη καταστροφικού ελέγχου με ραδιογραφία ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο κίνδυνος για την υγεία που συνδέεται με την ακτινοβολία διείσδυσης, που επιβάλλει εξειδικευμένη εκπαίδευση, προσοχή στα απαραίτητα μέτρα προστασίας και εφαρμογή των διεθνών κανόνων ακτινοπροστασίας.

Σε πλεονεκτήματα η μελέτη ραδιογραφίας:

- Δεν περιορίζεται σε υλικά ή στη πυκνότητά τους
- Δυνατότητα επιθεώρησης συναρμολογήσεων
- Δεν απαιτεί επιφανειακή εκκαθάριση
- Ευαίσθητη στις μεταβολές στη δομή του υλικού
- Ανιχνεύει επιφανειακά και εσωτερικά ελαττώματα
- Δυνατότητα μόνιμης καταγραφής
- Ικανοποιητικά φορητά συστήματα, ειδικά των πηγών ακτινών γ.

Αλλά σε μειονεκτήματα:

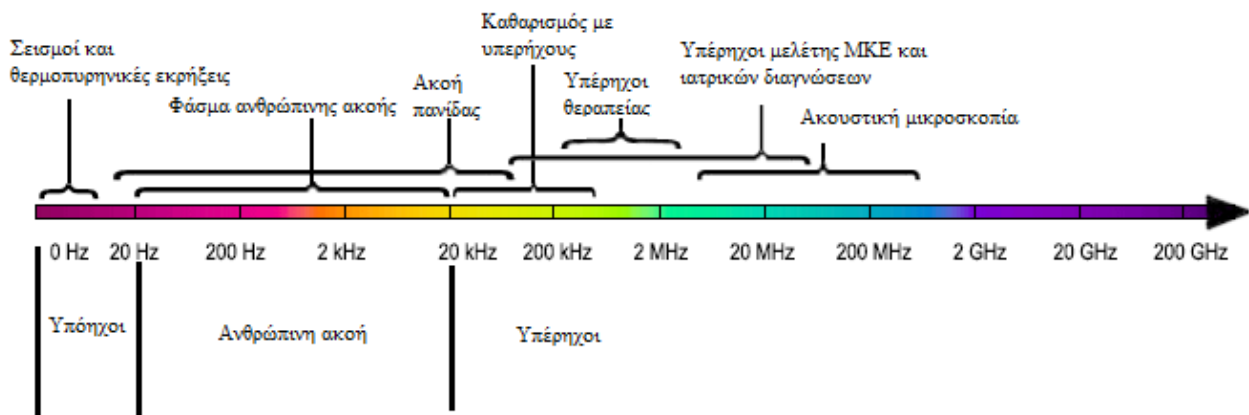
- Απαιτούνται πολλές προφυλάξεις ασφάλειας στη χρήση και στη διαχείριση των πηγών ακτινοβολίας.
- Η διάρκεια εκπαίδευσης τεχνικού χρήσης μηχανημάτων ραδιογραφίας είναι πολύ μεγάλη
- Θα πρέπει το δοκίμιο μελέτης να είναι διαθέσιμο προς μελέτη και από τις δύο πλευρές.
- Η διαδικασία κρατάει πολλή ώρα μέχρι να βγει ετυμηγορία.
- Ευαισθησία στην κατεύθυνση ατελειών.
- Το βάθος της ατέλειας δεν προσδιορίζεται εύκολα χωρίς τις γωνίες έκθεσης.
- Υψηλό κόστος του εξοπλισμού, ακτινοπροστασίας και αποζημίωση προσωπικού που εκτίθεται.

Κεφάλαιο 1.3 Υπέρηχοι

Ως υπέρηχοι ορίζονται τα ηχητικά κύματα με συχνότητα που ξεπερνάει το φάσμα της ανθρώπινης ακοής (άνω των 20 kHz) (Εικόνα 1.9). Οι φυσικές αρχές των ακουστικών κυμάτων ισχύουν για οποιοδήποτε εύρος συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένου του υπέρηχου. Οι συσκευές υπέρηχων λειτουργούν με συχνότητες από 20 kHz έως αρκετά gigahertz. Στο πεδίο των μη καταστροφικών ελέγχων, ο υπέρηχος χρησιμοποιεί ελαστικά κύματα υψηλής συχνότητας με σκοπό την ανίχνευση ατελειών στο εσωτερικό ενός αντικειμένου. Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται σε ένα ρευστό ή στερεό μέσο ως μια συνεχεία από μηχανικές δονήσεις που διαδίδονται στο εύρος της επιφάνειας του αντικειμένου και προκαλούν τα σωματίδια του υλικού να ταλαντεύονται. Η κυματική εξίσωση των υπέρηχων δεν περιορίζεται από γραμμικές συνθήκες ή αρμονική κίνηση σωματιδίων, η χρήση των υπέρηχων ως μη καταστροφική μέθοδος εμπεριέχει αρμονική κίνηση.



Εικόνα 1.8 Συσκευή υπέρηχων για ΜΚΕ.



Εικόνα 1.9 Το φάσμα του ήχου.

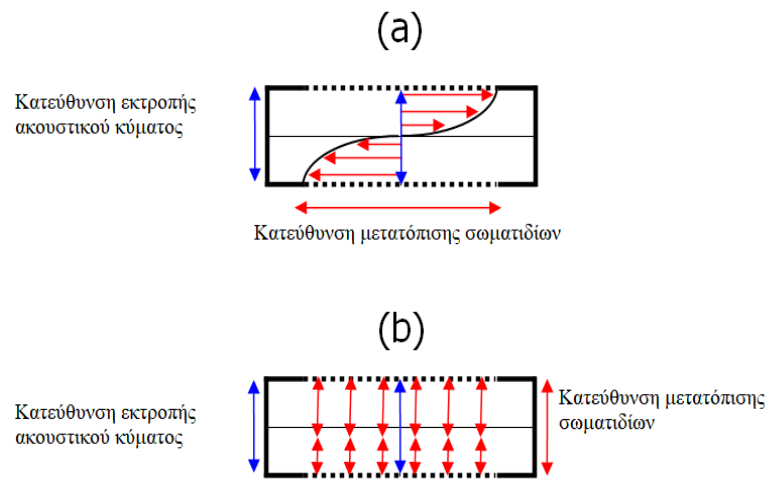
Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ελαστικών ιδιοτήτων υλικών καθώς και ελέγχου της δομής εκθέτοντας το υπό μελέτη υλικό σε τασικά κύματα υψηλής συχνότητας. Όταν τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν στο υλικό, οι ιδιότητές τους αλλάζουν εξαιτίας διάθλασης, ανάκλασης, σκέδασης και εξασθένησης. Το σήμα που δέχεται η συσκευή επεξεργάζεται και δείχνει τη κατάσταση της εσωτερικής δομής του υλικού σε σχέση με το αρχικό κύμα.

1.3.1 Είδη κυμάτων

Υπάρχουν δύο είδη ελαστικών κυμάτων: τα κύματα χώρου και τα καθοδηγούμενα ή επιφανειακά κύματα. Τα κύματα χώρου μπορούν να διαδοθούν χωρίς περιορισμό το μέγεθος του μέσου ενώ τα καθοδηγούμενα διαδίδονται μέσα σε ένα όριο μήκους του μέσου του οδηγού.

1.3.1.1 Κύματα χώρου, διαμήκη και εγκάρσια

Ως διαμήκη θεωρούνται τα κύματα των οποίων οι δονήσεις του ενδιάμεσου είναι παράλληλες στη διεύθυνση του κύματος και η μετατόπιση του ενδιάμεσου έχει την ίδια ή αντίθετη κατεύθυνση με τη διάδοση του κύματος (Σχήμα 1.5 b). Τα διαμήκη κύματα είναι επίσης γνωστά και ως κύματα συμπίεσης επειδή προκαλούν συμπίεση και αραιώση όταν ταξιδεύουν μέσα από ένα ενδιάμεσο και ως κύματα πίεσης επειδή προκαλούν αυξήσεις και μειώσεις στη πίεση. Τέτοια κύματα μπορούν να διαδοθούν σε αέρια, υγρά και στερεά υλικά.

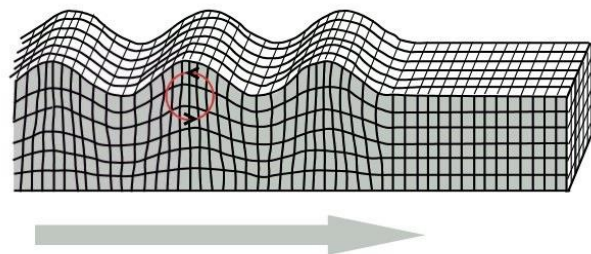


Σχήμα 1.4 Αναπαράσταση κυμάτων χώρου.

Στα εγκάρσια κύματα (Σχήμα 1.5 a) η διεύθυνση διάδοσης είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά σώματα και κατά προσέγγιση στην επιφάνεια υγρών. Αναφέρονται επίσης και ως διατμητικά επειδή τα ενδιάμεσα που εκτίθενται σε τέτοια κύματα υποκύπτουν σε περιοδική διάτμηση. Διάτμηση είναι η αλλαγή της μορφής ενός αντικειμένου, χωρίς να αλλάξει ο όγκος του, που προκαλείται όταν δύο ίσες δυνάμεις δράνε σε αντίθετες διευθύνσεις στις δύο πλευρές ενός υλικού.

1.3.1.2 Καθοδηγούμενα ή Επιφανειακά κύματα (Rayleigh)

Τα κύματα Rayleigh είναι ένα είδος επιφανειακών κυμάτων που όπως λέει και το όνομα, ταξιδεύουν στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού. Δημιουργούνται με διάφορους τρόπους, συνήθως με τοπικές κρούσεις ή με πιεζο-ηλεκτρικές μεταγωγές, και χρησιμοποιούνται συχνά στο μη καταστροφικό έλεγχο για ανίχνευση ατελειών σε υλικά. Τα κύματα Rayleigh είναι ένα μέρος των κυμάτων που προκαλούνται από επίγειους σεισμούς. Όταν κατευθύνονται σε στρώσεις αναφέρονται και ως κύματα Lamb, γενικευμένα κύματα Rayleigh ή κύματα Rayleigh-Lamb.



Σχήμα 1.5 Αναπαράσταση κυμάτων Rayleigh.

Τα κύματα Rayleigh χρησιμοποιούνται ευρέως για τον χαρακτηρισμό υλικών, για την ανακάλυψη των μηχανικών και δομικών ιδιοτήτων του αντικειμένου που δοκιμάζεται – όπως η παρουσία ρωγμών και το σχετικό μέτρο διάτμησης. Αυτό είναι κοινό με άλλους τύπους επιφανειακών κυμάτων. Τα κύματα Rayleigh που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό βρίσκονται στην περιοχή συχνοτήτων υπερήχων. Χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές κλίμακες μήκους επειδή δημιουργούνται και ανιχνεύονται εύκολα στην ελεύθερη επιφάνεια στερεών

αντικειμένων. Δεδομένου ότι περιορίζονται στην περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας μέσα σε ένα βάθος (\sim το μήκος κύματος) που συνδέεται με τη συχνότητα του κύματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές συχνότητες για χαρακτηρισμό σε διαφορετικές κλίμακες μήκους.

Τα κύματα Rayleigh είναι χαρακτηριστικά επειδή παράγουν διαμήκη και εγκάρσια κύματα που μειώνονται σε πλάτος όταν η απόσταση από την επιφάνεια μειώνεται. Σε ισοτροπικά στερεά, τα κύματα Rayleigh κινούνται ελλειπτικά σε επίπεδα πάνω στην επιφάνεια και παράλληλα στην διεύθυνση διάδοσης. Στην επιφάνεια και σε ρηχά βάθη η κίνηση είναι παλινδρομική, δηλαδή η κίνηση ενός σωματιδίου είναι αντίθετη της φοράς του ρολογιού όταν πηγαίνει από τα αριστερά στα δεξιά. Σε μεγαλύτερα βάθη, η κίνηση γίνεται αναδρομική. Επιπλέον το πλάτος κύματος μειώνεται και η εκκεντρότητα αλλάζει όσο η απόσταση από το υλικό αυξάνεται. Το βάθος σημαντικής μετατόπισης στο στερεό είναι σχετικά ίσο με το ακουστικό μήκος κύματος.

Τα κύματα Rayleigh έχουν ταχύτητα ελαφρώς μικρότερη από τα κύματα διάτμησης κατά έναν παράγοντα που εξαρτάται από τις ελαστικές σταθερές του υλικού. Η τυπική ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh στα μέταλλα είναι της τάξης των 2–5 km/s και η τυπική ταχύτητα Rayleigh στο έδαφος είναι της τάξης των 50–300 m/s για ρηχά κύματα μικρότερα από 100 m. βάθος και 1,5–4 km/s σε βάθη μεγαλύτερα από 1 km.

Δεδομένου ότι τα κύματα Rayleigh περιορίζονται κοντά στην επιφάνεια, το πλάτος τους εντός του επιπέδου όταν δημιουργείται από μια σημειακή πηγή διασπάται μόνο ως:

$$1/\sqrt{r} \quad (1.5)$$

όπου r είναι η ακτινική απόσταση.

Επομένως, τα επιφανειακά κύματα διασπώνται πιο αργά με την απόσταση από ότι τα κύματα όγκου, τα οποία απλώνονται σε τρεις διαστάσεις από μια σημειακή πηγή. Αυτή η αργή αποσύνθεση είναι ένας λόγος για τον οποίο παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους σεισμολόγους. Τα κύματα Rayleigh μπορούν να κυκλώσουν την υδρόγειο πολλές φορές μετά από έναν μεγάλο σεισμό και να είναι ακόμα μετρήσιμα μεγάλα. Υπάρχει διαφορά στη συμπεριφορά (ταχύτητα κύματος Rayleigh, μετατοπίσεις, τροχιές της κίνησης των σωματιδίων, τάσεις) των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh με θετικό και αρνητικό λόγο Poisson.

1.3.2 Χαρακτηριστικά υπερηχητικών κυμάτων

1.3.2.1 Διάδοση

Ορίζουμε μέσο την επιφάνεια του υλικού που εφαρμόζεται το τασικό κύμα. Η διάδοση κύματος υπολογίζεται από την εξίσωση κύματος της μορφής:

$$\frac{d^2 u(x,y,z,t)}{dt^2} = c_0^2 \nabla^2 u(x,y,z,t) \quad (1.6)$$

όπου, $u(x,y,z,t)$ είναι η μετατόπιση κατά τη χρονική στιγμή t , c_0 είναι η ταχύτητα του ήχου στο μέσο και,

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \quad (1.7)$$

Σε περίπτωση επίπεδου κύματος που διαδίδεται στη διεύθυνση x, η κυματική εξίσωση έχει τη μορφή:

$$\frac{d^2 u(x,t)}{dx^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 u(x,t)}{dt^2} \quad (1.8)$$

Μια λύση της εξίσωσης αυτής, που λαμβάνεται με διαχωρισμό μεταβλητών, έχει τη μορφή:

$$u(x,t) = A \cos k(x - c_0 t) \quad (1.9)$$

Όπου A το πλάτος του κύματος, και $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ο κυματικός αριθμός.

Η πλήρης λύση της κυματικής εξίσωσης σε εκθετική μορφή είναι:

$$u(x,t) = X_1 e^{i(kx+\omega t)} + Y_1 e^{-i(kx-\omega t)} = (X_1 e^{ikx} + Y_1 e^{-ikx}) e^{i\omega t} \quad (1.10)$$

Η εξίσωση αντιπροσωπεύει δυο λύσεις που διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα φάσης c. Με X_1 και Y_1 σταθερά πλάτη και η κυκλική συχνότητα $\omega = 2\pi f$ ικανοποιεί την εξίσωση διασποράς (για δεδομένο κυματικό αριθμό k, μας δίνει τη συχνότητα του κύματος)^[1]:

$$\omega^2 = k^2 c_0^2 \quad (1.11)$$

Τα κύματα αυτά διαδίδονται χωρίς διασπορά (dispersion), δηλαδή η φασική τους ταχύτητα είναι ανεξάρτητη του κυματικού αριθμού. Ισχύει λοιπόν η ακόλουθη σημαντική σχέση ανάμεσα στη συχνότητα, f, την ταχύτητα φάσης, c_0 , και το μήκος κύματος, λ ^[1]:

$$c_0 = f\lambda \quad (1.12)$$

1.3.2.2 Διασπορά

Σε περιπτώσεις που η εξίσωση είναι ανώτερης τάξης ή εμπεριέχει πρόσθετους όρους, όπως στην περίπτωση ταλάντωσης χορδής σε ελαστική βάση με σταθερά ελαστικότητας K και εφαρμογή δύναμης F:

$$\frac{d^2 u(x,t)}{dx^2} - \frac{K}{F} u = \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 u(x,t)}{dt^2} \quad (1.13)$$

Λόγω του επιπλέον όρου, η εξίσωση δεν λύνεται για να βρεθεί η διάδοση χωρίς στρέβλωση. Αν θεωρήσουμε την εξίσωση ως εξής:

$$u(x,t) = A e^{i(kx-\omega t)} \quad (1.14)$$

και την αντικαταστήσουμε στην εξίσωση κύματος (1.11), βρίσκουμε τη χαρακτηριστική εξίσωση διασποράς:

$$\omega^2 = c_o^2 \left(k^2 + \frac{K}{F} \right) \quad (1.15)$$

Η εξίσωση διασποράς μπορεί επίσης να γραφεί και ως:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_o^2} - \frac{K}{F} \quad (1.16)$$

Παρατηρούμε ότι έχει δυο πραγματικές ρίζες:

$$k = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c_o^2} - \frac{K}{F}} \quad (1.17)$$

Αν $\frac{\omega^2}{c_o^2} > \frac{K}{F}$, η κυματική εξίσωση γίνεται $u = Ae^{-i(\pm kx - \omega t)}$.

Στην περίπτωση αυτή η διάδοση του κύματος είναι δυνατή δεξιά ή αριστερά.

Αν $\frac{\omega^2}{c_o^2} < \frac{K}{F}$, τότε ο κυματικός αριθμός k είναι μέγεθος φανταστικό, άρα το κύμα δεν διαδίδεται.

Το κατώτατο όριο των συχνοτήτων είναι:

$$\omega_o = c_o \sqrt{\frac{K}{F}} \quad (1.18)$$

Σε κάποια μέσα, η διασπορά οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του κύματος μεταβάλλεται συναρτήσει της συχνότητας. Γι' αυτό το λόγο, τα κύματα παλμού με πολλαπλές συχνότητες, παραμορφώνονται αναλόγως καθώς οι διαφορετικές συχνότητες δίνουν και διαφορετικούς κυματικούς αριθμούς, γεγονός που προκαλεί το κάθε κύμα να με διαφορετική ταχύτητα.

1.3.2.3 Εξασθένηση

Ένα ελαστικό κύμα που διαδίδεται σε ένα μέσο χάνει συνεχώς μέρος της ενέργειάς του. Εξασθένηση είναι ο ρυθμός απώλειας της ενέργειας του κύματος καθώς αυτό διαδίδεται στο μέσο. Οι ιδιότητες που προκαλούν την εξασθένηση είναι: απορρόφηση, σκέδαση και η γεωμετρία της δέσμης του υπερήχου. Η απορρόφηση και η σκέδαση βασίζονται στο μέσο διάδοσης ενώ η γεωμετρία εξαρτάται από τη κεφαλή διάδοσης των υπερήχων. Κατά την απόσβεση το πλάτος κύματος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης από τη πηγή σε τρισδιάστατο φάσμα και αντιστοίχως στη ρίζα της απόστασης σε δυσδιάστατο φάσμα.

1.3.2.4 Απόσβεση

Η πλειονότητα των μέσων έχουν κάποιας μορφής ιξώδες, μια ιδιότητα που δεν τα καθιστά ως ιδανικά μέσα διάδοσης. Εξαιτίας του ιξώδες, ο υπέρηχος μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια λόγω των τριβών στο εσωτερικό του υλικού. Έτσι στα ιξωδοελαστικά στερεά, καθώς και στα υγρά, οι δυνάμεις μεταξύ σωματιδίων που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες απορροφάνε μεγάλο μέρος του ακουστικού κύματος.

1.3.2.5 Σκέδαση

Η σκέδαση είναι ο κύριος μηχανισμός απώλειας ενέργειας των ακουστικών κυμάτων. Η σκέδαση προκαλείται όταν τα σωματίδια του υλικού αποκλίνουν από την ευθεία διάδοσής τους με άλλες παρόμοιες διαδρομές επειδή 'πέφτουν' πάνω σε ανομοιογενές υλικό στο οποίο διέρχονται. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ενέργεια αλλάζει διεύθυνση αντί για μορφή.

1.3.3 Σύνοψη

Εν κατακλείδι οι υπέρηχοι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά έχουν και πολλούς περιορισμούς στη χρήση τους. Συγκεκριμένα:

- Υψηλή διεισδυτικότητα που βοηθάει στην ανίχνευση ατελειών σε μεγάλα βάθη σε υλικά.
- Ακριβής προσδιορισμός θέσης, μεγέθους και προσανατολισμού ατέλειας.
- Ευαίσθητη σε επιφανειακές και υπο-επιφανειακές ασυνέχειες.
- Η μελέτη απαιτεί μια επιφάνεια, χωρίς την ανάγκη προετοιμασίας για έλεγχο.
- Μοντέρνα συστήματα υπερήχων έχουν δυνατότητα αυτοματοποίησης για λήψη άμεσων αποτελεσμάτων.
- Η υψηλή ευαισθησία των υπερήχων βοηθάει μέχρι και στην ανίχνευση μικρών ατελειών.
- Εφικτή μέτρηση όγκου του υλικού προς μελέτη.
- Δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας ώστε να προσδιοριστούν πιο εύκολα ατέλειες και ασυνέχειες καθώς και ιδιότητες του υλικού.
- Τα συστήματα είναι φορητά.
- Οι υπέρηχοι δεν αποτελούν κίνδυνο στην υγεία του χρήστη και δεν υπάρχει ανάγκη για αναλώσιμα.

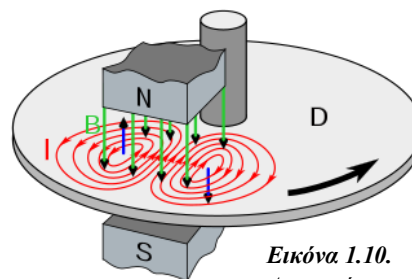
Αλλά σε περιορισμούς και μειονεκτήματα:

- Εξαιρώντας τα προηγμένα συστήματα, δεν γίνεται μόνιμη καταγραφή δεδομένων και τα δεδομένα απαιτούν ερμηνευση και ξεκαθάρισμα.
- Η γνώση του χειριστή πρέπει να είναι υψηλή για την κατάλληλη ανάπτυξη της διαδικασίας χρήσης και διαδικασίας και εν τέλει την τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ελέγχου.
- Αντικείμενα με ακανόνιστη επιφάνεια δεν μπορούν να ελεγχθούν με ευκολία, συμπεριλαμβανομένου ότι η επιφάνεια να είναι προσπελάσιμη για να γίνει σωστή μετάδοση.
- Ατέλειες πολύ κοντά στην επιφάνεια μελέτης δεν ανιχνεύονται εύκολα.
- Υλικά όπως ο χυτοσίδηρος που έχουν μικροδομή μεγάλων κόκκων δεν μελετούνται εύκολα επειδή το ηχητικό κύμα εξασθενεί πιο γρήγορα.
- Ατέλειες που βρίσκονται παράλληλα στη δέσμη των υπερήχων μπορεί να μην εμφανιστούν
- Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι αναγκαίο ένα μέσο σύζευξης για να μεταφερθεί η ενέργεια του κύματος πιο αποτελεσματικά στο δοκίμιο.
- Απαιτούνται πρότυπα αναφοράς για τη βαθμονόμηση και τον καθορισμό ατελειών.

Κεφάλαιο 1.4 Δινορεύματα

Τα δινορεύματα, ή αλλιώς γνωστά ως ρεύματα Foucault από τον Γάλλο φυσικό Lèon Foucault που ανακάλυψε το φαινόμενο αυτό, είναι ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούνται σε μια αγώγιμη μάζα είτε με τη μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από αυτό το μέσο σε μία περίοδο χρόνου, ή με την μετατόπιση της μάζας αυτής σε ένα μαγνητικό πεδίο. Τα δινορεύματα είναι υπεύθυνα για ένα μέρος των απωλειών στα μαγνητικά κυκλώματα παλινδρομικών μηχανών και μετασχηματιστών.

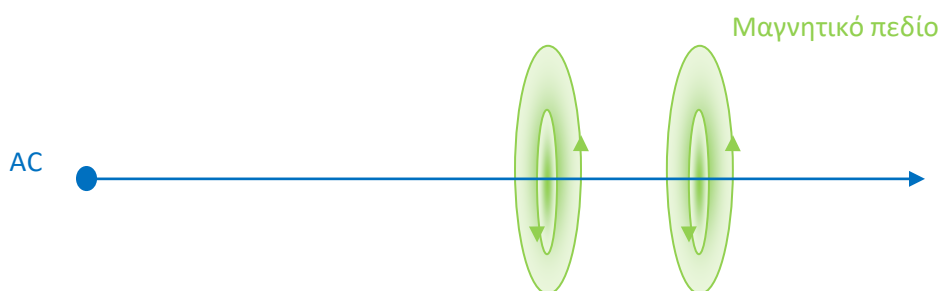
Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα μαγνητικά κυκλώματα είναι κατασκευασμένα από ελασματοποιημένα φύλλα προκειμένου να περιοριστούν τα δινορεύματα και οι απώλειες που προκύπτουν από το φαινόμενο Joule, που βελτιώνει την απόδοση των μετασχηματιστών.



Εικόνα 1.10.
Αναπαράσταση των δινορευμάτων.

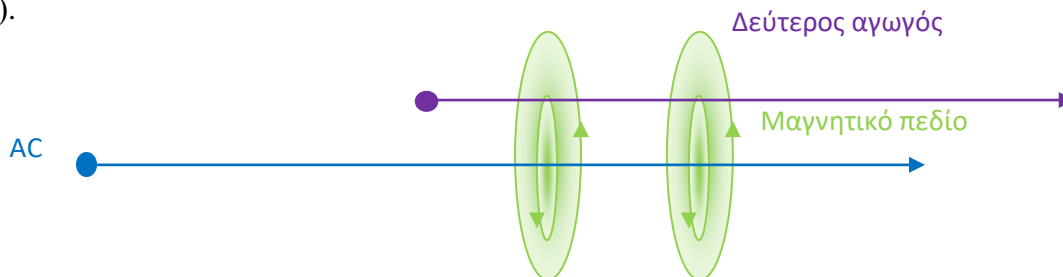
1.4.1 Αρχή και δημιουργία δινορευμάτων

Τα δινορεύματα δημιουργούνται βάσει στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Εφαρμόζουμε εναλλασσόμενο ρεύμα σε έναν αγωγό και αυτό θα προκαλέσει να αναπτυχθεί μαγνητικό πεδίο σε μια περίμετρο του αγωγού.



Σχήμα 1.6α Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου σε αγωγό που διέρχεται από εναλλασσόμενο ρεύμα

Εάν τοποθετήσουμε ένα δεύτερο ηλεκτρικό αγωγό μέσα στο πεδίο του πρώτου, τότε θα γίνει το αντίθετο. Το μαγνητικό πεδίο του πρώτου αγωγού θα διασχίσει τον δεύτερο αγωγό και, λόγω επαγωγής, θα προκαλέσει επαγωγικό ρεύμα να αρχίσει να διαρρέει τον αγωγό(Σχήμα 1.7β).



Σχήμα 1.6β Δημιουργία επαγωγικού ρεύματος σε αγωγό που εισέρχεται σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Τα δινορεύματα είναι μια μορφή επαγωγικού ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει σε κυκλικές διαδρομές, εξού και ο όρος ‘δινο’, που προέρχεται από τις κυκλικές τροχιές που σχηματίζονται σε υγρά ή αέρια.

Στο Μη Καταστροφικό Έλεγχο, η δημιουργία δινορευμάτων γίνεται με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων. Αυτοί οι αισθητήρες περιέχουν ένα ηλεκτρικό αγωγό που σχηματίζει ένα πηνίο. Το πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, συγκεκριμένης συχνότητας και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το πηνίο. Όταν το πηνίο πλησιάζει στο αγωγό (που είναι το υπό μελέτη υλικό), δημιουργούνται δευτερογενή δινορεύματα μέσα στον αγωγό. Οι ιδιότητες των υλικών που επηρεάζουν τα δινορεύματα είναι οι ακόλουθες:

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα ή ειδική αντίσταση
- Μαγνητική διαπερατότητα
- Σχήμα
- Ασυνέχειες

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος που επηρεάζουν τα δινορεύματα είναι:

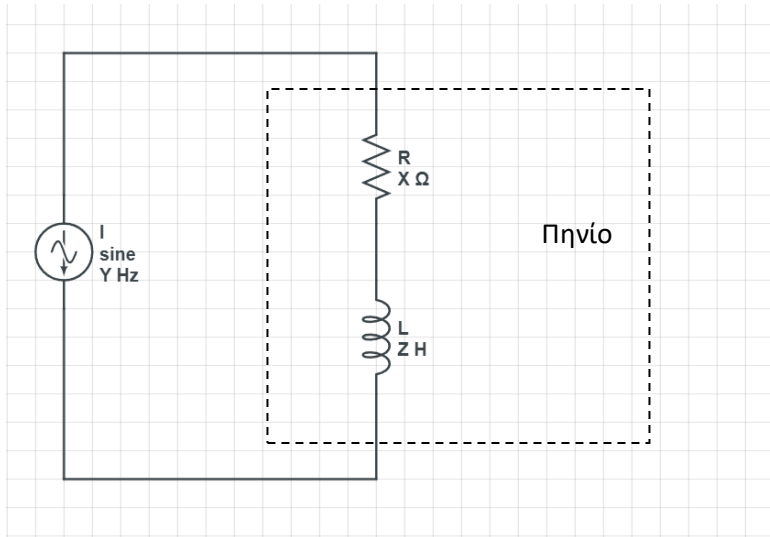
- Συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος
- Σχήμα και μέγεθος του πηνίου
- Απόσταση ανάμεσα στο πηνίο και το υπό έλεγχο δοκίμιο

Όταν ο αισθητήρας ενεργοποιείται, θα υπάρχει πάντα ένδειξη στα άκρα του, ακόμα και αν δεν είναι σε επαφή με κάποιο υλικό. Όταν όμως το πηνίο πλησιάζει στο δοκίμιο η ένδειξη αλλάζει μέχρι ο αισθητήρας να αγγίξει την επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτές οι μεταβολές χαρακτηρίζονται ως “lift-off”.

1.4.2 Διαδικασία ελέγχου δινορευμάτων

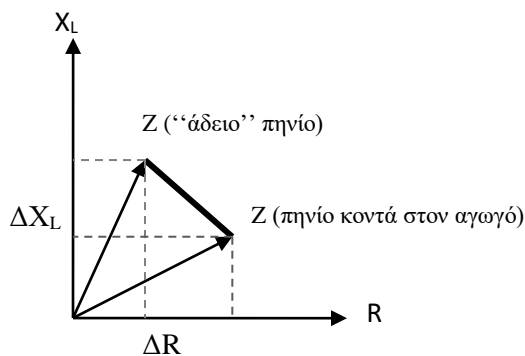
Κατά τη διάρκεια που ρέει εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο του αισθητήρα, η ωμική αντίσταση R και η επαγωγική αντίσταση X_L αντιδρούν και προκαλούν μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα και τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής στο πηνίο αντιστοίχως. Η επαγωγική αντίσταση υπολογίζεται ως $X_L = \omega L$ όπου L η αυτεπαγωγή του πηνίου και $\omega = 2\pi f$ η γωνιακή συχνότητα με f τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Η συνολική εμπέδηση Z του ρεύματος, που συνυπολογίζεται από την ωμική και την επαγωγική αντίσταση, υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.19:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (1.19)$$



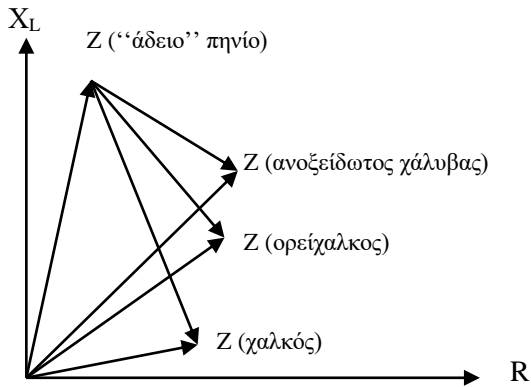
Σχήμα 1.7 Σύνθετη αντίσταση πηνίου

Όταν το πηνίο πλησιάζει στον αγωγό, η εμπέδηση μεταβάλλεται εξαιτίας της μεταβολής στην αυτεπαγωγή όταν το πηνίο και αγωγός συνδέονται. Η μεταβολή μπορεί να θεωρηθεί ως μεταβολή στις αντιστάσεις R και X_L όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9^α. Ένα πηνίο που βρίσκεται μακριά από τον αγωγό αποκαλείται ‘άδειο’.



Σχήμα 1.8α Η διαφορά στη τιμή της επαγωγικής αντίστασης.

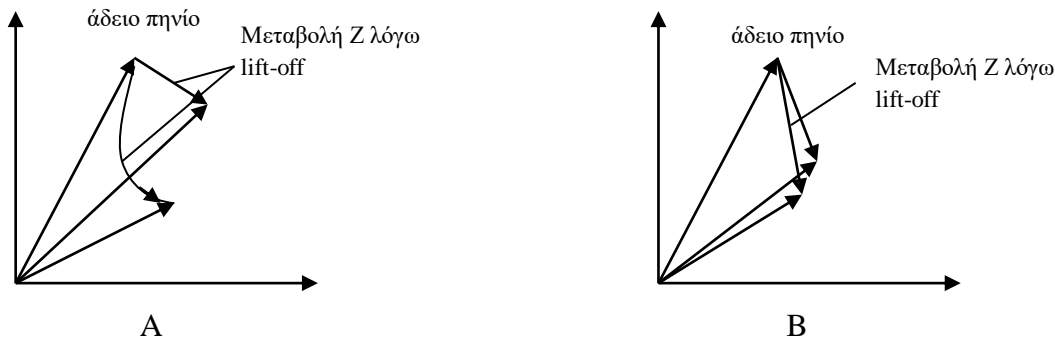
Το επίπεδο που περιλαμβάνει τις προαναφερθέντες μεταβλητές ονομάζεται **επίπεδο εμπέδησης**. Επομένως ο έλεγχος με τη χρήση δινορευμάτων που κάνει χρήση τέτοιων παραμέτρων λέγεται **δοκιμή επιπέδου εμπέδησης**. Στο Σχήμα 1.9β, αναφέρεται ένα διάγραμμα εμπέδησης για ανοξείδωτο χάλυβα, ορείχαλκο και χαλκό.



Σχήμα 1.9. Διάγραμμα εμπέδησης για ανοξειδωτο χάλυβα, ορείχαλκο και χαλκό.

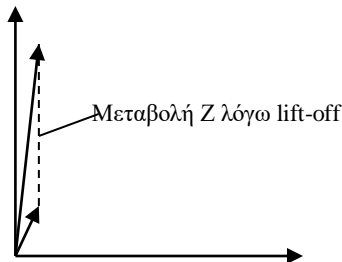
Η κατάλληλη επιλογή της συχνότητας του ρεύματος καθώς και το μέγεθος και σχήμα του πηνίου του αισθητήρα είναι η βάση της μεθόδου ελέγχου με δινορεύματα. Με τη σωστή επιλογή συχνότητας, οι επιπτώσεις lift-off και αγωγιμότητας περιορίζονται. Για υλικά που είναι αγωγά αλλά όχι μαγνητικά η μαγνητική διαπερατότητα μ_{rel} , ο λόγος πυκνότητας ροής προς τη πυκνότητα ροής αέρα, είναι ίση με 1.

Στο Σχήμα 1.10 χρησιμοποιούνται τα δινορεύματα για τον ξεχώρισμα δύο μαγνητικών υλικών A και B, με το A να έχει χαμηλότερη αγωγιμότητα από ότι το B. Η σωστή επιλογή συχνότητας βοηθάει στην πιο σωστή διαφοροποίηση μεταξύ των υλικών.



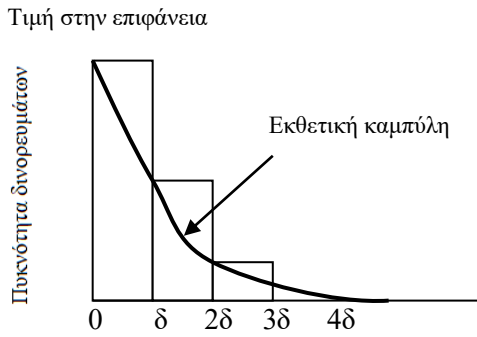
Σχήμα 1.10α Με τη σωστή επιλογή συχνότητας, τα μη μαγνητικά υλικά διαφορετικής αγωγιμότητας ξεχωρίζονται. -A κατάλληλη, -B λανθασμένη.

Να σημειωθεί ότι στα σιδηρομαγνητικά υλικά, η μαγνητική διαπερατότητα μ_{rel} είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας, γεγονός που προκαλεί αύξηση της αυτεπαγωγής και συνεπώς της επαγωγικής αντίστασης (Σχήμα 1.10).



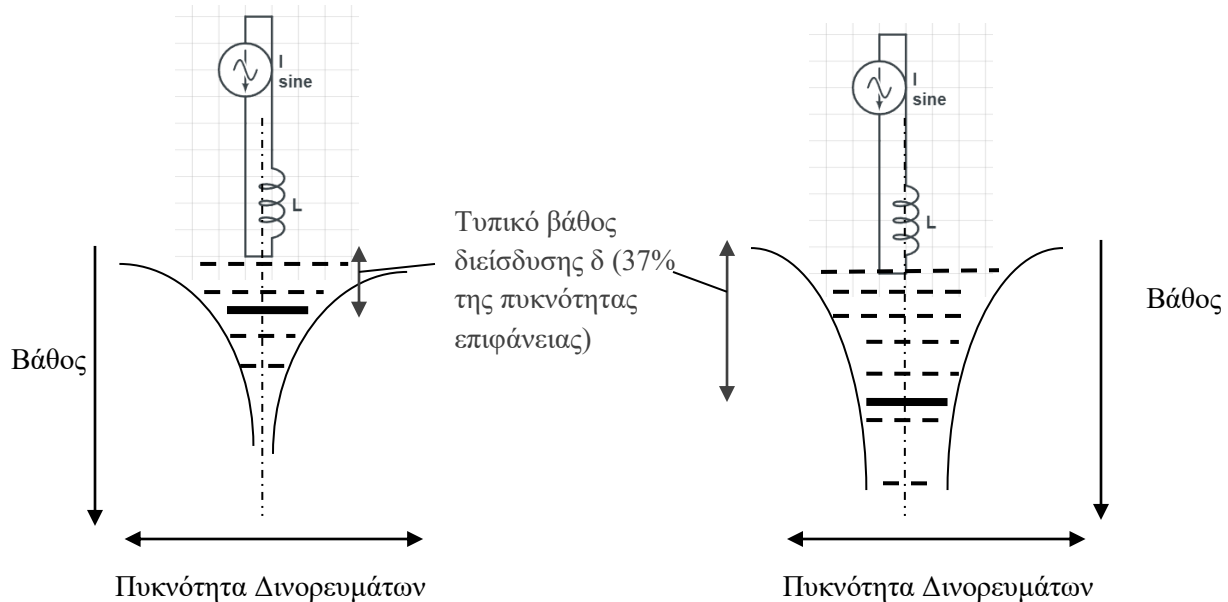
Σχήμα 1.10β Η τιμή της X_L όταν το πηνίο πλησιάζει σε σιδηρομαγνητικό υλικό.

Το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων επηρεάζει και την επιλογή συχνότητας λειτουργίας στο υλικό που ελέγχεται. Τα δινορεύματα είναι πιο ισχυρά στην επιφάνεια του υλικού και η ένταση μειώνεται εκθετικά όσο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης κάτω από την επιφάνεια (Σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11 Εκθετική μείωση της πυκνότητας των δινορευμάτων σε σχέση με το βάθος.

Το βάθος διείσδυσης ή επιδερμικό βάθος δ , είναι η απόσταση που απαιτείται για να μειωθεί η πυκνότητα των δινορευμάτων στο $1/e$ της τιμής του ρεύματος επιφάνειας (περίπου στο 37% της τιμής του ρεύματος στην επιφάνεια). Το βάθος δ μεταβάλλεται σε σχέση με τη συχνότητα του αισθητήρα, καθώς και με την αγωγιμότητα και διαπερατότητα του υλικού (Σχήμα 1.12). Αυτό συμβαίνει επειδή η αγωγιμότητα, η διαπερατότητα και η ποσότητα του στερεού υλικού επηρεάζουν την ισχύ και πυκνότητα των δινορευμάτων. Η ισχύς των δινορευμάτων μεταβάλλει την αντίσταση Z του πηνίου, γεγονός που βοηθάει στο προσδιορισμό της ισχύς..



Σχήμα 1.12 Τυπικό βάθος διείσδυσης για (αριστερά) υψηλά χαρακτηριστικά και (δεξιά) χαμηλά χαρακτηριστικά.

Κάθε εκθετική αύξηση του βάθους δ , θα μειώνει και την ισχύ κατά 37% της τιμής του. Δηλαδή για βάθος 2δ , η τιμή θα μειωθεί στο 37% του 37% της τιμής για βάθος δ , άρα στο 13.5% και ούτω κάθε εξής. Το τυπικό βάθος διείσδυσης δίνεται από την εξίσωση 1.20:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (1.20)$$

όπου, μ = σχετική διαπερατότητα, σ = αγωγιμότητα, f = συχνότητα λειτουργίας

Για μη μαγνητικά υλικά, η εξίσωση 1.20 υπολογίζεται στη προσεγγιστική μορφή:

$$\delta = \frac{88}{\sqrt{\sigma f}} \quad (1.21)$$

με μονάδες: $\delta = \text{cm}$, $f = \text{Hertz}$, και $\sigma = \% \text{IACS}$.

Στα μέταλλα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εκφράζεται ως ένα ποσό της αγωγιμότητας καθαρού χαλκού, γνωστό και ως διεθνές πρότυπο IACS (International Annealed Copper Standard) ίσο με ειδική αντίσταση $1,7241 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ στους 20°C .

1.4.3 Βάθος διείσδυσης

Η διάμετρος του πηνίου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία της μεθόδου ελέγχου με δινορεύματα. Η απόσταση lift-off εξαρτάται από το μήκος του πηνίου, δηλαδή αν το πηνίο είναι μικρό, τότε και η απόσταση lift-off θα διαφέρει. Η συνθήκη $DD \cong 1,5 d$ αποτελεί ένα πρακτικό περιορισμό της ευαισθησίας της μεθόδου^[1]. Η διάμετρος του πηνίου θα πρέπει να υπολογίζεται μαζί με το φαινόμενο διακύμανσης διείσδυσης, ώστε να έχουμε το επιθυμητό βάθος διείσδυσης.

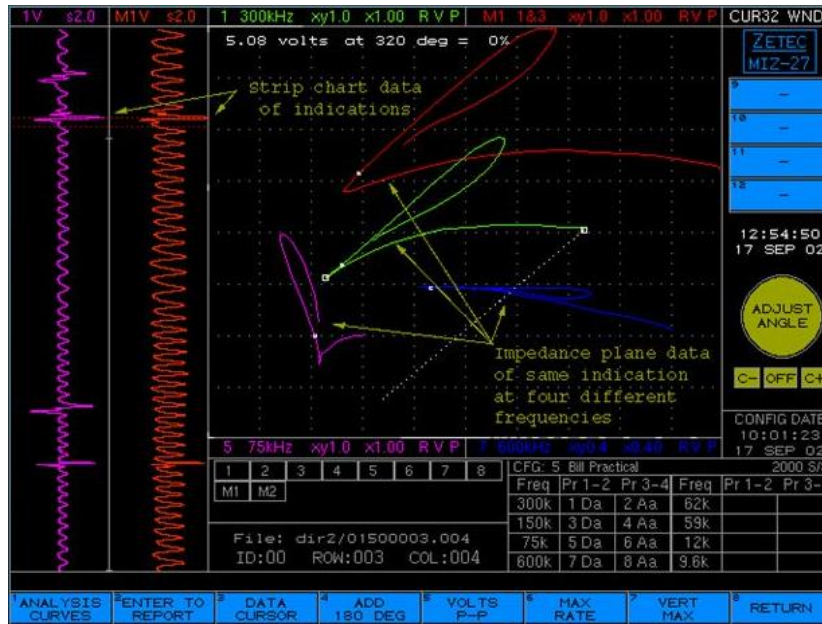
1.4.4 Όργανα Μέτρησης και μελέτης

Τα όργανα μέτρησης των δινορευμάτων χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τα ψηφιακά και τα αναλογικά. Τα ψηφιακά όργανα μέτρησης (Εικόνα 1.11 αριστερά) είναι σχεδιασμένα για να εξετάσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός δοκιμίου, όπως την αγωγιμότητα ή το πάχος μη αγωγίμου καλύμματος, δυνατότητα που τα καθιστά πιο ακριβή από τα αναλογικά συστήματα (Εικόνα 1.11 δεξιά).



Εικόνα 1.11 Όργανα μέτρησης δινορευμάτων – ψηφιακά (αριστερά), αναλογικά (δεξιά).

Τα σύγχρονα όργανα μέτρησης είναι σε πλειοψηφία ψηφιακά και λειτουργούν σε μία ή δύο συχνότητες. Όργανα που λειτουργούν με διπλή συχνότητα έχουν τη δυνατότητα να οδηγούν τον αισθητήρα διαδοχικά σε δύο διαφορετικές συχνότητες ελέγχου. Υπάρχουν και όργανα πολλαπλών συχνοτήτων με τη δυνατότητα να λειτουργούν σε πολλαπλές συχνότητες είτε διαδοχικά ή ταυτόχρονα. Τέτοια όργανα μπορούν να έχουν ταυτόχρονα συνδεδεμένους έως και τέσσερις αισθητήρες και χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.



Εικόνα 1.12 Οθόνη συσκευής πολλαπλών συχνοτήτων.

1.4.4.1 Αισθητήρες και πηνία

Η σωστή λήψη δεδομένων βασίζεται στη σωστή επιλογή αισθητήρα. Υπάρχουν κάποιοι συγκεκριμένοι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε αυτή την επιλογή^[1]:

- Βάθος διείσδυσης
- Ευαισθησία
- Τύπο σύνδεσης του αισθητήρα με το όργανο μέτρησης δινορευμάτων
- Αντιστοιχία της εμπέδησης του αισθητήρα με αυτή του οργάνου μέτρησης
- Μέγεθος αισθητήρα (μικρότεροι αισθητήρες διεισδύουν σε μικρότερο βάθος)
- Τύπο αισθητήρα

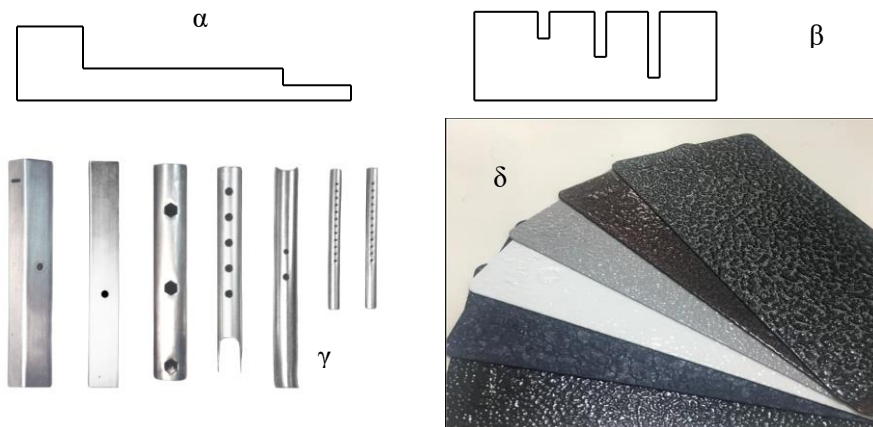
Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των αισθητήρων δινορευμάτων υπάρχουν πολλά διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης. Μερικά παραδείγματα αισθητήρων περιλαμβάνουν:

- Οι αισθητήρες επιφανείας είναι πηνία που συνήθως είναι τοποθετημένα κοντά στο ένα άκρο του πλαστικού περιβλήματος. Ορισμένοι αισθητήρες επιφανείας είναι ειδικά σχεδιασμένοι για την ανίχνευση ρωγμών.
- Οι αισθητήρες εσωτερικής διαμέτρου που αποτελούνται από πηνίο που περιελίσσεται γύρω από ένα πλαστικό κάλυμμα ή περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα.

- Οι αισθητήρες εξωτερικής διαμέτρου αποτελούνται από πηνίο που περιελίσσεται γύρω από ένα κοίλο περίβλημα.^[1]

1.4.4.2 Πρότυπα δοκίμια αναφοράς

Για να είναι αξιόπιστα τα δεδομένα που λαμβάνονται με τη χρήση δινορευμάτων, τα σήματα θα πρέπει να συγκρίνονται με κάποια συγκεκριμένα δοκίμια αναφοράς. Αυτά τα δοκίμια κατασκευάζονται από υλικά παρόμοια με αυτά των αντικειμένων που μελετώνται (Σχήμα 1.1α). Πρότυπα πάχους χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της λεπτότητας του υλικού λόγω διάβρωσης (Σχήμα 1.1α-α). Πρότυπα δοκίμια από το ίδιο υλικό με τα υπό έλεγχο δοκίμια, με εγχοπές παρέχουν δεδομένα σχετικά με άγνωστες επιφανειακές ρωγμές (Σχήμα 1.1α-β)^[1]. το αντίστοιχο διάγραμμα εμπέδησης. Στο Σχήμα 1.1α-γ παρουσιάζονται πρότυπα σωληνώσεων με οπές ή ραβδώσεις. Τέλος στο Σχήμα 1.1α-δ φαίνεται ένα πρότυπο μη αγώγιμης επικάλυψης (ρητίνη) σε μεταλλική επιφάνεια.



Σχήμα 1.13 (α) Πρότυπο διαβρώσεων πάχους, (β) Πρότυπο ρωγμών, (γ) Πρότυπα σωληνώσεων, (δ) Πρότυπα μη αγώγιμης επικάλυψης

1.4.5 Έλεγχος μη-μαγνητικών αγώγιμων υλικών

Σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά που δεν μαγνητίζονται, η συχνότητες που απαιτούνται φτάνουν σε υψηλές τιμές (μέχρι και MHz), στην ανεύρεση επιφανειακών ατελειών, αλλά για υποεπιφανειακές ατέλειες, χρησιμοποιούνται χαμηλές συχνότητες, μειώνοντας εν τέλει την ευαισθησία των δινορευμάτων, γεγονός που καθιστά την ανίχνευση μικρών ατελειών δύσκολη.

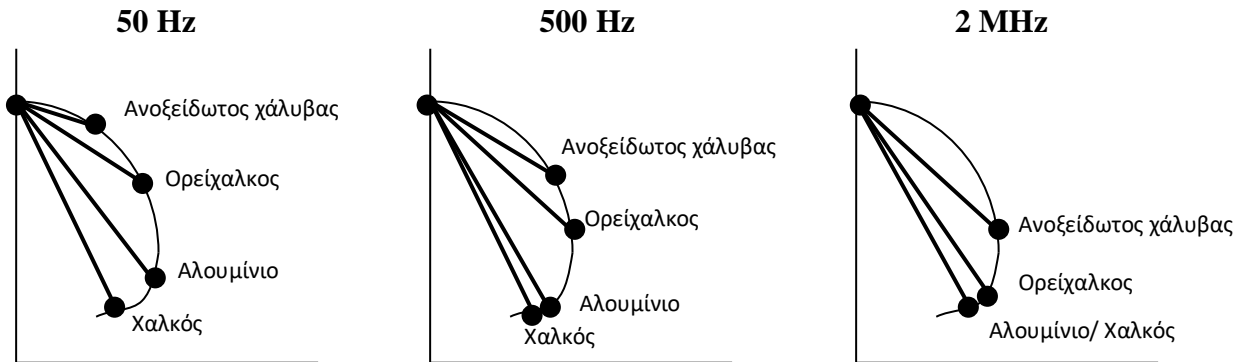
Η επιλογή συχνότητας παίζει σημαντικό ρόλο στην απαλοιφή των ανεπιθύμητων μεταβλητών:

Για παράδειγμα σε ανοξειδωτο σωλήνα:

- Σε συχνότητα 50 kHz, οι μεταβλητές lift-off και αγωγιμότητας δεν είναι ξεκάθαρες.
- Σε συχνότητα 2 MHz, οι μεταβλητές ξεχωρίζουν.

Για το αλουμίνιο:

- Σε συχνότητα 50 kHz, το αλουμίνιο ξεκάθαρα διαχωρίζεται από τον χαλκό.
- Σε συχνότητα 2 MHz, οι γραμμές lift-off πρακτικά συμπίπτουν μεταξύ τους



Σχήμα 1.14 Η κατάλληλη επιλογή συχνότητας στην απαλοιφή ανεπιθύμητων μεταβλητών για μη μαγνητικά αγώγιμα υλικά.

Σε κάθε υλικό συγκεκριμένης αγωγιμότητας, είναι εφικτό να βρεθεί θεωρητικά η χαρακτηριστική συχνότητα η οποία προκύπτει από την σχέση:

$$f_g = \frac{5066}{\mu_{rel}\sigma d^2} \quad (1.26)$$

Αντιστοίχως για αισθητήρες πηνίου ισχύει η σχέση:

$$f_g = \frac{1354}{\mu_{rel}\sigma d^2} \quad (1.27)$$

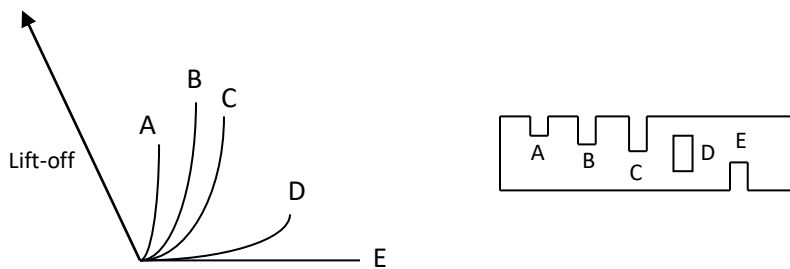
όπου, μ_{rel} = σχετική μαγνητική διαπερατότητα, σ = ηλεκτρική αγωγιμότητα, d = διάμετρος του πηνίου.

1.4.6 Εφαρμογές μελέτης δινορευμάτων

1.4.6.1 Ανίχνευση Ρωγμών

Η ανίχνευση ρωγμών είναι μία από τις κύριες εφαρμογές του ελέγχου με δινορεύματα, εξαιτίας της ευαισθησίας στις ρωγμές κοντά στην επιφάνεια του υλικού. Σε σημεία που υπάρχει παρουσία ρωγμής, η ισχύς των ρευμάτων μειώνεται και η ροή τους αλλάζει. Βάση θεωρίας η αλλαγή στη φάση αυξάνεται γραμμικά ανάλογα του βάθους των δινορευμάτων. Βάσει θεωρίας, η μετατόπιση φάσης αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το βάθος των δινορευμάτων^[1].

Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα εμπέδησης ανάλογα με το βάθος και το είδος της ρωγμής. Η γραμμή lift-off διαφέρει βάσει των διαφορών βάθους και έτσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις επιφανειακές ρωγμές από τις βαθύτερες.



Σχήμα 1.15 Διάγραμμα εμπέδησης για επιφανειακές και υποεπιφανειακές ρωγμές.

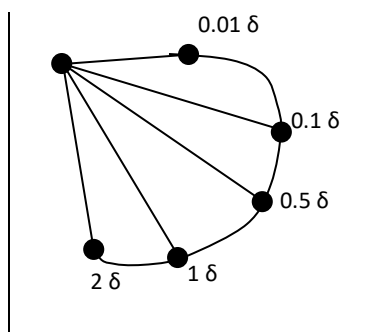
Οι επιφανειακές ρωγμές τείνουν πιο κοντά στη γραμμή lift-off, ενώ οι πιο βαθιές ρωγμές εμφανίζονται σε πιο μακριά από την γραμμή lift-off, με τις επιφανειακές ρωγμές στην αντίθετη επιφάνεια να είναι στο πιο μακρινό σημείο του διαγράμματος εμπέδησης.

1.4.6.2 Μέτρηση πάχους Υλικών

Η μέτρηση πάχους αντικειμένων με δινορεύματα είναι εφικτή αλλά είναι περιορισμένη σε δυνατότητες, επειδή κάθε υλικό έχει και ένα όριο στην ισχύ δινορευμάτων που μπορεί να δεχτεί, ανάλογα με τον όγκο του υλικού. Η ισχύς μπορεί να υπολογιστεί και να συσχετιστεί με το πάχος του υλικού, επειδή μια αλλαγή στο πάχος μπορεί αλλάξει τη συνολική αντίσταση του πηνίου.

Τέτοιες μελέτες γίνονται συνήθως στην βιομηχανία αεροπορίας αλλά και στον έλεγχο σωληνώσεων σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή χημικές εγκαταστάσεις για έλεγχο διάβρωσης, επειδή η διάβρωση προκαλεί μείωση στο πάχος του υλικού κατασκευής, ο έλεγχος πάχους με δινορεύματα είναι πιο ακριβής.

Χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα σε μη-μαγνητικό, επίπεδο υλικό υψηλής αγωγιμότητας, αφήνει το lift-off ως το μόνο ζητούμενο (Σχήμα 1.14). Θεωρώντας δ το τυπικό βάθος διεύθυνσης και τις καμπύλες αγωγιμότητας να θεωρούν το αντικείμενο με πάχος 4δ , όσο θα μικραίνει το πάχος, η καμπύλη θα προσεγγίσει το σημείο της ατέλειας.



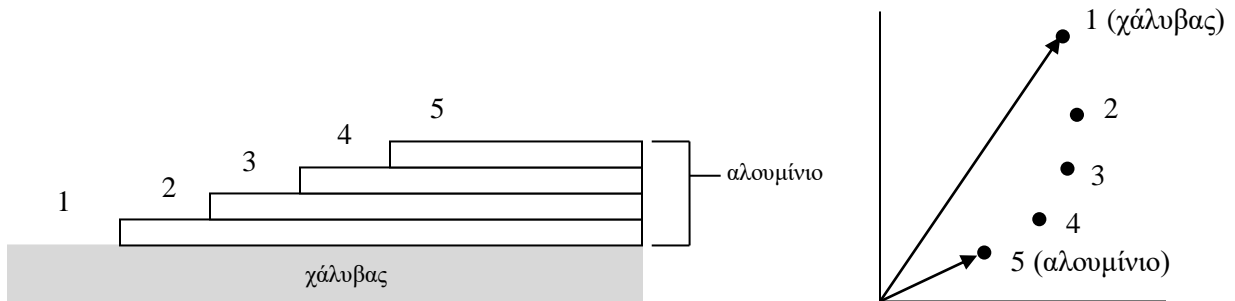
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} \quad (1.28)$$

Σχήμα 1.16 Καμπύλη πάχους για υλικό υψηλής αγωγιμότητας.

Εξαιτίας της εξίσωσης (1.28), η συχνότητα επηρεάζει τη επιλογή συχνότητας και την καμπύλη πάχους. Σε λεπτές μεταλλικές επιστρώσεις πάνω από λεπτό μη αγωγίμο υπόστρωμα, τα πάχη μετρούνται ταυτόχρονα. Σε μη αγωγίμες επιστρώσεις, τα δινορεύματα είναι ακριβή σε

ηλεκτρικά υποστρώματα, επειδή η επίστρωση είναι εμπόδιο στον αισθητήρα και προκαλεί μείωση της ισχύς των δινορευμάτων.

Εάν όμως η διείσδυση δεν επαρκεί, τότε η συχνότητα πρέπει να είναι χαμηλή ώστε τα δινορεύματα να μπορέσουν να διεισδύσουν στο επιθυμητό βάθος του υλικού. Στο παράδειγμα του Σχήματος 1.15, έχουμε μια πλάκα ανοξειδωτού χάλυβα και από πάνω του επιστρώσεις μη μαγνητικού μετάλλου ομοίου πάχους (αλουμινίου). Για να μπορέσουν τα δινορεύματα να διεισδύσουν βαθιά ώστε να φτάσουν στα δινορεύματα, η διάμετρος του πηνίου πρέπει να ανάλογα μεγάλη ώστε να φτάσει ως εκεί.

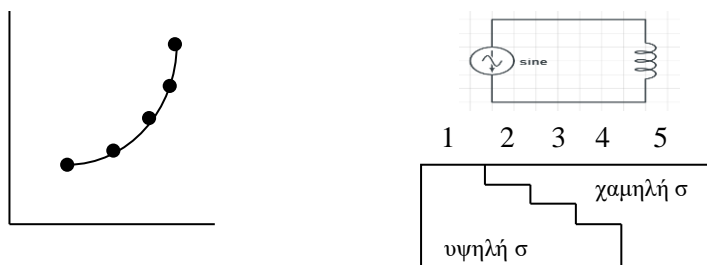


Σχήμα 1.17 Επίστρωση αλουμινίου με διαφορετικά πάχη πάνω σε βάση χάλυβα (αριστερά), διάγραμμα πέδησης για το πάχη αλουμινίου (δεξιά).

1.4.6.3 Μελέτη αγωγίμων επιστρώσεων σε αγώγιμη βάση

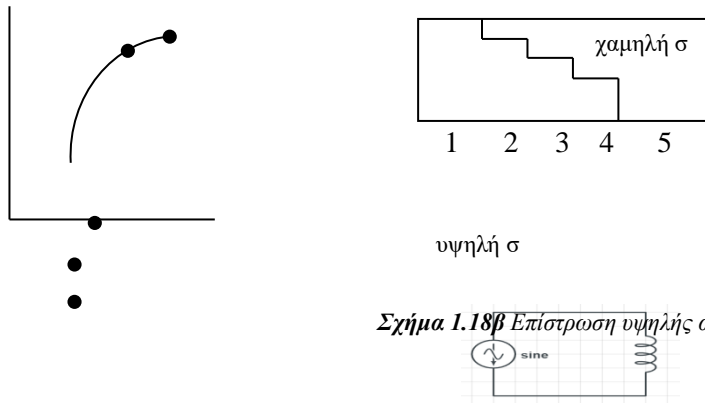
Η έκταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να επαρκεί ώστε να γίνει αισθητή η παρουσία ενός αγωγίμου υλικού. Αν το αγωγίμο υλικό έχει διαφορετικό πάχος, τότε η συχνότητα μπορεί να ρυθμιστεί πιο υψηλά ώστε να μην φτάσει στην αντίθετη πλευρά του υλικού. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση αγωγιμότητας αγωγίμων επιστρώσεων πάνω σε αγωγίμο υλικό, με σκοπό τον έλεγχο της επίστρωσης μοναχικά, αρκεί οι αγωγιμότητες των μεταξύ των υλικών να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Σε ειδικές περιστάσεις μπορούν να κατασκευαστούν πρότυπα για τη μελέτη των δύο υλικών. Έχοντας υπόψη ότι η διείσδυση στο υλικό είναι καλή, η συχνότητα θα πρέπει να επιλεγεί αναλόγως.

Εάν η επίστρωση έχει χαμηλότερη αγωγιμότητα (σ), το σύστημα βλέπει lift-off από το υλικό βάσης (Σχήμα 1.16α).



Σχήμα 1.18α Επίστρωση χαμηλής αγωγιμότητας από το υλικό βάσης.

Εάν αντίθετα, η επίστρωση έχει υψηλότερη αγωγιμότητα (σ), το σύστημα βλέπει την επίστρωση να γίνεται λεπτότερη (Σχήμα 1.16β).



Σχήμα 1.18β Επίστρωση υψηλής αγωγιμότητας από το υλικό βάση.

1.4.6.4 Έλεγχος αποκόλλησης

Κανονικά, τα δινορεύματα δεν μπορούν να ανιχνεύσουν αποκολλήσεις, επειδή ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος με την πορεία των δινορευμάτων. Όμως μια ατέλεια όπως ένα κενό αέρα ή διάβρωση στο άκρο μιας οπής θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή αν θεωρηθεί ως στρώση του υλικού.

1.4.6.5 Έλεγχος σιδηρομαγνητικών υλικών

Τα δινορεύματα δεν μπορούν να διεισδύσουν πολύ βαθιά σε τέτοια υλικά, γι'αυτό οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι πολύ χαμηλές, επειδή μόνο στην περίπτωση επιφανειακών ατελειών μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο υψηλότερες συχνότητες. Παρόλα αυτά αυτές οι συχνότητες είναι και πάλι μικρότερες σε σχέση με αυτές που εφαρμόζονται στη μελέτη μη μαγνητικών υλικών.

1.4.7 Σύνοψη

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου των δινορευμάτων στο μη καταστροφικό έλεγχο περιγράφονται παρακάτω:

- Ευαισθησία στις μικρές ρωγμές και άλλες ατέλειες.
- Ανιχνεύονται ατέλειες στην επιφάνεια και στο βάθος του υλικού.
- Άμεση λήψη αποτελεσμάτων σε φορητά συστήματα με δυνατότητες αυτοματοποίησης.
- Κατάλληλη μέθοδος για προσδιορισμό της αγωγιμότητας και διαπερατότητας.
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του δοκιμίου.
- Ελέγχει αγώγιμα υλικά με σύνθετα σχήματα και μεγέθη.
- Δεν απαιτούνται αναλώσιμα (με εξαίρεση αισθητήρες που πρέπει να επισκευάζονται μετά από μια περίοδο χρήσης).
- Ανάλογα με την εφαρμογή υπάρχει και η κατάλληλη συχνότητα και αισθητήρας.
- Υπάρχουν και αισθητήρες σχεδιασμένοι για περίπλοκες γεωμετρίες.

- Δεν επιφέρει βλάβη προς το περιβάλλον.

Αλλά σε μειονεκτήματα και περιορισμούς συμπεριλαμβάνονται:

- Ελέγχονται μόνο αγώγιμα υλικά.
- Η επιφάνεια πρέπει να είναι προσπελάσιμη στον αισθητήρα.
- Υψηλότερο επίπεδο εκπαίδευσης σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- Τραχείες επιφάνειες προκαλούν παρεμβολές στη πορεία των κυμάτων.
- Πρότυπα αναφοράς.
- Περιορισμένο βάθος διεύθυνσης.
- Ατέλειες, όπως οι αποκολλήσεις που είναι συνήθως παράλληλες στην διεύθυνση των κυμάτων, δεν ανιχνεύονται εύκολα.
- Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα δινορεύματα είναι πολλές με επιπρόσθετες σε ειδικές περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 1.5 Διεισδυτικά υγρά

Η μέθοδος διεισδυτικών υγρών (Δ.Υ.) βασίζεται στην οπτικό έλεγχο με τη χρήση υγρού έγχρωμου εμφανιστή για την ανεύρεση επιφανειακών ατελειών. Το υγρό διεισδύει στη ρωγμή και την κάνει πιο ευδιάκριτη για τον χειριστή.



Εικόνα 1.14 Εφαρμογή διεισδυτικών υγρών σε συγκόλληση.

1.5.1 Βάσεις αρχής μεθόδου

Η μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή λεπτόρρευστων υγρών με υψηλή διαβροχή. Ως διαβροχή εννοούμε την ικανότητα ενός υγρού να καλύπτει μια επιφάνεια σε μεγάλο εύρος χωρίς να σχηματίζει σταγόνες στην επιφάνεια. Το νερό είναι ένα παράδειγμα υγρού υψηλής διαβροχής, αλλά υγρά όπως το μέλι ή ο υδράργυρος δεν ρέουν εύκολα, είναι πιο συμπαγή και δεν εξαπλώνονται εύκολα σε επιφάνειες.

Η μέθοδος εκμεταλλεύεται το φαινόμενο των τριχοειδών αγγείων. Το φαινόμενο εξηγείτε ως εξής: όταν ένας λεπτός σωλήνας μπαίνει μέσα σε ένα ρευστό, τότε η στάθμη μέσα στο σωλήνα θα είναι πιο ψηλή από ότι αυτή του ρευστού μέσα στο δοχείο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ισορρόπησης δυνάμεων συνοχής, συνάφειας και της ατμοσφαιρικής πίεσης. Στη μέθοδο των Διεισδυτικών υγρών, το υγρό ‘ανεβαίνει’ από την επιφανειακή ατέλεια, αντίθετα της βαρύτητας εξαιτίας της διαβροχής της επιφάνειας. Ένα παράδειγμα είναι η διατομή Bernoulli, όπου όταν η διατομή του σωλήνα μειώνεται, τότε η ροή υγρού αυξάνεται, ή όπως το ανθρώπινο σώμα, όπου στα τριχοειδή αγγεία η ροή είναι πολύ γρήγορη σε λεπτά τοιχώματα.

1.5.2 Καταλληλότητα υλικού

Για να μπορέσει ένα αντικείμενο να μελετηθεί με τη χρήση Δ.Υ. θα πρέπει να έχει σχετικά λεία επιφάνεια χωρίς πολλούς πόρους στην επιφάνεια. Αν και χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεταλλικές επιφάνειες, τα Δ.Υ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες ανάλογες επιφάνειες με εξαίρεση σε μερικές περιπτώσεις. Τα Δ.Υ. δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επιφάνειες κεραμικών, ξύλου και μετάλλων που κατασκευάζονται με χύτευση σε άμμο. Τέτοιες επιφάνειες έχουν μεγάλη προσρόφηση σε πολλά σημεία, λόγω πόρων και τραχύτητας, και δεν θα δώσει κατάλληλα αποτελέσματα ώστε να διακριθούν οι σωστές ατέλειες από αυτές της μικροδομής. Τα πλαστικά επίσης δεν μελετούνται επειδή συνήθως αντιδράνε τη σύσταση του υγρού, αλλά και πλαστικά που (δεν) απορροφάνε τα Δ.Υ. δεν είναι κατάλληλα για μελέτη.

1.5.3 Ιδιότητες των Διεισδυτικών Υγρών

Τα Δ.Υ. πρέπει να χαρακτηρίζονται από κάποιες ιδιότητες για να χρησιμοποιηθούν. Πρέπει:

- Να απορροφούνται εύκολα από επιφανειακές ρωγμές
- Να μπορούν να παραμένουν μέσα αλλά ταυτόχρονα να υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσης από την υπόλοιπη επιφάνεια
- Να μην στερεοποιούνται ή να εξατμίζονται κατά τη χρήση τους στη διαδικασία ελέγχου.
- Να ξεχωρίζουν από την υπόλοιπη επιφάνεια είτε λόγω χρωματισμού ή αν είναι φωσφορίζοντα.
- Να μην προκαλούν βλάβες στον χειριστή και στο αντικείμενο προς μελέτη.

Η μέθοδος έχει 4 επίπεδα ευαισθησίας, με 4 την μεγαλύτερη ευαισθησία και 1 την πιο χαμηλή. Ταυτόχρονα, όσο πιο υψηλό το επίπεδο τόσο πιο μικρό και το μέγεθος της ρωγμής που μπορεί να εμφανιστεί, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης ενδείξεων που μπορεί να είναι ατέλειες. Γι'αυτό το λόγο το επίπεδο ευαισθησίας θα πρέπει να επιλέγεται συναφή με την μορφή της επιφάνειας ώστε να ανεβρεθούν οι απαιτούμενες ατέλειες. Όπως αναφέρθηκε και πάνω στις ιδιότητες, τα Δ.Υ. μπορούν να είναι απλά χρωματισμένα υγρά με ευαισθησία μέχρι το 1 αλλά και φωσφορίζουσα, τα οποία αντιδράνε στο υπεριώδες φως σε σκοτεινούς χώρους, με την ευαισθησία τους να φτάνει στην ανώτατη κλίμακα.

1.5.4 Εφαρμογή μεθόδου

Μετά την εφαρμογή του υγρού διείσδυσης, εφαρμόζεται ο εμφανιστής. Ο εμφανιστής, τραβάει το υγρό από την ρωγμή και το απλώνει στην επιφάνεια ώστε να μπορεί να διακριθεί πιο εύκολα. Ο εμφανιστής προσφέρει ένα φόντο για να μπορέσει να διακριθεί πιο εύκολα το Δ.Υ.. Εμφανιστές υπάρχουν σε διάφορες μορφές:

- Σκόνη η οποία ρευστοποιείται ή αλλάζει χρώμα όταν συνδυάζεται με το Δ.Υ.
- Αιώρημα με νερό, το οποίο καλύπτει την επιφάνεια και μετά κρυσταλλοποιείται όταν εξατμίζεται το νερό.
- Διάλυμα σε νερό, όπου όταν το νερό εξατμίζεται θα μείνει μια κρυσταλλική σκόνη.
- Εμφανιστής σε μορφή συμπιεσμένου αέρα, που είναι πιο ευαίσθητος και ακριβής για μικρές επιφάνειες.

1.5.4.1 Καθαρισμός Δ.Υ.

Επιπλέον, τα Δ.Υ. κατηγοριοποιούνται με το τρόπο που καθαρίζονται από την επιφάνεια εφαρμογής τους. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες:

- Δ.Υ. που αφαιρούνται με ειδικό διαλύτη. Αυτά είναι υγρά τα οποία δεν αφαιρούνται απλά και χρειάζονται ένα υγρό ώστε να βοηθήσει στο καθαρισμό του ώστε να μην αφαιρείται το υγρό που έχει εισχωρήσει μέσα στις ρωγμές.

- Δ.Υ. διαλυτά σε νερό. Αυτά τα Δ.Υ. αφαιρούνται απλά με τη χρήση νερού και χαρτιού καθαρισμού.

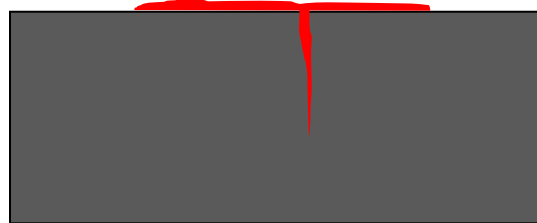
1.5.5 Διαδικασία μελέτης Δ.Υ.

Η διαδικασία των ΔΥ περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα με τις αντίστοιχες σχηματικές αναπαραστάσεις:

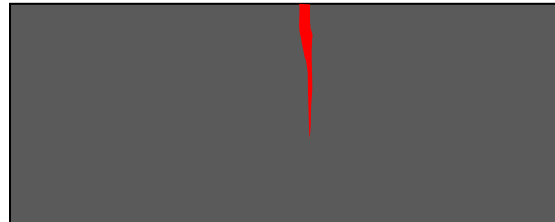
- **Βήμα 1: Καθαρισμός και της επιφάνειας του υλικού.** Η επιφάνεια πρέπει να είναι καθαρή από οτιδήποτε ακαθαρσίες (σκουριά, γρέζια, λάδι) ώστε να μπορέσει το υγρό να διεισδύσει μέσα στις ρωγμές.



- **Βήμα 2: Εφαρμογή του Δ.Υ.** Το υγρό απλώνεται στην επιφάνεια σε οποιαδήποτε μορφή είναι η παροχή του, είτε σε σπρέι είτε σε μορφή μαρκαδόρου. Ανάλογα με το υγρό, θα χρειαστεί λίγος χρόνος αναμονής ώστε να διαπεράσει το υγρό μέσα στις ρωγμές, χρόνος που κυμαίνεται μεταξύ 5 έως και 20 λεπτών.



- **Βήμα 3: Καθαρισμός του περίσσιου υγρού.** Αφότου, περάσει ο χρόνος αναμονής, το περίσσιο υγρό αφαιρείται με το κατάλληλο τρόπο, είτε με ειδικό διαλύτη είτε απλά με νερό. Πάντα όμως πρέπει να ελέγχεται η πίεση εφαρμογής του υγρού καθαρισμού, επειδή με υψηλή πίεση μπορεί να αφαιρεθεί το υγρό μέσα από τις ρωγμές και να μην δώσει τα κατάλληλα αποτελέσματα. Μετά και πάλι από λίγο χρόνο αναμονής, να εξατμιστεί και το λιγιστό υγρό που έμεινε απάνω, προχωράμε στο επόμενο βήμα.



- **Βήμα 4: Εφαρμογή «εμφανιστή».** Όπως αναφέρθηκε και πάνω, εφαρμόζεται ο εμφανιστής στην παρεχόμενη μορφή του. Ο χρωματιστής θα αρχίσει να αντιδρά με το υγρό και θα φέρει το αντίστοιχο επιθυμητό αποτέλεσμα. Είτε σε κρυσταλλική μορφή ή σε υγρή μορφή, στην οποία περίπτωση θα πρέπει να καλυφθεί μεγάλο μέρος της επιφάνειας ώστε να μπορέσουν να εμφανιστούν οι ρωγμές με το χρωματισμένο υγρό.



- **Βήμα 5: Επιθεώρηση του μελετημένου αντικειμένου.** Μετά από λίγο χρόνο, το υγρό θα έρθει στην επιφάνεια και θα δείξει τα αντίστοιχα σημεία ρωγμής. Μετά θα γίνει επιθεώρηση για να ξεκαθαριστούν οι αληθινές ρωγμές από τις ατέλειες της δομής του υλικού. Οποιαδήποτε η ετυμηγορία, τα αποτελέσματα είναι καλό πάντα να καταχωρούνται σε αρχείο.
- **Βήμα 6: Καθαρισμός του τεμαχίου.** Τέλος, το τεμάχιο πρέπει να καθαριστεί πλήρως ώστε να χρησιμοποιηθεί για την καθορισμένη του χρήση.



1.5.6 Σύνοψη

Όσο αφορά τα πλεονεκτήματα, τα ΔΥ έχουν:

- Σύντομη και απλή εφαρμογή.
- Ανοιχτό εύρος εφαρμογής.
- Ταχύτερη μελέτη μεγάλων επιφανειών.
- Η γεωμετρία του υλικού δεν μεταβάλλεται.
- Οι ενδείξεις παρέχονται ακριβώς εκεί που βρίσκονται οι ρωγμές, χωρίς να χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση (άμεση οπτικοποίηση της βλάβης).
- Μικρό αρχικό κόστος επένδυσης, συν το γεγονός ότι τα υλικά της μελέτης είναι απόλυτα φορητά

Όμως σε μειονεκτήματα

- Περιορίζεται μόνο σε επιφανειακές ατέλειες.
- Η επιφάνεια πρέπει να είναι λεία και όχι τραχύς ή πορώδης.
- Καθαρισμός επιφάνειας πριν και μετά τη διαδικασία ελέγχου.
- Λειτουργεί υπό καθορισμένες συνθήκες.

Κεφάλαιο 1.6 Έλεγχος με τη χρήση μαγνητικών σωματιδίων



Εικόνα 1.15 Έλεγχος περιμέτρου σωλήνα με τη χρήση ηλεκτρομαγνήτη και μαγνητικών ρινισμάτων

Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται τη διαρροή του μαγνητικού πεδίου, εξαιτίας των ρωγμών σε μια επιφάνεια. Όταν υπάρχει μια ρωγμή στην επιφάνεια, το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται παρουσιάζει διαρροές οι οποίες μπορούν να καλυφθούν με τη χρήση φερρομαγνητικών μεταλλικών ρινισμάτων. Αυτά τα ρινίσματα, εφαρμόζονται πάνω στην επιφάνεια, και όταν εφαρμόζεται το μαγνητικό πεδίο, τα ρινίσματα έλκονται στα σημεία διαρροής ώστε να τα καλύψουν.

1.6.1 Βασική Αρχή

Ως μαγνητισμός, εννοούμε τις δυνάμεις που έλκουν ή απωθούν σε μια ύλη, με τα υλικά που έχουν την ιδιότητα ονομάζονται μαγνητικά. Ο μαγνητισμός δημιουργεί «γραμμές» οι οποίες σχηματίζουν μια συνεχή πορεία μεταξύ των δύο μαγνητικών πόλων. Όπως αναφέρθηκε και πάνω, τα υλικά που μελετούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι φερρομαγνητικά. Στο υλικό εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο με τη χρήση μαγνητών ή ενός ηλεκτρομαγνήτη ή με κάποιο άλλο εξοπλισμό. Αν υπάρχει ασυνέχεια κοντά στην επιφάνεια του υλικού, θα παρουσιαστεί διαρροή στο μαγνητικό πεδίο, η οποία καλύπτεται όταν τα μαγνητικά σωματίδια εφαρμοστούν στην επιφάνεια και μετά έλκονται από τις διαρροές στο μαγνητικό πεδίο.

1.6.2 Διαδικασία μεθόδου μελέτης

Τα βασικά βήματα της μεθόδου είναι:

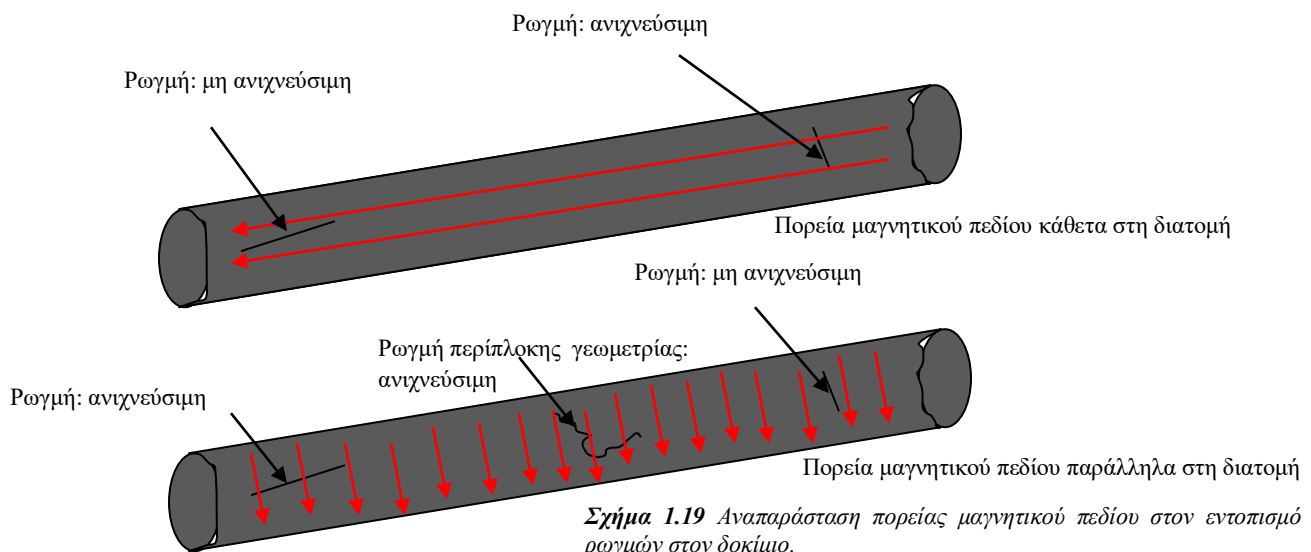
1. Καθαρισμός επιφάνειας
2. Εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου
3. Εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων
4. Ερμηνεία των ενδείξεων

Κάθε βήμα αναλύεται σύντομα παρακάτω:

- **Βήμα 1: Καθαρισμός τεμαχίου:** Η επιφάνεια πρέπει να είναι καθαρή από οτιδήποτε μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στην εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου ή την εφαρμογή των μαγνητικών ρινισμάτων.
- **Βήμα 2: Εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου:** Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να εφαρμοστεί με διαφορετικούς τρόπους:
 - Με μόνιμο μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη σε επαφή με το τεμάχιο.
 - Με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.
 - Με ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από πηνίο που τοποθετείται γύρω από το προς εξέταση τεμάχιο.

Μπορούν να εφαρμοσθούν δύο γενικοί τύποι μαγνητικού πεδίου, διάμηκες και προς τη διατομή (κυκλικό). Στο διάμηκες πεδίο (Σχήμα 1.18 πάνω) οι μαγνητικές γραμμές είναι παράλληλες προς τον άξονα του τεμαχίου (κόκκινα βέλη στα σχήματα), ενώ στο κυκλικό οι μαγνητικές γραμμές τρέχουν περιφερειακά και είναι παράλληλες στη διατομή του υλικού (Σχήμα 1.15 κάτω)^[1].

Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου βασίζεται στην θέση της ρωγμής. Η μορφή της ρωγμής θα πρέπει να είναι κάθετη στην διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου ή τουλάχιστον σε γωνία 45°, διαφορετικά, αν είναι παράλληλη στη πορεία του μαγνητικού πεδίου, δεν θα μπορέσει να εμφανιστεί.



Σχήμα 1.19 Αναπαράσταση πορείας μαγνητικού πεδίου στον εντοπισμό ρωγμών στον δοκίμιο.

- **Βήμα 3: Εφαρμογή των μαγνητικών σωματιδίων:** Τα μαγνητικά σωματίδια παρέχονται σε μορφή σκόνης αλλά και αραιωμένα σε υγρό. Σε ξηρή μορφή, τα σωματίδια ψεκάζονται πάνω στην επιφάνεια. Στην υγρή μορφή, το υγρό απλώνεται στην επιφάνεια, το οποίο είναι εμπλουτισμένο με μαγνητικά σωματίδια. Η υγρή εφαρμογή προτιμάται περισσότερο επειδή το υγρό βοηθάει στην πιο εύκολη κίνηση των σωματιδίων. Τα σωματίδια επίσης μπορούν να είναι χρωματισμένα ή και φωσφορίζοντα ώστε να διακριθούν πιο εύκολα από το προς μελέτη υλικό.
- **Βήμα 4: Παρατήρηση των ενδείξεων:** Μετά την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου οι ενδείξεις που σχηματίζονται πρέπει να ερμηνευτούν. Το βήμα αυτό απαιτεί την διάκριση μεταξύ σχετικών και μη σχετικών ενδείξεων από έμπειρο χειριστή.

1.6.3 Απομαγνητισμός

Τα υλικά μπορεί να διατηρήσουν ένα ίχνος του μαγνητικού πεδίου μετά την εφαρμογή. Μαγνητισμένα αντικείμενα μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα σε άλλες διεργασίες ως προς τη κατασκευή του ή και τη λειτουργία του. Μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία άλλων συσκευών στη περιφέρειά του μέχρι και να αλλάξει ο προσανατολισμός των τοπικών μαγνητικών πεδίων.

1.6.4 Σύνοψη

Η μελέτη μαγνητικών σωματιδίων παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Ανιχνεύονται επιφανειακές και κάποιες υπο-επιφανειακές ατέλειες.
- Δεν περιορίζεται από τη γεωμετρία του υλικού.
- Ο καθαρισμός πριν την εφαρμογή των σωματιδίων δεν είναι το ίδιο αναγκαίος όσο στα Διεισδυτικά υγρά αλλά και πάλι είναι χρήσιμος.
- Γρήγορη και απλή μέθοδος, χωρίς μεγάλο κόστος στα μέσα μαγνητισμού και τα μαγνητικά σωματίδια.
- Τα σημεία βλάβης εμφανίζονται χωρίς να χρειάζεται πολύ λεπτομερή ανάλυση.
- Φορητότητα.

Αλλά και τα ακόλουθα μειονεκτήματα

- Εφαρμόζεται μόνο σε φερρομαγνητικά υλικά.
- Μεγάλα τεμάχια χρειάζονται και πιο ισχυρά μαγνητικά πεδία.
- Μικρό βάθος διείσδυσης.
- Ο απομαγνητισμός και ο καθαρισμός είναι απαραίτητα για να μην υπάρξουν μελλοντικά προβλήματα.
- Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή μορφή των ρωγμών έτσι ώστε να εφαρμοστεί το μαγνητικό πεδίο σωστά.

Μέρος Β. Εισαγωγή στα ρομποτικά συστήματα.

Ένα **ρομπότ** είναι μια ηλεκτρονικά προγραμματισμένη μηχανή με σκοπό την αυτόματη εκτέλεση διεργασιών. Τα ρομπότ μπορούν να καθοδηγούνται από μια συσκευή ελέγχου συνδεδεμένη είτε ενσύρματα ή ασύρματα. Τα ρομπότ μπορεί να κατασκευάζονται για να προκαλούν ανθρώπινη μορφή, αλλά τα περισσότερα ρομπότ είναι μηχανές που εκτελούν εργασίες, σχεδιασμένες με έμφαση στην έντονη λειτουργικότητα και όχι στην εκφραστική αισθητική.



Εικόνα 2.1 Palletizer. Βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας της εταιρίας ISAC

Τα ρομπότ μπορούν να είναι αυτόνομα ή ημι-αυτόνομα και ποικίλλουν από ανθρωποειδή όπως το Honda's *Advanced Step in Innovative Mobility* (ASIMO) και το TOSY's *Ping Pong Playing Robot* (TOPIO) έως βιομηχανικά ρομπότ, ρομπότ ιατρικών χειρισμών, ρομπότ υποβοήθησης ασθενών, σκύλους ρομπότ θεραπείας, συλλογικά προγραμματισμένα ρομπότ *σμήνος*, drones UAV όπως το General Atomics MQ-1 Predator, ακόμη και μικροσκοπικά νανορομπότ. Μιμούμενος μια ρεαλιστική εμφάνιση ή αυτοματοποιώντας τις κινήσεις, ένα ρομπότ μπορεί να μεταφέρει μια αίσθηση ευφύιας ή τη δική του σκέψη. Τα αυτόνομα πράγματα αναμένεται να πολλαπλασιαστούν στο μέλλον, με την οικιακή ρομποτική και το αυτόνομο αυτοκίνητο ως μερικούς από τους κύριους οδηγούς.

Ο κλάδος της τεχνολογίας που ασχολείται με το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και την εφαρμογή ρομπότ, καθώς και με συστήματα υπολογιστών για τον έλεγχο τους, την αισθητηριακή ανατροφοδότηση και την επεξεργασία πληροφοριών είναι η ρομποτική. Αυτές οι τεχνολογίες ασχολούνται με αυτοματοποιημένες μηχανές που μπορούν να πάρουν τη θέση των ανθρώπων σε επικίνδυνα περιβάλλοντα ή διαδικασίες παραγωγής ή να μοιάζουν με ανθρώπους σε εμφάνιση, συμπεριφορά ή γνώση. Πολλά από τα σημερινά ρομπότ είναι εμπνευσμένα από τη φύση, συμβάλλοντας στον τομέα της ρομποτικής με βιολογική έμπνευση. Αυτά τα ρομπότ έχουν δημιουργήσει επίσης έναν νεότερο κλάδο της ρομποτικής: μαλακή ρομποτική.

Από την εποχή του αρχαίου πολιτισμού, υπήρξαν πολλοί λογαριασμοί αυτοματοποιημένων συσκευών με δυνατότητα διαμόρφωσης από τον χρήστη, ακόμη και αυτόματα που μοιάζουν με ανθρώπους και άλλα ζώα, όπως τα animatronics, που έχουν σχεδιαστεί κυρίως για ψυχαγωγία. Καθώς οι μηχανικές τεχνικές αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής εποχής, εμφανίστηκαν πιο πρακτικές εφαρμογές όπως αυτοματοποιημένες μηχανές, τηλεχειριστήριο και ασύρματο τηλεχειριστήριο.

Ο όρος προέρχεται από μια σλαβική ρίζα, *robot-*, με έννοιες που σχετίζονται με την εργασία. Η λέξη «ρομπότ» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για να δηλώσει ένα φανταστικό

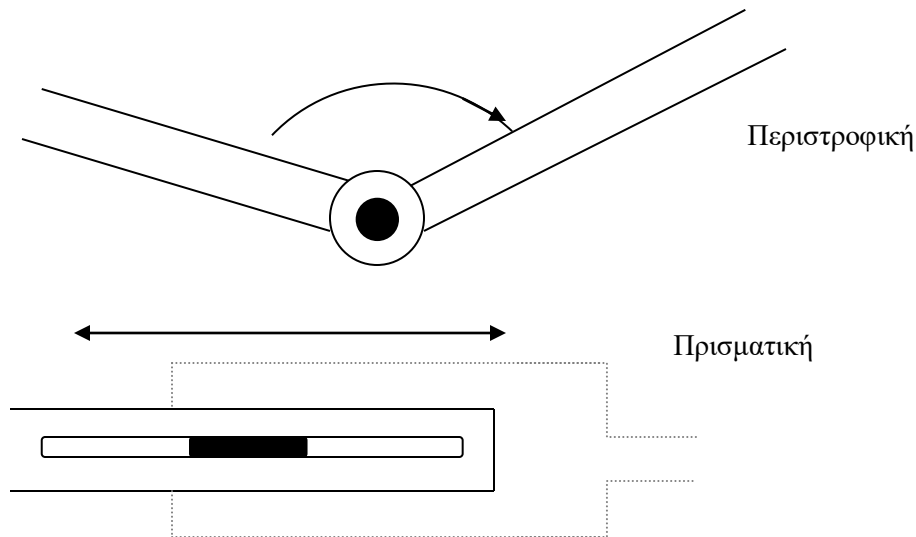
ανθρωποειδές σε ένα τσεχόφωνο θεατρικό έργο *RUR (Rossumovi Univerzální Roboti – Rossum's Universal Robots)* του 1920 από τον Karel Čapek , αν και ο αδερφός του Karel Josef Čapek ήταν αυτός που ήταν αληθινή στη λέξη. Η ηλεκτρονική εξελίχτηκε στην κινητήρια δύναμη της ανάπτυξης με την εμφάνιση των πρώτων ηλεκτρονικών αυτόνομων ρομπότ που δημιουργήθηκαν από τον William Gray Walter στο Μπρίστολ της Αγγλίας το 1948, καθώς και των εργαλειομηχανών Computer Numerical Control (CNC) στο στα τέλη της δεκαετίας του 1940 από John T. Parsons και Frank L. Stulen .

Το πρώτο σύγχρονο ψηφιακό και προγραμματιζόμενο ρομπότ εφευρέθηκε από τον George Devol το 1954 και δημιούργησε τη σημαντική εταιρεία ρομποτικής του, Unimation . Το πρώτο Unimate πουλήθηκε στη General Motors το 1961 όπου σήκωσε κομμάτια ζεστού μετάλλου από μηχανές χύτευσης στο εργοστάσιο Inland Fisher Guide στο τμήμα West Trenton του Ewing Township στο New Jersey .

Τα ρομπότ έχουν αντικαταστήσει τους ανθρώπους στην εκτέλεση επαναλαμβανόμενων και επικίνδυνων εργασιών που οι άνθρωποι προτιμούν να μην κάνουν ή δεν μπορούν να κάνουν λόγω περιορισμών μεγέθους ή που λαμβάνουν χώρα σε ακραία περιβάλλοντα όπως το διάστημα ή ο πυθμένας της θάλασσας. Υπάρχουν ανησυχίες για την αυξανόμενη χρήση των ρομπότ και τον ρόλο τους στην κοινωνία. Τα ρομπότ κατηγορούνται για την αυξανόμενη τεχνολογική ανεργία καθώς αντικαθιστούν τους εργαζόμενους σε αυξανόμενους αριθμούς λειτουργιών. Η χρήση ρομπότ σε στρατιωτικούς αγώνες εγείρει ηθικές ανησυχίες. Οι δυνατότητες αυτονομίας του ρομπότ και οι πιθανές επιπτώσεις έχουν εξεταστεί στη μυθοπλασία και μπορεί να αποτελέσουν ρεαλιστική ανησυχία στο μέλλον.

Κεφάλαιο 2.1 Αναπαράσταση και Λειτουργία των ρομποτικών συστημάτων

Τα ρομποτικά συστήματα χαρακτηρίζονται από συνδέσεις (links) και αρθρώσεις (joints) για να διαμορφώσουν μια αλυσίδα κίνησης. Οι αρθρώσεις είναι συνήθως περιστροφικές ή γραμμικές/πρισματικές. Μια περιστροφική άρθρωση επιτρέπει την περιστροφή μεταξύ δύο συνδέσμων ενώ μια πρισματική επιτρέπει τη γραμμική κίνηση μεταξύ δύο συνδέσμων. Κάθε άρθρωση αντιπροσωπεύει τον κρίκο σύνδεσης μεταξύ δύο συνδέσμων ή τον άξονα κατά μήκος του οποίου μια πρισματική άρθρωση μετακινείται. Οι μεταβλητές κίνησης μια άρθρωσης σημειώνονται ως θ για περιστροφικές αρθρώσεις και d για περιστροφικές αρθρώσεις και αντιπροσωπεύουν τη σχετική μετατόπιση ανάμεσα στους ρυθμιζόμενους συνδέσμους.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση ρομποτικών αρθρώσεων. Ο κάθε βαθμός ελευθερίας επιτρέπει κίνηση ανάμεσα στους συνδέσμους του χειριστή. Η περιστροφική άρθρωση (πάνω) επιτρέπει κίνηση περιστροφής μεταξύ των ρυθμιζόμενων συνδέσμων. Ενώ σε πρισματική άρθρωση (κάτω) η κίνηση είναι γραμμική μεταξύ των συνδέσμων.

Στη χρήση, ένας ρομποτικός χειριστής μπορεί να διαμορφωθεί. Διαμόρφωση είναι ο πλήρης καθορισμός της θέσης κάθε σημείου του χειριστή. Εάν ξέρουμε τις τιμές για τις μεταβλητές μιας άρθρωσης, κατόπιν είναι απλό να συμπεράνουμε τη θέση κάθε σημείου του χειριστή, εφόσον ο κάθε σύνδεσμος του χειριστή είναι άκαμπτος και η βάση του χειριστή είναι πακτωμένη. Ένα αντικείμενο λέγεται ότι έχει n βαθμούς ελευθερίας (degree of freedom DOF) εάν η διαμόρφωσή του μπορεί να καθοριστεί στο ελάχιστο από τις παραμέτρους του. Συνεπώς ο αριθμός DOF είναι ίσος με τη διάσταση του χώρου διαμόρφωσης. Για ένα ρομποτικό χειριστή, ο αριθμός των αρθρώσεων καθορίζει τον αριθμό DOF. Ένα άκαμπτο αντικείμενο σε ένα τρισδιάστατο χώρο έχει έξι DOF, τρεις για το προσδιορισμό θέσης και τρεις στον προσανατολισμό. Επομένως, ένας χειριστής πρέπει τυπικά να κατέχει τουλάχιστον έξι ανεξάρτητους DOF. Με λιγότερους από έξι DOF ο βραχίονας δεν μπορεί να φθάσει σε κάθε

σημείο του χώρου εργασίας με τυχαίο προσανατολισμό. Εξειδικευμένες εφαρμογές όπως η προσέγγιση θέσης γύρω ή πίσω από εμπόδια μπορούν να απαιτήσουν περισσότερους από έξι DOF. Χειριστές με παραπάνω από έξι DOF χαρακτηρίζονται ως κινηματικά περιττοί χειριστές.

Μια διαμόρφωση παρέχει μια στιγμιαία περιγραφή της γεωμετρίας του χειριστή αλλά δεν λέει κάτι για την δυναμική απόκρισή του. Η κατάσταση του χειριστή είναι ένα σύνολο μεταβλητών που μαζί με μια περιγραφή της δυναμικής του χειριστή και των μελλοντικών εισόδων, είναι επαρκές για να καθορίσει τη μελλοντική χρονική απόκριση του χειριστή. Ο χώρος κατάστασης είναι το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων. Στη περίπτωση χειριστή βραχίονα, η δυναμική του είναι νευτώνεια και μπορεί να καθοριστεί με τη γενίκευση της εξίσωσης $F = ma$. Συνεπώς η κατάσταση του χειριστή μπορεί να καθοριστεί δίνοντας τις τιμές για τις μεταβλητές q της άρθρωσης και για τις ταχύτητες της άρθρωσης.

Ο κάθε χειριστής έχει και ένα χώρο εργασίας. Ο χώρος εργασίας είναι ο συνολικός χώρος σάρωσης από το τελικό εργαλείο δράσης καθώς ο χειριστής εκτελεί όλες τις δυνατές κινήσεις. Ο χώρος εργασίας περιορίζεται από τη γεωμετρία του χειριστή τόσο όσο και οι μηχανικοί περιορισμοί στις αρθρώσεις. Για παράδειγμα μια περιστροφική άρθρωση μπορεί να οριοθετείται σε λιγότερο από μια πλήρης κίνηση 360° . Ο χώρος εργασίας συχνά διαχωρίζεται στον προσεγγίσιμο χώρο και στον ικανό χώρο. Ο προσεγγίσιμος χώρος είναι το εξ ολοκλήρου σύνολο των σημείων του χειριστή ενώ ο ικανός χώρος είναι το σύνολο των σημείων όπου ο χειριστής μπορεί να φτάσει με τυχαίο προσανατολισμό του τελικού εργαλείου δράσης. Επομένως αυτό σημαίνει ότι ο ικανός χώρος εργασίας είναι ένα υποσύνολο του προσεγγίσιμου χώρου εργασίας.

2.1.1 Ταξινόμηση των ρομποτικών συστημάτων

Οι ρομποτικοί χειριστές μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, όπως η πηγή ισχύος τους ή με τον τρόπο οι αρθρώσεις ενεργοποιούνται, τη γεωμετρία τους ή τη κινηματική δομή τους, τη μέθοδο ελέγχου και τον τομέα εφαρμογής τους. Ταξινομήσεις είναι αναγκαίες για να καθοριστεί ποια ρομποτικά συστήματα είναι κατάλληλα για μια δεδομένη εργασία. Συγκριμένα:

- Πηγή Ισχύος:

Τα περισσότερα ρομπότ είναι ηλεκτρικά, υδραυλικά ή πνευματικά τροφοδοτούμενα. Οι υδραυλικοί διακόπτες ενεργοποίησης είναι ασυναγώνιστοι στην ταχύτητα απόκρισης και στην ικανότητα παραγωγής ροπής. Επομένως τα υδραυλικά ρομπότ χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανύψωση βαρέων φορτίων. Υπάρχει όμως και ο κίνδυνος διαρροής υδραυλικών υγρών, πράγμα που απαιτεί πολύ περισσότερο περιφερειακό εξοπλισμό (αντλίες, που χρειάζονται περισσότερη συντήρηση) που μπορεί να είναι θορυβώδης. Τα ρομπότ που λειτουργούν με σερβο-κινητήρα DC ή AC είναι πιο δημοφιλής δεδομένου ότι είναι φτηνότερα, πιο καθαρά και διοχετεύουν λιγότερο θόρυβο. Τα πνευματικά ρομπότ είναι ανέξοδα και απλά, αλλά δεν μπορούν να ελέγχονται ακριβώς, πράγμα που προκαλεί να έχουν περιορισμένη εμβέλεια εφαρμογών και δημοτικότητα.

- Τομέας εφαρμογής:

Ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής, τα ρομπότ χωρίζονται σε ρομπότ συναρμολόγησης και μη-συναρμολόγησης. Τα ρομπότ συναρμολόγησης τείνουν να είναι μικρά σαν περιστροφικά ή σαν SCARA (τα είδη περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο). Τα μη-συναρμολόγησης χρησιμοποιούνται συνήθως στη συγκόλληση, ψεκασμό βαφής, χειρισμό υλικών και στη φόρτωση και εκφόρτωση μηχανών.

- Μέθοδος Ελέγχου:

Βάσει της μεθόδου ελέγχου τα ρομπότ χωρίζονται σε σέρβο και μη-σέρβο. Τα πρώτα ρομποτικά συστήματα ήταν μη σέρβο και ουσιαστικά ήταν συσκευές ανοιχτού βρόγχου των οποίων οι μετακινήσεις περιορίζονται σε προκαθορισμένες μηχανικές στάσεις και είναι χρήσιμα κυρίως για τη μεταφορά υλικών. Τα σέρβο ρομπότ χρησιμοποιούν έλεγχο υπολογιστή, κλειστού βρόγχου, για να καθορίσουν την κίνηση τους και είναι έτσι πραγματικά πολυλειτουργικές και επαναπρογραμματιζόμενες συσκευές. Επιπλέον, τα σέρβο-ρομπότ είναι περαιτέρω ταξινομημένα σύμφωνα με τη μέθοδο που ο ελεγκτής χρησιμοποιεί για να καθοδηγήσει το τελικό ρομπότ από σημείο σε σημείο. Ένα τέτοιο ρομπότ μπορεί να 'διδασθεί' ένα διακριτό σύνολο σημείων αλλά δεν υπάρχει έλεγχος της διαδρομής του τελικού στοιχείου δράσης, μεταξύ των σημείων. Τέτοια ρομπότ συνήθως μαθαίνουν μια σειρά σημείων με ένα ενσύρματο χειριστήριο. Έτσι τα σημεία καταχωρούνται και επαναχρησιμοποιούνται. Τα ρομπότ σημείου σε σημείο είναι περιορισμένα σε εμβέλεια εφαρμογών. Στα ρομπότ συνεχούς πορείας, από την άλλη, ολόκληρη η πορεία του τελικού σημείου μπορεί να ελεγχθεί. Ως παράδειγμα, το ρομπότ μπορεί να 'μάθει' μια διαδικασία πορείας μια ευθείας γραμμής μεταξύ δύο σημείων ή μέχρι και ένα περίγραμμα πορείας όπως σε μια ραφή συγκόλλησης. Επιπλέον η ταχύτητα ή/και η επιτάχυνση του τελικού σημείου δράσης μπορούν να ελέγχονται συχνά κατά τη πορεία της διαδικασίας. Τέτοια συστήματα είναι πιο προηγμένα και απαιτούν πιο πολύπλοκους ελεγκτές υπολογιστή και ανεπτυγμένα λογισμικά.

- Γεωμετρία

Οι περισσότεροι βιομηχανικοί χειριστές έχουν έξι ή λιγότερους DOF. Αυτοί οι χειριστές συνήθως ταξινομούνται κινηματικά βάσει των πρώτων τριών αρθρώσεων του βραχίονα, με τον καρπό να περιγράφεται χωριστά. Η πλειοψηφία των χειριστών εμπίπτει σε ένα από τους παρακάτω χειριστές*:

- Αρθρωτός (RRR)
- Σφαιρικός (RRP)
- SCARA (RRP)
- Κυλινδρικός (RPP)
- Καρτεσιανός (PPP)

Ο κάθε ένας από αυτούς τους χειριστές είναι ένα ρομποτικά σύστημα συνδέσμων σε σειρά. Μια έκτη ξεχωριστή κατηγορία χειριστών αποτελείται από το παράλληλο ρομπότ. Σε ένα παράλληλο ρομπότ οι σύνδεσμοι είναι διατεταγμένοι σε μια κλειστή κινηματική αλυσίδα. Μολονότι περιλαμβάνουμε μια συνοπτική συζήτηση των παράλληλων ρομπότ σε αυτό το κεφάλαιο, η κινηματική και η δυναμική τους είναι πιο δύσκολο να παραχθούν από εκείνες των ρομπότ συνδέσμων σε σειρά και ως εκ τούτου αντιμετωπίζονται συνήθως μόνο σε πιο προηγμένες περιπτώσεις.

*R – revolving (περιστροφικός), P – prismatic (πρισματικός)

2.1.2 Η ακρίβεια και επαναληψιμότητα

Η ακρίβεια ενός χειριστή είναι ένα μέτρο που καθορίζει πόσο κοντά μπορεί ο χειριστής να έρθει σε ένα δεδομένο σημείο στο χώρο εργασίας του. Από την άλλη, η επαναληψιμότητα είναι το μέτρο για το πόσο κοντά ο χειριστής μπορεί να επιστρέψει σε ένα προηγούμενο διδαχθέν σημείο. Η αρχική μέθοδος για τον εντοπισμό λάθους προσδιορισμού θέσης γίνεται με τους κωδικοποιητές θέσης που βρίσκονται στις αρθρώσεις, είτε στον άξονα του κινητήρα που ενεργοποιεί την άρθρωση ή στην ίδια την άρθρωση. Τυπικά δεν υπάρχει άμεση μέτρηση της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού στοιχείου δράσης. Κάποιος πρέπει να στηριχθεί στην υποτιθέμενη γεωμετρία του χειριστή και της ακαμψίας του, για να υπολογίσει τη θέση του τελικού στοιχείου δράσης από τις υπολογισμένες θέσεις της άρθρωσης. Η ακρίβεια επηρεάζεται επομένως από τα υπολογιστικά λάθη, τη μηχανική ακρίβεια κατά τη κατασκευή του χειριστή, τα αποτελέσματα της ευελιξίας όπως η κάμψη των συνδέσμων υπο βαρυτικά και άλλα φορτία, τα κενά μεταξύ των γραναζιών και ένα πλήθος άλλων στατικών και δυναμικών επιδράσεων. Είναι κυρίως για αυτόν το λόγο ότι τα ρομπότ σχεδιάζονται με εξαιρετικά υψηλή ακαμψία. Χωρίς ιδανικά αρκετή ακαμψία, η ακρίβεια μπορεί μόνο να βελτιωθεί από κάποιο είδος άμεσης αίσθησης της θέσης του τελικού στοιχείου δράσης, όπως με τη χρήση ηλεκτρονικής όρασης.

Μόλις ο χειριστής απομνημονεύσει ένα σημείο, τα παραπάνω αποτελέσματα λαμβάνονται υπόψη και οι κατάλληλες τιμές του κωδικοποιητή αποθηκεύονται από τον υπολογιστή ελέγχου. Η επαναληψιμότητα επηρεάζεται κυρίως από την ανάλυση του ελεγκτή. Η ανάλυση του ελεγκτή σημαίνει τη μικρότερη αύξηση της κίνησης που ο ελεγκτής μπορεί να αισθανθεί. Η ανάλυση υπολογίζεται ως η συνολική απόσταση που διανύεται, διαιρούμενη με 2^n , όπου “n” είναι ο αριθμός των bits (δυναμικών ψηφίων) που εκφράζει την ακρίβεια του κωδικοποιητή. Σε αυτό το πλαίσιο οι γραμμικοί άξονες, δηλαδή οι πρισματικές ενώσεις, τυπικά έχουν υψηλότερη ανάλυση από τις περιστροφικές αρθρώσεις, δεδομένου ότι η απόσταση ευθείας γραμμής που διασχίζεται από το άκρο ενός γραμμικού άξονα μεταξύ δύο σημείων είναι μικρότερη από το αντίστοιχο μήκος τόξου που ανιχνεύεται από το άκρο ενός περιστροφικού συνδέσμου.

Επιπλέον, δεδομένου ότι θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, οι περιστροφικοί άξονες οδηγούν συνήθως σε ένα μεγάλο ποσό κινηματικής και δυναμικής σύζευξης μεταξύ των συνδέσμων, με επακόλουθη συσσώρευση λαθών και ενός δυσκολότερου προβλήματος ελέγχου. Όμως δημιουργείται το πόρισμα, ποια είναι τα πλεονεκτήματα των περιστροφικών αρθρώσεων

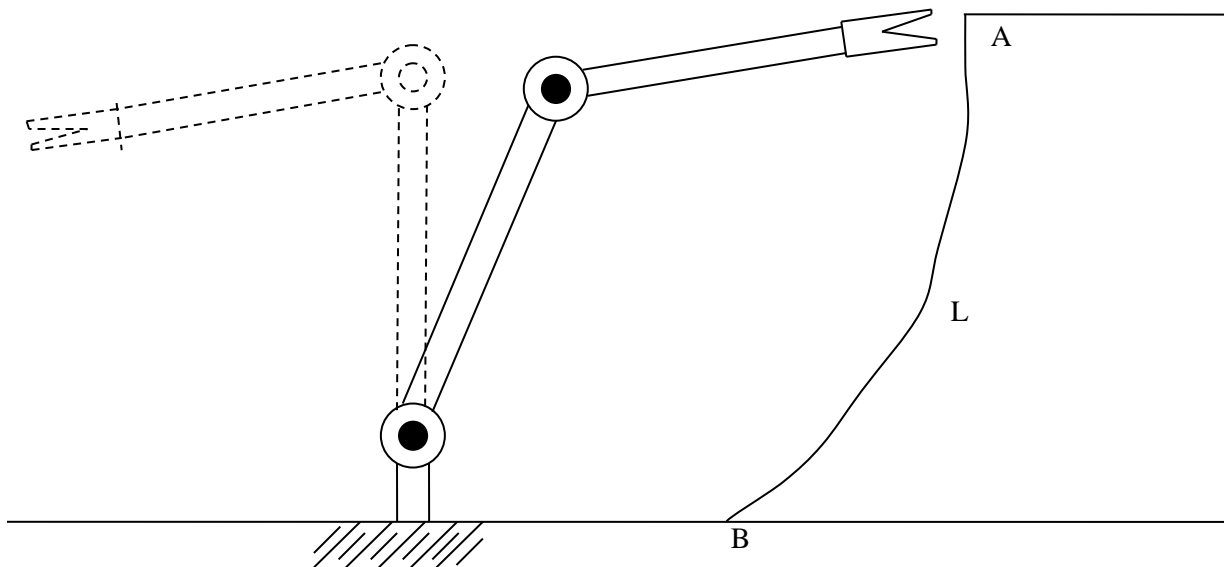
κατά το σχεδιασμό ενός χειριστή. Η απάντηση βρίσκεται στην αυξανόμενη ικανότητα προσέγγισης και κατάληψης μικρού χώρου κατά το σχεδιασμό των περιστροφικών αρθρώσεων.

Κατά συνέπεια οι χειριστές με περιστροφικές αρθρώσεις καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο εργασίας σε σχέση με τους χειριστές με γραμμικούς άξονες. Αυτό αυξάνει την ικανότητα του χειριστή να εργασθεί στον ίδιο χώρο με άλλα ρομπότ, μηχανές και ανθρώπους. Ταυτοχρόνως οι χειριστές με περιστροφικές αρθρώσεις είναι ικανότεροι να ελιχτούν γύρω από εμπόδια και έχουν ευρύτερο φάσμα πιθανών εφαρμογών.

2.1.3 Κινηματική των ρομποτικών συστημάτων

Μια τυπική εφαρμογή που εμπεριέχει ένα βιομηχανικό χειριστή παρουσιάζεται παρακάτω. Ο χειριστής δείχνεται με εργαλείο συγκόλλησης, για να ενώσει δύο μεταλλικές επιφάνειες. Όμως θέτεται το ερώτημα, πόσοι και τι είδους υπολογισμοί πρέπει να γίνουν για να προγραμματίσουμε ένα ρομπότ να πραγματοποιήσει τέτοιες εργασίες;

Υποθέτουμε ότι θέλουμε να κινήσουμε το χειριστή από την αρχική θέση σε μια θέση A, και μετά θα ακολουθήσει τη πορεία της επιφάνειας L μέχρι το σημείο B, με σταθερή ταχύτητα και σε μια απόσταση D από την επιφάνεια του συνδέσμου για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Καθώς συμβαίνει αυτό, το ρομπότ θα κόβει ή θα ενώνει σύμφωνα με κάποιες προκαθορισμένες προδιαγραφές. Για να γίνει όμως αυτή η διεργασία, θα πρέπει να επιλυθούν μερικά προβλήματα.

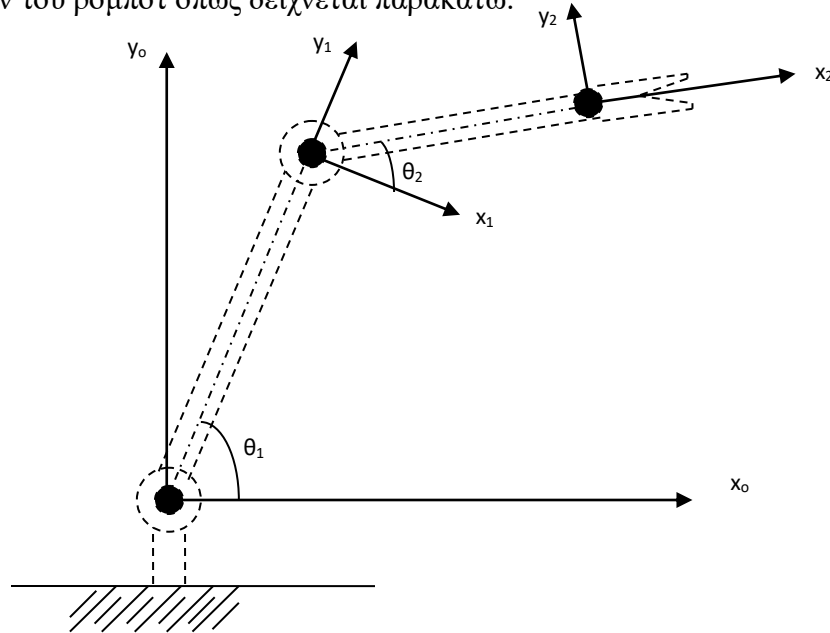


Σχήμα 2.2 Ρομποτικός βραχίονας δύο συνδέσμων

2.1.3.1 Ευθεία κινηματική

Το πρώτο πρόβλημα είναι πάντα η περιγραφή της θέσης του εργαλείου και των σημείων A και B (καθώς και η επιφάνεια L), σε σχέση με ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Τυπικά ένας χειριστής θα είναι ικανός να αντιληφθεί τη θέση του κατά μια έννοια, χρησιμοποιώντας εσωτερικούς αισθητήρες (αποκωδικοποιητές θέσης εγκατεστημένες στις αρθρώσεις 1 και 2), που θα μπορούν να μετρούν απευθείας τις γωνίες των αρθρώσεων θ_1 και θ_2 . Επίσης, απαιτείται να εκφράσουμε τα σημεία A και B σε σχέση με αυτές τις γωνίες.

Είναι σύνηθες να εγκαθιστούμε ένα ακίνητο σύστημα συντεταγμένων, ονομασμένο παγκόσμιο ή πλαίσιο βάσης και στο οποίο αναφέρονται όλα τα αντικείμενα εμπεριέχοντας και το χειριστή. Σε αυτή τη περίπτωση εγκαθιστούμε ένα πλαίσιο συντεταγμένων βάσης z_0, x_0, y_0 στη βάση δεδομένων του ρομπότ όπως δείχνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.3 Πλαίσια συντεταγμένων για ρομπότ δύο συνδέσμων

Οι συντεταγμένες (x, y) του εργαλείου εκφράζονται σε αυτό το πλαίσιο συντεταγμένων ως:

$$x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.1)$$

$$y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.2)$$

Όπου a_1 και a_2 είναι τα μήκη των δύο συνδέσμων αντίστοιχα. Επίσης ο προσανατολισμός του πλαισίου του εργαλείου σε σχέση με το πλαίσιο της βάσης, δίνεται από τα συνημίτονα κατεύθυνσης των αξόνων x και y σε σχέση με τους άξονες x_0 και y_0 ώστε:

$$x * x_0 = \cos(\theta_1 + \theta_2) \qquad x * y_0 = -\sin(\theta_1 + \theta_2) \qquad (2.3)$$

$$y * x_0 = \sin(\theta_1 + \theta_2) \qquad y * y_0 = \cos(\theta_1 + \theta_2) \qquad (2.4)$$

Τα οποία δημιουργούν τον πίνακα προσανατολισμού:

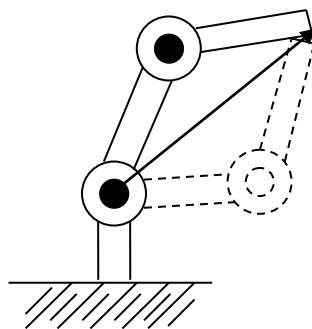
$$\begin{bmatrix} x * x_0 & x * y_0 \\ y * x_0 & y * y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \qquad (2.5)$$

Οι εξισώσεις παραπάνω καλούνται ευθείες κινηματικές εξισώσεις βραχίονα. Για ένα ρομπότ με έξι βαθμούς ελευθερίας αυτές οι εξισώσεις είναι αρκετά πολύπλοκες και δεν γράφονται με ευκολία, σε αντίθεση με ένα χειριστή δύο συνδέσμων.

2.1.3.2 Αντίστροφη Κινηματική

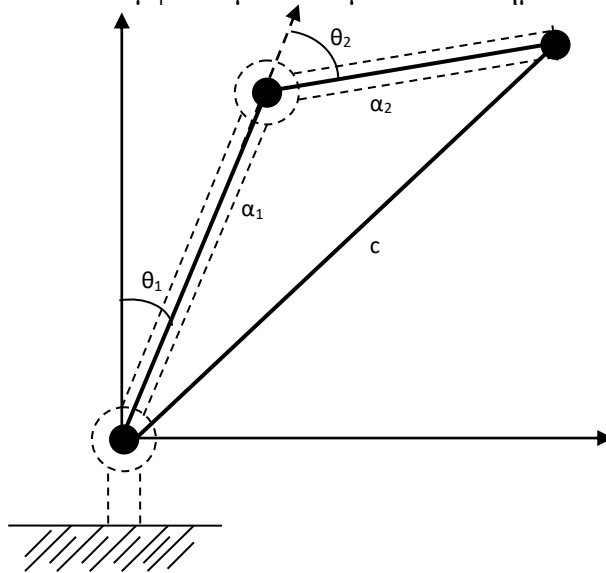
Για να δώσουμε εντολή κίνησης στο ρομπότ στο σημείο A, χρειαζόμαστε την αντίστροφη ανάλυση, δηλαδή τις γωνίες των αρθρώσεων θ_1 και θ_2 σε σχέση με τις συντεταγμένες x και y του σημείου A. Αυτό είναι το ζητούμενο της αντίστροφης κινηματικής. Δηλαδή με τα δεδομένα των συντεταγμένων x και y της ευθείας κινηματικής ζητούμε τη λύση για τις γωνίες των αρθρώσεων.

Οι εξισώσεις της ευθείας κινηματικής όμως είναι μη γραμμικές, πράγμα που κάνει τη λύση δύσκολο να βρεθεί, γενικότερα δεν υπάρχει μόνο μια λύση. Στην περίπτωση του επίπεδου μηχανισμού δύο συνδέσμων μπορεί να μην υπάρχει λύση αν οι συντεταγμένες είναι εκτός εμβέλειας του χειριστή. Αν οι συντεταγμένες είναι εντός εμβέλειας, μπορεί να υπάρχουν δύο λύσεις όπως παρουσιάζεται παρακάτω, οι διαμορφώσεις που καλούνται ανύψωση και βύθιση αγκώνα ή μπορεί να υπάρχει ακριβώς μια λύση αν ο χειριστής είναι σε πλήρη έκταση για να προσεγγίσει το σημείο. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που οι λύσεις μπορεί να είναι άπειρες.



Σχήμα 2.4 Υπαρξη πολλαπλών λύσεων αντίστροφης κινηματικής.

Βάσει του Σχήματος 2.4 και σύμφωνα με το νόμο των συνημίτονων βλέπουμε ότι η γωνία θ_2 δίδεται από:



Σχήμα 2.5 Επίλυση για γωνίες αρθρώσεων σε βραχίονα δύο συνδέσμων

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 a_2} = D \quad (2.6)$$

Οπότε η θ_2 προσδιορίζεται ως:

$$\theta_2 = \cos^{-1}(D) \quad (2.7)$$

Όμως καλύτερος τρόπος για την εύρεση της θ_2 είναι ότι παρατηρώντας πως δίδεται το $\cos(\theta_2)$ στην εξίσωση τότε το $\sin(\theta_2)$ θα είναι:

$$\sin(\theta_2) = \pm\sqrt{1 - D^2} \quad (2.8)$$

Οπότε η γωνία θ_2 βρίσκεται από:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\pm\sqrt{1-D^2}}{D} \quad (2.9)$$

Το πλεονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι ότι οι δύο λύσεις (ανύψωση και βύθιση) καλύπτονται επιλέγοντας τα θετικά και αρνητικά πρόσημα στην εξίσωση αντιστοίχως.

2.1.3.3 Κινηματική Ταχύτητας

Για να ακολουθήσουμε ένα περίγραμμα με σταθερή ταχύτητα ή με μια οποιαδήποτε προκαθορισμένη ταχύτητα πρέπει να γνωρίζουμε τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του εργαλείου και των ταχυτήτων των αρθρώσεων. Με διαφορίση των εξισώσεων λαμβάνουμε:

$$\dot{x} = -a_1 \sin \theta_1 * \dot{\theta}_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.10)$$

$$\dot{y} = a_1 \cos \theta_1 * \dot{\theta}_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.11)$$

Με τη χρήση του συμβολισμού διανύσματος:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \text{ και } \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \dot{\theta} = J \dot{\theta} \quad (2.13)$$

2.1.4 Δυναμική

Ένα ρομποτικός χειριστής είναι συνήθως μια συσκευή θέσης. Για τον έλεγχο της θέσης πρέπει να ξέρουμε τις δυναμικές ιδιότητες του χειριστή έτσι ώστε να ξέρουμε πόση δύναμη στο χειριστή για να προκαλέσουμε μια κίνηση. Με μικρή δύναμη ο χειριστής θα αργήσει να αντιδράσει, με μεγάλη δύναμη όμως ο βραχίονας θα συγκρουστεί με αντικείμενα ή/και εμπόδια μέχρι να φτάσει στην επιθυμητή θέση.

Η παραγωγή των δυναμικών εξισώσεων της κίνησης των ρομπότ δεν είναι μια απλή εργασία εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των βαθμών ελευθερίας και τη παρουσία μη γραμμικότητας στο σύστημα.

2.1.5 Έλεγχος Θέσης

Το πρόβλημα του ελέγχου θέσης συνίσταται από το πρόβλημα της ανίχνευσης και απόρριψης διαταραχών, το οποίο είναι ένα πρόβλημα του καθορισμού των απαραίτητων διαταραχών, το οποίο είναι πρόβλημα του καθορισμού των απαραίτητων εισόδων για τον έλεγχο, ή της ανίχνευσης μια επιθυμητής τροχιάς η οποία έχει σχεδιαστεί για το χειριστή, με ταυτόχρονη απόρριψη διαταραχών, εξαιτίας των μη μοντελοποιημένων δυναμικών αποτελεσμάτων όπως είναι η τριβή και ο θόρυβος. Αναπτύσσουμε λεπτομερώς συγκεκριμένες προσεγγίσεις για τον έλεγχο του ρομπότ οι οποίες βασίζονται σε τεχνικές ανάλυσης στο πεδίο συχνότητας. Εισάγουμε επίσης την έννοια του ελέγχου της προώθησης τροφοδοσίας και τις τεχνικές για τον υπολογισμό της ροπής και την αντίστροφη δυναμική έτσι ώστε να γίνει ο συνδυασμός των σύνθετων μη γραμμικών δυνάμεων αλληλεπίδρασης ανάμεσα στους συνδέσμους του χειριστή.

2.1.6 Έλεγχος Δύναμης

Από τη στιγμή που ο χειριστής έχει προσεγγίσει τη θέση A, πρέπει να ακολουθήσει τη διαδρομή L διατηρώντας μια σταθερή δύναμη ασκούμενη κάθετα στην επιφάνεια (όταν υπάρχει άσκηση δύναμης από το ρομποτικό χειριστή, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση ενός ρομπότ λείανσης επιφανειών). Επομένως γνωρίζοντας τη θέση του αντικειμένου και το σχήμα του περιγράμματος, η εργασία μπορεί να εκτελεστεί μόνο με τη χρήση του ελέγχου θέσης. Αυτό ωστόσο είναι πρακτικά δύσκολο να επιτευχθεί. Από τη στιγμή που ο ίδιος ο χειριστής έχει υψηλή ακαμψία, οποιαδήποτε σφάλματα για τον εντοπισμό της θέσης, εξαιτίας της αβεβαιότητας για τη συγκεκριμένη θέση της επιφάνειας ή του εργαλείου, θα δώσει εξαιρετικά μεγάλες δυνάμεις στο τελικό στοιχείο δράσης οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν το εργαλείο, την επιφάνεια μέχρι και το ίδιο το ρομπότ. Μια καλύτερη προσέγγιση είναι να μετρήσουμε τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης άμεσα και να χρησιμοποιήσουμε μια μέθοδο ελέγχου δύναμης (υβριδικός έλεγχος και έλεγχος αντίστασης).

2.1.7 Όραση

Οι κάμερες έχουν γίνει αξιόπιστοι αλλά ταυτόχρονα όχι τόσο ακριβείς αισθητήρες σε πολλές ρομποτικές εφαρμογές. Αντίθετα με τους αισθητήρες των αρθρώσεων, οι οποίοι δίνουν πληροφορίες για την εσωτερική διαμόρφωση των ρομπότ, οι κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για να μετρήσουν τη θέση του ρομπότ και να εντοπίσουν αντικείμενα εξωτερικά του ρομπότ αλλά και εκτός του χώρου εργασίας. Η ηλεκτρονική όραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης και προσανατολισμού των αντικειμένων.

- Έλεγχος βασισμένος στην όραση

Σε αρκετές περιπτώσεις, μπορεί να θέλουμε να ελέγξουμε τη κίνηση του χειριστή σε σχέση με κάποιο στόχο καθώς το τελικό στοιχείο δράσης κινείται ανάμεσα στον ελεύθερο χώρο. Εδώ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο έλεγχος δύναμης. Αντί αυτού μπορούμε να χρησιμοποιούμε την ηλεκτρονική όραση για να κλείσει ο έλεγχος βρόγχου γύρω από τον αισθητήρα όρασης.

Κεφάλαιο 2.2 Αρθρωτά ρομποτικά συστήματα

Όταν φαντάζεστε ένα αρθρωτό ρομπότ, αυτό που πιθανότατα σας έρχεται στο μυαλό είναι ένα βιομηχανικό ρομπότ όπως το FANUC M-710ic/50. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αρθρωτά ρομπότ είναι ο πιο κοινός τύπος ρομπότ που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Τα αρθρωτά ρομπότ ορίζονται ως ρομπότ που περιέχουν περιστροφικούς συνδέσμους. Αυτές οι αρθρώσεις αναφέρονται συνήθως ως άξονες στον ρομποτικό κόσμο. Τα αρθρωτά ρομπότ μπορεί να είναι τόσο απλά όσο μια δομή δύο αξόνων ή πολύπλοκα με δέκα ή περισσότερους άξονες και συνήθως τροφοδοτούνται από σερβοκινητήρες. Τα περισσότερα βιομηχανικά ρομπότ έχουν τέσσερις έως έξι άξονες, με έξι άξονες να είναι οι πιο συνηθισμένοι.



Εικόνα 2.2 Αρθρωτό ρομποτικό σύστημα RZH605E της εταιρίας HUAZHONGCNC σχεδιασμένο για σημειακές συγκολλήσεις και συγκολλήσεις τόξου.

2.2.1 Ανατομία αρθρωτών ρομπότ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε άρθρωση ενός αρθρωτού ρομπότ ονομάζεται άξονας. Κάθε ρομποτικός άξονας παρέχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας που αναφέρεται στις ανεξάρτητες κινήσεις του ρομπότ. Οι άξονες είναι συνήθως διατεταγμένοι σε μια αλυσίδα για να επιτρέπουν στον καθένα να υποστηρίξει έναν άλλο που βρίσκεται πιο μακριά κατά μήκος της δομής του ρομπότ. Η δομή ενός αρθρωτού ρομπότ ξεκινά με μια βάση που είναι κάθετη στο έδαφος και περιέχει την πρώτη άρθρωση. Το κύριο σώμα ρομπότ συνδέεται με τη βάση μέσω αυτής της πρώτης περιστροφικής άρθρωσης. Μια άλλη περιστροφική άρθρωση τρέχει κάθετα στο σώμα του ρομπότ και συνδέει τον ώμο με το σώμα. Στο τέλος του ώμου του ρομπότ υπάρχει μια παράλληλη περιστροφική άρθρωση που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του ώμου στον βραχίονα του ρομπότ. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται πρόσθετες αρθρώσεις ή άξονες στο άκρο του βραχίονα του ρομπότ για τη σύνδεση του καρπού του ρομπότ και τελικός τελεστής. Αυτή η ρομποτική δομή έχει σχεδιαστεί για να μιμείται στενά τον ανθρώπινο βραχίονα, όπως κάνει το FANUC M-10ia. Οι σερβοκινητήρες του ρομπότ χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτούν την κίνηση κάθε άξονα, επιτρέποντας ακρίβεια και ταχύτητα.

Τα αρθρωτά ρομπότ παρέχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας από οποιονδήποτε άλλο τύπο ρομπότ, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συνήθως μεταξύ των κατασκευαστών. Το ενισχυμένο εύρος κίνησής τους μιμείται σε μεγάλο βαθμό αυτό του ανθρώπου, καθιστώντας τα ιδανικές λύσεις για γραμμές παραγωγής. Παρέχουν επίσης μεγαλύτερη ευελιξία στις διαδικασίες παραγωγής. Η ικανότητά τους να καλύπτουν έναν αριθμό κινήσεων τα καθιστά πιο προσαρμοστικά σε αλλαγές στη διαδικασία παραγωγής ή στα τεμάχια εργασίας. Η βελτιωμένη κίνηση παρέχει μεγαλύτερο φάκελο εργασίας για το ρομπότ, επιτρέποντας το χειρισμό μιας ποικιλίας τεμαχίων εργασίας από μικρά έως μεγάλα. Παρέχουν επίσης ευελιξία μέσω των πολυάριθμων εφαρμογών που μπορούν να συμπληρώσουν. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν συγκόλληση τόξου, χειρισμό υλικών, συναρμολόγηση, μεταφορά εξαρτημάτων, επιλογή και τοποθέτηση, συσκευασία, φόρτωση μηχανών και παλετοποίηση μαζί με πολλά άλλα. Στην πραγματικότητα, πολλά αρθρωτά ρομπότ όπως το FANUC R-2000ib/125L έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν πολλαπλές εφαρμογές.

Τα αρθρωτά ρομπότ κατασκευάζονται από αρκετούς κατασκευαστές ρομποτικών με τα πιο συνηθισμένα να προέρχονται από τα τέσσερα μεγάλα, FANUC, Yaskawa Motoman, ABB και KUKA. Η πλειοψηφία των ρομπότ που σχεδιάστηκαν από αυτούς τους κατασκευαστές είναι αρθρωτά ρομπότ και τα κοινά μοντέλα περιλαμβάνουν το ABB IRB 2600 και το Motoman HP20. Η FANUC είναι περισσότερο γνωστή για τα δυνατά αρθρωτά ρομπότ έξι αξόνων της, καθώς δημοφιλή ρομπότ όπως αυτά της σειράς R-2000iA τους έχουν βοηθήσει να παραμείνουν στην κορυφή στον ρομποτικό κόσμο.

2.2.2 Χρήση αρθρωτών ρομπότ

Όπως προαναφέρθηκε, τα αρθρωτά ρομπότ χρησιμοποιούνται περισσότερο στη βιομηχανία και έχουν τις ακόλουθες χρήσεις:

- Χειρισμός Υλικών

Ο χειρισμός υλικών είναι μια κοινή βιομηχανική εφαρμογή για αρθρωτά ρομπότ. Μπορεί να περιλαμβάνει εργασίες όπως παλετοποίηση, επιλογή και τοποθέτηση και συλλογή κάδου. Τα αρθρωτά ρομπότ είναι εξαιρετικά για αυτές τις εφαρμογές επειδή μπορούν να κλιμακωθούν ώστε να χειρίζονται υψηλά ωφέλιμα φορτία και να έχουν πρόσβαση. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν γρήγορα να γίνουν πολύ δύσκολες για άλλους τύπους ρομπότ. Για παράδειγμα, ένα ρομπότ δέλτα μπορεί να εκτελέσει μια εργασία επιλογής και τοποθέτησης γρήγορα. Τι γίνεται όμως αν το εξάρτημα είναι ένα βαρύ χάλυβα; Ξαφνικά, αυτό το έργο είναι υπερβολικό για το δέλτα. Για να το θέσουμε αυτό σε προοπτική, τα μοντέλα αρθρωτών βραχιόνων υψηλής τεχνολογίας μπορούν να χειριστούν ωφέλιμα φορτία 1000+ kg. Ένα μεγάλο ρομπότ δέλτα θα μπορούσε να χειριστεί κάτι στην περιοχή 10-20 κιλών.

- Συγκόλληση

Η συγκόλληση ήταν μια από τις πρώτες εφαρμογές για βιομηχανικά ρομπότ. Ένας σημαντικός λόγος που διαπρέπουν εδώ οφείλεται στην επιδεξιότητά τους. Οι εφαρμογές συγκόλλησης συχνά απαιτούν ακριβείς κινήσεις σε συγκεκριμένες γωνίες. Αυτές οι γωνίες απλά δεν είναι εφικτές με άλλα ρομπότ όπως τα SCARA και τα Deltas. Η τοποθέτηση του λάθους ρομπότ σε μια εφαρμογή συγκόλλησης μπορεί να περιορίσει σοβαρά την ποιότητα του συγκολλημένου εξαρτήματος.

- Συνέλευση

Τα αρθρωτά ρομπότ είναι εξαιρετικά για εφαρμογές συναρμολόγησης για διάφορους λόγους. Οι αρθρώσεις τους επιτρέπουν να κινούνται με τρόπους που άλλα ρομπότ δεν μπορούν. Η χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου τους επιτρέπει επίσης να μετακινούν ωφέλιμα φορτία που δεν μπορούν να σηκώσουν άλλοι τύποι ρομπότ. Είναι αρκετά ακριβείς ακόμη και για μικρές εργασίες συναρμολόγησης. Για αυτόν τον λόγο, βρίσκετε τις περισσότερες αυτοματοποιημένες εργασίες συναρμολόγησης που εκτελούνται από αρθρωτά ρομπότ.

- Μηχανική Συντήρηση

Η μηχανική φροντίδα είναι μια άλλη κοινή εργασία για τα αρθρωτά ρομπότ. Η αυτοματοποιημένη φροντίδα μηχανών επιτρέπει τη φόρτωση και εκφόρτωση πρώτων υλών σε μηχανές. Και πάλι, η βελτιωμένη εμπέλεια και η επιδεξιότητα αυτού του ρομπότ του επιτρέπουν να διαπρέψει εδώ. Τα σύγχρονα ρομπότ φροντίδας μηχανών μπορούν να κάνουν τα πάντα, από τη φόρτωση του εξαρτήματος, το άνοιγμα και το κλείσιμο της πόρτας έως και την εκτέλεση του καθορισμένου προγράμματος επιλέγοντάς το στο HMI.

2.2.3 Επαγγελματική υπόθεση

Τα αρθρωτά ρομπότ μπορούν να έχουν σημαντικό θετικό αντίκτυπο στο τελικό αποτέλεσμα. Ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να σας οδηγήσουν να αρχίσετε να σκέφτεστε την αυτοματοποίηση. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Υψηλότερες απαιτήσεις διακίνησης
- Κίνδυνοι για την ασφάλεια των ανθρώπινων χειριστών
- Μειώσεις κόστους

Αυτοί είναι μερικοί συνήθεις λόγοι για τους κατασκευαστές να αυτοματοποιούν. Οι άνθρωποι έχουν περιορισμένη ταχύτητα κίνησης και μπορούν να διατηρήσουν αυτόν τον ρυθμό μόνο για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα πριν κουραστούν. Ο αυτοματοποιημένος εξοπλισμός συχνά υπερβαίνει την ταχύτητα που μπορούν να επιτύχουν οι άνθρωποι. Μπορούν να διατηρήσουν αυτή την ταχύτητα για όσο διάστημα το ρομπότ είναι λειτουργικό. Τα αρθρωτά

ρομπότ δεν είναι τα ταχύτερα ρομπότ στην αγορά, αλλά για πολλές εφαρμογές μπορούν ακόμα να ξεπεράσουν τους ανθρώπινους χειριστές.

Η ασφάλεια των ανθρώπινων χειριστών μπορεί να οδηγήσει τους κατασκευαστές να τους απομακρύνουν από αυτή την εργασία. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν οι χειριστές τραυματίζονται από την ανύψωση, το κόψιμο ή τη φροντίδα ενός μηχανήματος. Η αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας μπορεί να προστατεύσει τους υπαλλήλους σας και να εξοικονομήσει χρήματα από πρόστιμα που σχετίζονται με τραυματισμούς και κόστος διακοπής λειτουργίας. Είναι σημαντικό να θυμάστε, ωστόσο, ότι τα ρομπότ είναι εγγενώς επικίνδυνα. Η εγκατάσταση ενός αρθρωτού ρομπότ σε μια εφαρμογή χωρίς μετριάσμο κινδύνου μπορεί να είναι πιο επικίνδυνη για τους χειριστές. Τα αρθρωτά ρομπότ πρέπει να είναι εγκατεστημένα με κατάλληλες συσκευές ασφαλείας για τον περιορισμό του κινδύνου τραυματισμού των χειριστών.

Οι μειώσεις κόστους είναι μερικοί από τους πιο συνηθισμένους λόγους για την αυτοματοποίηση στο σημερινό ανταγωνιστικό περιβάλλον παραγωγής. Οι αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής είναι συχνά πιο αποτελεσματικές από τις χειροκίνητες σε κλίμακα. Αυτό τελικά οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος για την παραγωγή κάθε εξαρτήματος. Επιπλέον, τα εξαρτήματα μπορούν να παράγονται με μεγαλύτερη συνέπεια λόγω λιγότερων σφαλμάτων παραγωγής. Όπως θα μάθετε αργότερα σε αυτό το άρθρο, τα αρθρωτά ρομπότ είναι πολύ ακριβά. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό με αυτόν τον τύπο ρομπότ να διασφαλίσετε ότι οι μειώσεις του κόστους σας θα είναι καθαρό όφελος αφού λάβετε υπόψη το κόστος ενός αρθρωτού έργου ρομπότ.

Οι προκλήσεις της επιχείρησής σας θα πρέπει να υπαγορεύουν τι και πόσο να αυτοματοποιήσετε στις εγκαταστάσεις σας. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ποια έργα θα ωφεληθούν περισσότερο από την αρθρωτή αυτοματοποίηση ρομπότ. Το πιθανό εργαλείο εύρεσης μας είναι να σας βοηθήσει να προσδιορίσετε βασικά έργα που ταιριάζουν καλύτερα για αυτοματοποίηση στην εταιρεία σας.

2.2.4 Σύνοψη

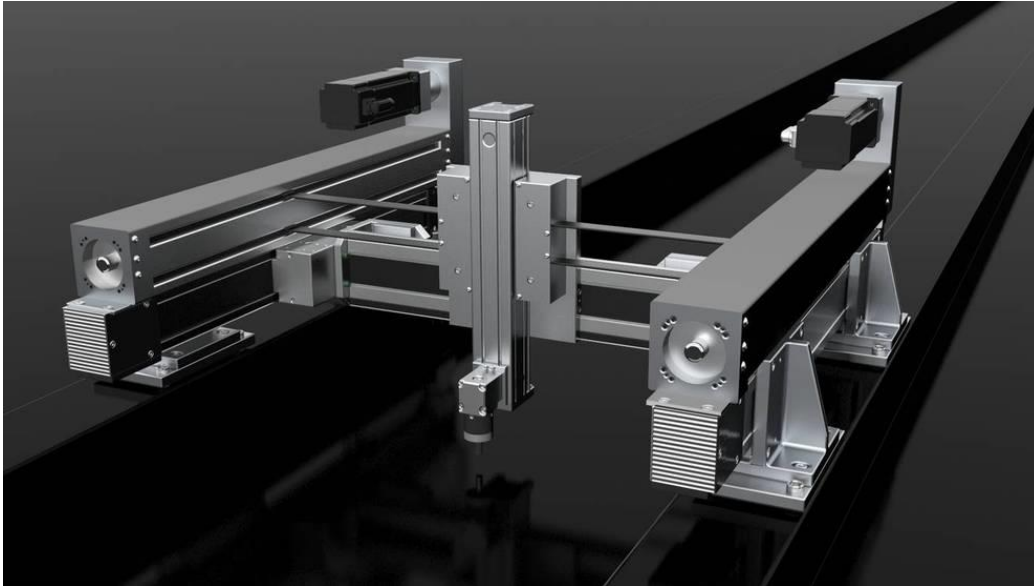
Όσο αφορά πλεονεκτήματα:

- Μεγάλος βαθμός ελευθερίας και ευκινησίας στη κίνηση επιτρέπει μεγάλο εύρος χρήσεων.
- Συνίσταται για εργασίες με μεγάλες απαιτήσεις διακίνησης
- Με την αυτοματοποίηση η ασφάλεια των ανθρώπινων χειριστών αυξάνεται.
- Επιτάχυνση βιομηχανικής παραγωγικότητας και ποιότητας.

Αλλά σε μειονεκτήματα:

- Απώλεια θέσεων εργασίας εξαιτίας της αυτοματοποίησης.
- Τα αρχικά κόστη επένδυσης σε ρομποτικά συστήματα καθιστούν το ερώτημα αν η ανάγκη αυτοματοποίησης είναι απόλυτα αναγκαία ή αν μπορεί να περιμένει.
- Ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό.
- Κάποιες διαδικασίες βιομηχανικής παραγωγής μπορεί να αποβούν πολύ περίπλοκες για ρομποτικά συστήματα.

Κεφάλαιο 2.3 Καρτεσιανά ρομποτικά συστήματα



Εικόνα 2.3 Παράδειγμα καρτεσιανού ρομπότ

Τα καρτεσιανά ρομπότ, ή ρομπότ γκάντρι όπως αναφέρονται μερικές φορές, είναι βιομηχανικά ρομπότ τριών αξόνων, και οι τρεις εκ των οποίων είναι γραμμικού και είναι σε γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους. Η μηχανική του διάταξη βοηθάει στην απλοποίηση του ελέγχου διαδικασίας και την επίλυση βραχίονα. Σε αρκετές εφαρμογές τείνουν να είναι μεγάλα και χρησιμοποιούνται σε μηχανές αριθμητικού ελέγχου ή μηχανές CNC

Στο πρόσφατο παρελθόν, τα προσυναρμολογημένα καρτεσιανά ρομπότ ήταν σπάνια, με τις περισσότερες μονάδες να κατασκευάζονται κατά παραγγελία από έναν OEM, έναν ολοκληρωμένο ρομπότ ή ακόμα και από τον τελικό χρήστη. Αλλά τώρα, πολλοί κατασκευαστές γραμμικών ενεργοποιητών παρέχουν επίσης προδιαμορφωμένα, προσυναρμολογημένα καρτεσιανά συστήματα, με μυριάδες επιλογές για να ταιριάζουν σε κοινές απαιτήσεις διαδρομής, ωφέλιμου φορτίου, ταχύτητας και ακρίβειας. Και οι κατασκευαστές παραδοσιακών ρομπότ 6 αξόνων και ρομπότ SCARA μπαίνουν επίσης στη δράση, αναγνωρίζοντας ότι για πολλές εφαρμογές βιομηχανικού αυτοματισμού και συναρμολόγησης, τα καρτεσιανά ρομπότ προσφέρουν καλύτερη αντιστάθμιση μεταξύ χωρητικότητας φορτίου και αποτυπώματος από τα σχέδια SCARA και 6 αξόνων.

Η συνήθης εφαρμογή τέτοιων ρομπότ είναι σε διεργασίες που περιλαμβάνουν κίνηση σε ένα σύστημα αξόνων x-y-z, όπως σε μύλους ή φρέζες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δομή του ρομπότ περιλαμβάνει τρεις γραμμικούς άξονες και συνήθως κατασκευάζονται σε αναλογία με το χώρο εργασίας τους, περιορίζοντας τον έτσι. Γενικά, τα χαρακτηριστικά ηλεκτρονικό υλικό, πρόγραμμα ελέγχου) ενός καρτεσιανού ρομπότ είναι όμοια με εκείνα των εργαλειομηχανών υπολογιστικού αριθμητικού ελέγχου (CNC).

Εξαιτίας της σταθερότητας και επαναληψιμότητάς τους, τα καρτεσιανά ρομπότ είναι καλά για χρήση σε εργαλειομηχανές. Σε μερικά μικρότερα και ελαφρότερα ρομπότ, η βάση δεν στερεώνεται, έτσι ώστε να επιτρέψει την φορητότητά της μέσα σε κάποια όρια. Σε αντίθεση με

άλλα ρομπότ, η κίνηση γίνεται σε ένα σύστημα αξόνων, με κάθε άξονα να κινείται με σταθερή ταχύτητα σε ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Ένα πλεονέκτημα είναι και η διακριτική τους ικανότητα, η οποία είναι σταθερή και ορισμένη σε κάθε άξονα. Παρόλα τα καλά, τα καρτεσιανά ρομπότ δεν είναι ιδανικά για βιομηχανικές εργασίες. Αυτό ευθύνεται στο γεγονός ότι δεν είναι ευέλικτα στις διαδικασίες και έχουν μόνο ένα συγκεκριμένο χώρο εργασίας, είτε από κάτω τους ή από πάνω. Επιπλέον είναι πιο αργά στη κίνηση σε σχέση με άλλα ρομπότ. Τα Καρτεσιανά συστήματα σχεδιάζονται για να παρέχουν αξιόπιστη, λειτουργική, μεγάλης ακρίβειας και οικονομική λύση σε συγκολλήσεις πολύ μεγάλων κομματιών όπως σε containers, κάδους απορριμμάτων και μεταλλικά κτίρια.

2.3.1 Σύνοψη

Σε πλεονεκτήματα:

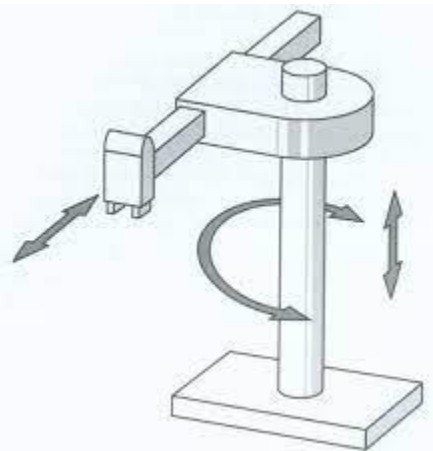
- Τα καρτεσιανά ρομπότ είναι σταθερά και ακριβή στην εφαρμογή θέσης τους
- Ιδανικά για διαδικασίες που εμπεριέχουν εργασία σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο αξόνων.
- Η κατανομή χώρου τους είναι μικρότερη σε σχέση με άλλα ρομποτικά συστήματα.
- Ευκολία στην επαναληψιμότητα διεργασιών.

Σε μειονεκτήματα:

- Παρόλη την ακρίβεια τους, τα καρτεσιανά ρομπότ είναι περιορισμένα σε ένα μόνο επίπεδο ευθειών αξόνων.
- Ανάλογα με το μέγεθος του ρομπότ, ο χώρος εργασίας είναι περιορισμένος λόγω της γεωμετρίας του.
- Πολύπλοκες γεωμετρίες απαιτούν και παραπάνω υπολογισμούς, κάτι που στα καρτεσιανά είναι δύσκολο εκτός εάν η διεργασία είναι προ-προγραμματισμένη.

Κεφάλαιο 2.4 Κυλινδρικά ρομποτικά συστήματα

Τα κυλινδρικά ρομπότ έχουν έναν περιστροφικό σύνδεσμο στη βάση και έναν πρισματικό σύνδεσμο για τη σύνδεση των συνδέσμων (Εικόνα 2.4). Τα ρομπότ έχουν ένα περίβλημα εργασίας κυλινδρικού σχήματος, το οποίο επιτυγχάνεται με περιστρεφόμενο άξονα και έναν επεκτεινόμενο βραχίονα που κινείται με κάθετη και ολισθαίνουσα κίνηση. Τα κυλινδρικά ρομπότ χρησιμοποιούνται συχνά σε στενούς χώρους εργασίας για απλή συναρμολόγηση, περιποίηση μηχανών ή εφαρμογές επίστρωσης λόγω του συμπαγούς σχεδιασμού τους.



Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση κυλινδρικού ρομποτικού συστήματος

Τα κυλινδρικά ρομπότ χρησιμοποιούν ένα σύστημα τρισδιάστατων συντεταγμένων με έναν προτιμώμενο άξονα αναφοράς και σχετική απόσταση από αυτόν για τον προσδιορισμό της θέσης του σημείου. Η απόσταση από μια επιλεγμένη θέση αναφοράς και η σχετική κατεύθυνση των αξόνων και η απόσταση από τον κατακόρυφο άξονα από ένα καθορισμένο επίπεδο αναφοράς χρησιμοποιούνται συχνά για τον καθορισμό της θέσης του σημείου.

Η προέλευση του συστήματος είναι το σημείο στο οποίο και οι τρεις συντεταγμένες μπορούν να γραφτούν ως «0» και αυτό είναι το σημείο όπου συναντώνται το επίπεδο αναφοράς και οι άξονες. Για να τον ξεχωρίσουμε από τον πολικό άξονα, που είναι η ακτίνα που βρίσκεται στο επίπεδο αναφοράς, ξεκινώντας από την αρχή και δείχνει την κατεύθυνση αναφοράς, ο άξονας αναφέρεται ως ο κυλινδρικός ή διαμήκης άξονας.

Η ακτινική απόσταση είναι η απόσταση από τον άξονα. Ταυτόχρονα, η γωνιακή συντεταγμένη αναφέρεται συχνά ως αζιμούθιο. Αυτό ανήκει σε δομή πολικής συντεταγμένης 2D στο επίπεδο γύρω από το σημείο, παράλληλα με το επίπεδο αναφοράς. η ακτίνα και το αζιμούθιο αναφέρονται μερικές φορές ως πολικές συντεταγμένες. Το ύψος ή το ύψος, η διαμήκης γωνία ή η αξονική θέση είναι και οι δύο ετικέτες για το 3rd συντεταγμένη.

Αυτό είναι επίσης γνωστό ως «πολική κυλινδρική συντεταγμένη» και «κυλινδρική πολική συντεταγμένη», χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη θέση των άστρων στους γαλαξίες. Αυτά τα ρομπότ είναι κατάλληλα για αντικείμενα που χρειάζονται περιστροφική συμμετρία κατά μήκος των διαμηκών αξόνων τους.

2.4.1 Δομή και λειτουργία

Η κίνηση αυτού του ρομπότ είναι βασικά πάνω και κάτω στο κύριο μέρος του σώματος και κυκλική στη βάση και το όνομα «κυλινδρικό ρομπότ» προέρχεται από το φυσικό σχήμα του κυλινδρικού φακέλου εργασίας. Σε αυτήν την κίνηση πάνω-κάτω δημιουργείται από έναν πνευματικό κύλινδρο, και η περιστροφή συνήθως δημιουργείται από ένα συγκρότημα κινητήρα και γραναζιών. Ο ρομποτικός βραχίονας θα ανεβαίνει πάνω από ένα κάθετο μέλος, χάρη στο

σχεδιασμό αυτού του είδους του αμαξώματος. Ο βραχίονας θα τεντωθεί και θα συρρικνωθεί καθώς θα περιστραφεί κατά μήκος του κάθετου άξονα. Ο χειριστής θα λειτουργεί τώρα σε κυλινδρικό χώρο χάρη σε αυτόν τον σχεδιασμό.

Το μήκος του άκρου καθορίζει την ακτίνα του κυλινδρικού χώρου και η μετατόπιση κατά μήκος του κάθετου μέλους καθορίζει το ύψος. Ένας περιστρεφόμενος σύνδεσμος στο σταθερό πλαίσιο, ένας κυλινδρικός σύνδεσμος τύπου γύρω από τον άξονα περιστροφής και ένας πρισματικός σύνδεσμος τύπου στο βραχίονα του χειριστή δημιουργεί το κυλινδρικό σώμα βάσης χειριστή και η κατεύθυνση του τελικού τελεστή καθορίζεται από την προέκταση, το ύψος του βραχίονα, και περιστροφή γύρω από τον κύριο άξονα του σώματος και αυτές είναι οι βασικές 3-μεταβλητές που πρέπει να διαχειριστούν προκειμένου να εντοπιστούν οι τελικοί τελεστές ενός κυλινδρικού ρομπότ. Με άλλα λόγια, αυτό το στυλ διαμόρφωσης δημιουργεί ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων που μπορεί να ρυθμιστεί με τον ίδιο τρόπο.

Η ένωση ενός καρπού στο τέλος του κυλίνδρου βραχίονα επιτρέπει περαιτέρω κινητικότητα. Και αυτός ο καρπός είναι αρκετά περίπλοκος για να συμφωνήσει σε πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας, και το Pitch (το οποίο μετρείται με κίνηση πάνω-κάτω στον καρπό), ρολό (το οποίο υπολογίζεται από την περιστρεφόμενη κίνηση στον καρπό), και το χασμουρητό είναι τα τρία στυλ. Η κίνηση από πλευρά σε πλευρά συνήθως μετρά το χασμουρητό στον καρπό. Αυτές οι κατηγορίες καρπού με 1 ή 2 ή 3 από αυτές τις κινήσεις υπάρχουν και είναι προσβάσιμες στις αγορές, ανάλογα με το κόστος και τη δυνατότητα εφαρμογής.

2.4.2 Χρήση

Τα κυλινδρικά ρομπότ χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρούς χώρους και είναι ιδανικά για αντικείμενα που απαιτούν κυκλική συμμετρία (π.χ. σύρματα, σωλήνες). Είναι επίσης κατάλληλα για τυπική εργασία επιλογής και τοποθέτησης στις ρυθμίσεις κατασκευής.

Τα κυλινδρικά ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλες ποικίλες εργασίες, όπως:

1. **Σημειακή συγκόλληση**
2. **Χειρισμός μηχανών χύτευσης**
3. **Εξοπλισμός χειρισμού μηχανών γενικά**
4. **Διαδικασίες λείανσης**
5. **Λειτουργίες συναρμολόγησης**
6. **Παλετοποίηση**
7. **Φόρτωση και εκφόρτωση μηχανών**
8. **Χύτευση επενδύσεων**
9. **Εφαρμογές στο χυτήριο και συγκόλληση**
10. **Χειρισμός και αποθήκευση μοναδικών ωφέλιμων φορτίων**

11. Συσκευασία κρέατος
12. Εφαρμογές για επιστρώσεις
13. Χύτευση με έγχυση
14. Συναρμολόγηση πακέτων και προϊόντων στη βιομηχανία και τη βιομηχανία συσκευασίας

Χρησιμοποιούνται συχνά σε προϊόντα ηλεκτρονικής, ειδικά για εφαρμογές καθαρών δωματίων και για όλες τις άλλες εφαρμογές που αναφέρονται παραπάνω.

2.4.3 Σύνοψη

Όσο αφορά πλεονεκτήματα:

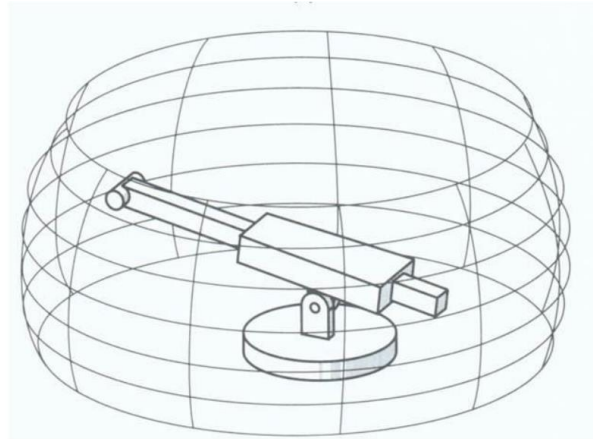
Τα κυλινδρικά βασικά ρομπότ μπορούν να ταξιδεύουν μεταξύ των απαιτούμενων σημείων γρηγορότερα από τα καρτεσιανά ρομπότ, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα, κυρίως όταν αυτά τα δύο σημεία βρίσκονται σε ίδια ακτίνα. Σε αυτήν την περίπτωση, δύο από τις τρεις κινήσεις είναι παράλληλες μεταξύ τους.

Σε μειονεκτήματα όμως:

- Επειδή τα ρομπότ με περιστροφικό άξονα πρέπει να αντισταθμίζουν την αδράνεια του αντικειμένου ενώ περιστρέφονται, η συνολική μηχανική τους ακαμψία μειώνεται. Η επαναληψιμότητα και η ακρίβειά τους περιορίζονται και προς την κατεύθυνση της περιστροφικής δράσης. Απαιτείται ένα πιο εξελιγμένο σχήμα ελέγχου για κυλινδρικές διαμορφώσεις παρά για καρτεσιανές διαμορφώσεις.
- Η συνολική μηχανική ακαμψία είναι μικρότερη επειδή ο περιστροφικός άξονας αυτού του ρομπότ πρέπει να υπερνικήσει την αδράνεια του αντικειμένου κατά την περιστροφή του.
- Η επαναληψιμότητα και η ακρίβεια είναι επίσης λιγότερο προς την κατεύθυνση περιστροφής.
- Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι η αλλαγή κατευθύνσεων από το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων συνήθως απαιτούσε σημαντικό χρονικό διάστημα και ένα πιο εξελιγμένο σύστημα ελέγχου.

Κεφάλαιο 2.5 Σφαιρικά ρομποτικά συστήματα.

Ένα σφαιρικό ρομπότ, επίσης γνωστό ως σφαιρικό κινητό ρομπότ ή ρομπότ σε σχήμα μπάλας είναι ένα κινητό ρομπότ με σφαιρικό εξωτερικό σχήμα. Ένα σφαιρικό ρομπότ αποτελείται συνήθως από ένα σφαιρικό κέλυφος που χρησιμεύει ως σώμα του ρομπότ και μια εσωτερική μονάδα οδήγησης (IDU) που επιτρέπει στο ρομπότ να κινείται. Τα σφαιρικά κινητά ρομπότ συνήθως κινούνται κυλιόμενοι πάνω από επιφάνειες. Η κίνηση κύλισης εκτελείται συνήθως αλλάζοντας το κέντρο μάζας του ρομπότ (δηλαδή το σύστημα που κινείται με εκκρεμές), αλλά υπάρχουν κάποιοι άλλοι μηχανισμοί οδήγησης. Με μια ευρύτερη έννοια, ωστόσο, ο όρος "σφαιρικό ρομπότ" μπορεί επίσης να αναφέρεται σε ένα στατικό ρομπότ με δύο περιστροφικές αρθρώσεις και μία πρισματική άρθρωση που σχηματίζει ένα σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων (π.χ. βραχίονας Stanford).



Εικόνα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση σφαιρικού ρομπότ.

Το σφαιρικό κέλυφος είναι συνήθως κατασκευασμένο από συμπαγές διαφανές υλικό, αλλά μπορεί επίσης να κατασκευαστεί από αδιαφανές ή εύκαμπτο υλικό για ειδικές εφαρμογές ή λόγω ειδικών μηχανισμών κίνησης. Το σφαιρικό κέλυφος μπορεί να σφραγίσει πλήρως το ρομπότ από το εξωτερικό περιβάλλον. Υπάρχουν επαναδιαμορφώσιμα σφαιρικά ρομπότ που μπορούν να μετατρέψουν το σφαιρικό κέλυφος σε άλλες δομές και να εκτελέσουν άλλες εργασίες εκτός από την κύλιση.

Τα σφαιρικά ρομπότ μπορούν να λειτουργήσουν ως αυτόνομα ρομπότ ή ως τηλεχειριζόμενα (τηλεχειριζόμενα) ρομπότ. Σχεδόν σε όλα τα σφαιρικά ρομπότ, η επικοινωνία μεταξύ της εσωτερικής μονάδας οδήγησης και της εξωτερικής μονάδας ελέγχου (καταγραφή δεδομένων ή σύστημα πλοήγησης) είναι ασύρματη λόγω της κινητικότητας και της κλειστής φύσης του σφαιρικού κελύφους. Η πηγή ενέργειας αυτών των ρομπότ είναι κυρίως μια μπαταρία που βρίσκεται μέσα στο ρομπότ, αλλά υπάρχουν μερικά σφαιρικά ρομπότ που χρησιμοποιούν ηλιακά κύτταρα. Τα σφαιρικά κινητά ρομπότ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε από την εφαρμογή τους είτε από τον μηχανισμό κίνησης τους.

Τα σφαιρικά κινητά ρομπότ έχουν εφαρμογές στην επιτήρηση, την περιβαλλοντική παρακολούθηση, την περιπολία, την υποβρύχια και πλανητική εξερεύνηση, την αποκατάσταση, την ανάπτυξη παιδιών και την ψυχαγωγία. Τα σφαιρικά ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αμφίβια ρομπότ βιώσιμα στην ξηρά καθώς και στο (ή κάτω από) νερό.

Οι πιο συνηθισμένοι μηχανισμοί κίνησης των σφαιρικών ρομπότ λειτουργούν αλλάζοντας το κέντρο μάζας του ρομπότ. Άλλοι μηχανισμοί οδήγησης χρησιμοποιούν:

- Διατήρηση της γωνιακής ταχύτητας από σφονδύλους,
- Άνεμο του περιβάλλοντος,
- Παραμόρφωση του σφαιρικού κελύφους και
- Γυροσκοπικό αποτέλεσμα.

2.5.1 Σύνοψη

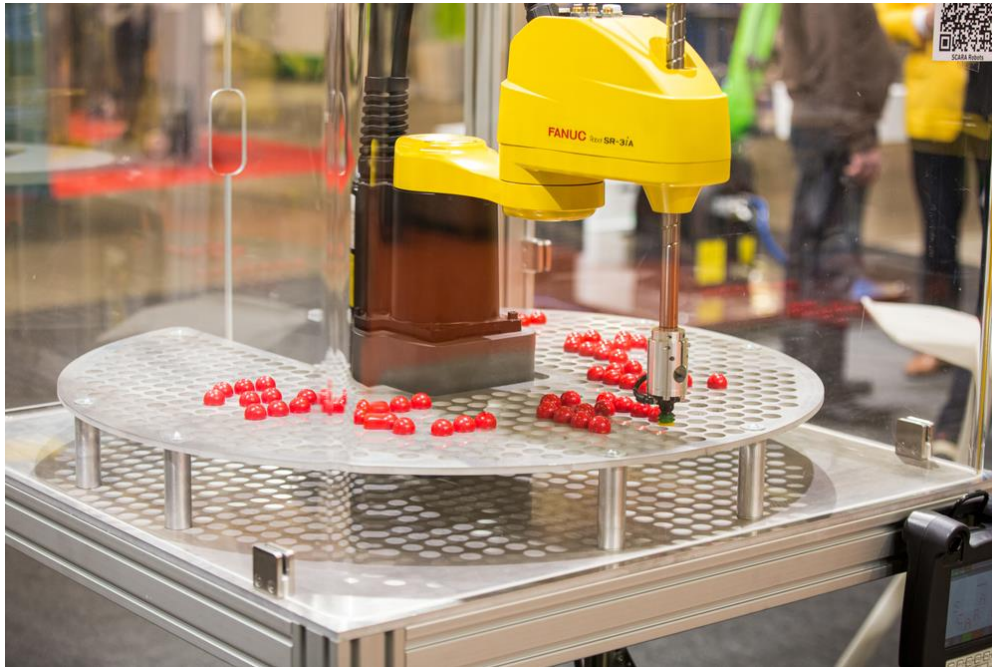
Όσο αφορά πλεονεκτήματα:

- Κίνηση χαμηλής τριβής και πτήση παν-κατευθυντικής κατεύθυνσης χωρίς πιθανότητα ανατροπής, γεγονός που τα καθιστά πιο βιώσιμα από συμβατικά κινητά ρομπότ.
- Οι αισθητήρες και τα όργανα που περικλείονται στη σφαίρα προστατεύονται καλά. Ακόμα και βαρύ, μέσα σε σφαίρα η πυκνότητά τους είναι χαμηλή και μπορούν να επιπλέουν. Σαν αποτέλεσμα, σφαιρικά ρομποτικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός δρόμου μέχρι και στο νερό. Επιπλέον το σφαιρικό κέλυφος προστατεύει και από εξωτερικούς βλαβερούς παράγοντες όπως σκόνη ή άμμος.

Σε μειονεκτήματα:

- Τα προφίλ ενός σφαιρικού ρομποτικού συστήματος είναι χαμηλότερο.
- Περιορισμένος χώρος εργασίας επειδή τέτοια ρομποτικά συστήματα δεν έχουν γραμμικό ενεργοποιητή για τον άξονα Z.

Κεφάλαιο 2.6 SCARA -- Selective Compliance Articulated Robot Arm (Αρθρωτός Ρομποτικός Βραχίονας Επίλεκτης Συμμόρφωσης)



Εικόνα 2.6 Ρομποτικό σύστημα SCARA σε λειτουργία.

Το SCARA είναι ένας τύπος βιομηχανικού ρομπότ. Το ακρωνύμιο σημαίνει βραχίονας ρομπότ επιλεκτικής συμμόρφωσης ή αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας επιλεκτικής συμμόρφωσης. Χάρη στη διάταξη της άρθρωσης παράλληλου άξονα του SCARA, ο βραχίονας είναι ελαφρώς συμβατός προς την κατεύθυνση XY αλλά άκαμπτος στην κατεύθυνση Z, εξού και ο όρος *επιλεκτική συμμόρφωση*. Αυτό είναι πλεονεκτικό για πολλούς τύπους εργασιών συναρμολόγησης, για παράδειγμα, την εισαγωγή ενός στρογγυλού πείρου σε μια στρογγυλή οπή χωρίς δέσιμο.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό του SCARA είναι η διάταξη των βραχιόνων με δύο συνδέσμους παρόμοια με τους ανθρώπινους βραχίονες, εξού και ο συχνά χρησιμοποιούμενος όρος, *αρθρωμένος*. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στον βραχίονα να εκτείνεται σε περιορισμένες περιοχές και στη συνέχεια να ανασύρεται ή να "διπλώνεται" από τη μέση. Αυτό είναι πλεονεκτικό για τη μεταφορά εξαρτημάτων από τη μια κυψέλη στην άλλη ή για τη φόρτωση ή την εκφόρτωση σταθμών διεργασίας που είναι κλειστοί.

Τα SCARA είναι γενικά ταχύτερα από συγκρίσιμα καρτεσιανά συστήματα ρομπότ. Η ενιαία βάση τους απαιτεί μικρό αποτύπωμα και παρέχει μια εύκολη, ανεμπόδιστη μορφή τοποθέτησης. Από την άλλη πλευρά, τα SCARA μπορεί να είναι πιο ακριβά από συγκρίσιμα καρτεσιανά συστήματα και το λογισμικό ελέγχου απαιτεί αντίστροφη κινηματική για γραμμικές παρεμβαλλόμενες κινήσεις. Ωστόσο, αυτό το λογισμικό συνήθως συνοδεύεται από το SCARA και είναι συνήθως διαφανές για τον τελικό χρήστη.

Οι Sankyo Seiki, Pentel και NEC παρουσίασαν το ρομπότ SCARA ως μια εντελώς νέα ιδέα για ρομπότ συναρμολόγησης το 1981. Το ρομπότ αναπτύχθηκε υπό την καθοδήγηση του Hiroshi Makino, καθηγητή στο Πανεπιστήμιο του Yamanashi. Ο βραχίονάς του ήταν άκαμπτος

στον άξονα Z και εύκαμπτος στους άξονες XY, γεγονός που του επέτρεπε να προσαρμοστεί στις τρύπες στους άξονες XY.

Τα ρομπότ SCARA είναι σχεδιασμένα να μιμούνται τις κινήσεις ενός ανθρώπινου βραχίονα σε διαδικασίες συναρμολόγησης ή φόρτωσης-εκφόρτωσης με ακρίβεια και ταχύτητα. Η νοοτροπία τους είναι να κάνουν ότι μπορεί να κάνει και ένας άνθρωπος, αλλά με μεγαλύτερη ταχύτητα και χωρίς το ίχνος της κόπωσης. Τέτοια ρομπότ χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος βιομηχανιών, όπου η χρήση τους θα ήταν παραγωγικά ωφέλιμη.

2.6.1 Σύνοψη

Όσο αφορά πλεονεκτήματα:

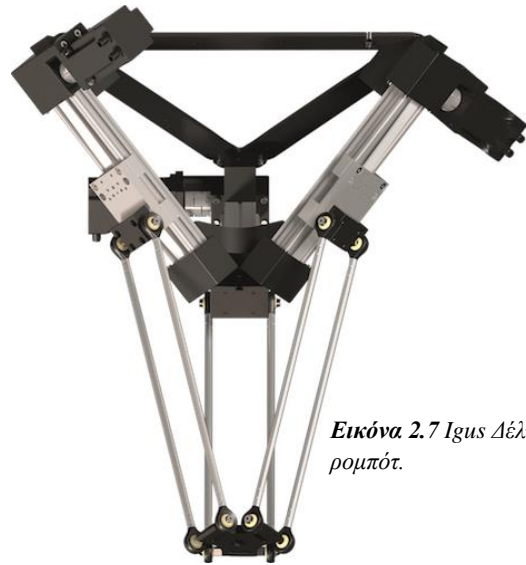
- Γενικά, ένα ρομπότ SCARA μπορεί να λειτουργήσει με υψηλότερη ταχύτητα και με προαιρετικές δυνατότητες όπως οι προδιαγραφές καθαρού δωματίου.
- Το ρομπότ SCARA χρησιμοποιείται συνήθως για εργασίες επιλογής και τοποθέτησης ή συναρμολόγησης όταν απαιτείται υψηλή ταχύτητα και υψηλή ακρίβεια.
- Τα ρομπότ SCARA που διατίθενται αυτήν τη στιγμή μπορούν να επιτύχουν ανοχές μικρότερες από 10 μικρά. Αυτές οι ανοχές μπορούν να συγκριθούν με 20 μικρά για ένα ρομπότ έξι αξόνων.
- Η συμπαγής διάταξη των SCARA Robots τα καθιστά επίσης πιο εύκολα την επανατοποθέτησή τους σε προσωρινές ή απομακρυσμένες εφαρμογές: από τη σχεδίασή του, το ρομπότ SCARA ταιριάζει σε εφαρμογές με μικρότερο πεδίο λειτουργίας και όπου ο χώρος δαπέδου είναι περιορισμένος.

Σε μειονεκτήματα όμως:

- Τα ρομπότ SCARA, λόγω της διαμόρφωσής τους, είναι συνήθως ικανά να μεταφέρουν μόνο ελαφρύτερο ωφέλιμο φορτίο. Συνήθως, μεταφέρουν έως και 2 κιλά ονομαστικά (10 κιλά το μέγιστο).
- Ο φάκελος ενός ρομπότ SCARA είναι συνήθως κυκλικός, το οποίο δεν ταιριάζει σε όλες τις εφαρμογές και το ρομπότ έχει περιορισμένη επιδεξιότητα και ευελιξία σε σύγκριση με την πλήρη ικανότητα 3D άλλων τύπων ρομπότ (π.χ. ρομπότ έξι αξόνων).

Κεφάλαιο 2.7 Ρ.Σ. Δέλτα

Τα ρομπότ Delta δημιουργήθηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1980, αλλά δεν άρχισαν να τραβούν την προσοχή στον κατασκευαστικό κόσμο πριν από περίπου δέκα χρόνια. Τώρα τα ρομπότ δέλτα μπορούν να βρεθούν συνήθως σε πολλές γραμμές συναρμολόγησης σε πολλές βιομηχανίες. Αυτά τα ρομπότ είναι επίσης γνωστά ως ρομπότ παράλληλων συνδέσμων λόγω του σχεδίου τους παραλληλόγραμμου βραχίονα. Τα ρομπότ Delta έχουν συνήθως τρεις έως τέσσερις ελαφρούς βραχίονες από ανθρακονήματα που εκτείνονται προς τα κάτω από το κύριο σώμα του ρομπότ. Εξαιτίας αυτού του σχεδιασμού αναφέρονται συχνά ως ρομπότ αράχνης με την ομοιότητα των χεριών τους σαν αράχνη.



Εικόνα 2.7 Igus Δέλτα ρομπότ.

Οι βραχίονες ρομπότ Delta ενώνονται στη μέση, με αποτέλεσμα να κάμπτονται προς τα μέσα και να συνδέονται με μια μικρή πλάκα εργαλείων. Αυτή η μικρή πλάκα εργαλείων είναι η θέση του τελικού τελεστή μπορεί να επισυναφθεί. Κάθε βραχίονας συνδέεται με έναν κινητήρα που βρίσκεται μέσα στο κύριο σώμα του ρομπότ. Οι κινητήρες συντονίζουν τις κινήσεις των βραχιόνων σε κινήσεις πάνω και κάτω, οι οποίες ωθούν τις αρθρώσεις τους προς τα μέσα και προς τα έξω. Αυτές οι κινήσεις της άρθρωσης αναγκάζουν την πλάκα εργαλείων να μετακινηθεί στους άξονες X, Y και Z, δημιουργώντας ένα κυλινδρικό περίβλημα εργασίας. Ένας από τους βραχίονες ρομπότ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του τελικού τελεστή εκτείνοντας από το κέντρο του σώματος του ρομπότ.

Τα ρομπότ Delta είναι γνωστά για την υψηλή ταχύτητα και τις υψηλές επιταχύνσεις τους. Ο σχεδιασμός τους είναι αυτός που τα κάνει ταχύτερα από άλλους τύπους βιομηχανικών ρομπότ. Τα περισσότερα βιομηχανικά ρομπότ έχουν κινητήρες που βρίσκονται στον βραχίονα του ρομπότ, καθιστώντας τα ευνοϊκά για εφαρμογές βαρύτερου ωφέλιμου φορτίου. Ωστόσο, η ύπαρξη των κινητήρων στον βραχίονα ρομπότ προσθέτει επιπλέον βάρος και απαγορεύει τις γρήγορες ταχύτητες. Με τα ρομπότ δέλτα, όλοι οι κινητήρες βρίσκονται στο κύριο σώμα πάνω από την περιοχή εργασίας. Αυτό διατηρεί όλο το κύριο βάρος του ρομπότ ακίνητο. Όλες οι κινήσεις προέρχονται από τους εξαιρετικά ελαφρούς βραχίονες ρομπότ, επιτρέποντας χαμηλή αδράνεια για απίστευτα γρήγορες ταχύτητες λειτουργίας και επιταχύνσεις.

Η FANUC είναι ένας από τους κορυφαίους κατασκευαστές ρομποτικών στον κόσμο και προσφέρει μια εκτενή σειρά ρομπότ delta. Τα ρομπότ δέλτα τους αποτελούνται από παραλλαγές με τρεις, τέσσερις, ακόμη και έξι άξονες. Το M-1ia είναι ειδικός σε μικρά ανταλλακτικά με χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου για 1 kg. Ενώ το M-2ia προσφέρει ευρύτερο φάκελο εργασίας από άλλα στην κατηγορία του.

2.7.1 Δομή και σχεδιασμός

Το ρομπότ δέλτα είναι ένα παράλληλο ρομπότ, δηλαδή αποτελείται από πολλαπλές κινηματικές αλυσίδες που συνδέουν τη βάση με τον τελικό τελεστή. Το ρομπότ μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μια χωρική γενίκευση μιας σύνδεσης τεσσάρων ράβδων .

Η βασική ιδέα του ρομπότ δέλτα είναι η χρήση παραλληλόγραμμων που περιορίζουν την κίνηση της ακραίας πλατφόρμας σε καθαρή μετατόπιση, δηλαδή μόνο κίνηση προς την κατεύθυνση X, Y ή Z χωρίς περιστροφή.

Η βάση του ρομπότ είναι τοποθετημένη πάνω από τον χώρο εργασίας και όλοι οι ενεργοποιητές βρίσκονται σε αυτόν. Από τη βάση εκτείνονται τρεις μεσαίοι βραχίονες. Τα άκρα αυτών των βραχιόνων συνδέονται με μια μικρή τριγωνική πλατφόρμα. Η ενεργοποίηση των συνδέσμων εισόδου θα μετακινήσει την τριγωνική πλατφόρμα κατά μήκος της κατεύθυνσης X, Y ή Z. Η ενεργοποίηση μπορεί να γίνει με γραμμικούς ή περιστροφικούς ενεργοποιητές, με ή χωρίς μειώσεις (άμεση μετάδοση κίνησης).

Δεδομένου ότι οι ενεργοποιητές βρίσκονται όλοι στη βάση, οι βραχίονες μπορούν να κατασκευαστούν από ένα ελαφρύ σύνθετο υλικό . Ως αποτέλεσμα αυτού, τα κινούμενα μέρη του ρομπότ δέλτα έχουν μια μικρή αδράνεια . Αυτό επιτρέπει πολύ υψηλή ταχύτητα και υψηλές επιταχύνσεις . Η σύνδεση όλων των βραχιόνων μαζί με τον τελικό τελεστή αυξάνει την ακαμψία του ρομπότ, αλλά μειώνει τον όγκο εργασίας του.

Η έκδοση που αναπτύχθηκε από τον Reymond Clavel έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας: τρεις μεταφράσεις και μία περιστροφή. Σε αυτή την περίπτωση, ένα τέταρτο σκέλος εκτείνεται από τη βάση έως το μέσο της τριγωνικής πλατφόρμας δίνοντας στον ακραίο τελεστή έναν τέταρτο, περιστροφικό βαθμό ελευθερίας γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

Επί του παρόντος έχουν αναπτυχθεί άλλες εκδόσεις του ρομπότ δέλτα:

- Δέλτα με 6 βαθμούς ελευθερίας: αναπτύχθηκε από την εταιρεία Fanuc , σε αυτό το ρομπότ τοποθετείται μια σειριακή κινηματική με 3 περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας στον τελικό τελεστή
- Delta με 4 βαθμούς ελευθερίας: που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Adept , αυτό το ρομπότ έχει 4 παραλληλόγραμμα απευθείας συνδεδεμένα με την τελική πλατφόρμα αντί να έχει ένα τέταρτο πόδι που έρχεται στη μέση του τελικού τελεστή
- Pocket Delta : αναπτύχθηκε από την ελβετική εταιρεία Asyril SA , μια έκδοση 3 αξόνων του ρομπότ delta προσαρμοσμένη για εύκαμπτα συστήματα τροφοδοσίας εξαρτημάτων και άλλες εφαρμογές υψηλής ταχύτητας, υψηλής ακρίβειας.
- Delta Direct drive: ένα ρομπότ δέλτα 3 βαθμών ελευθερίας που έχει τον κινητήρα απευθείας συνδεδεμένο στους βραχίονες. Οι επιταχύνσεις μπορεί να είναι πολύ υψηλές, από 30 έως 100 g .
- Κύβος Delta: αναπτύχθηκε από το πανεπιστημιακό εργαστήριο EPFL LSRO, ένα ρομπότ δέλτα κατασκευασμένο σε μονολιθικό σχέδιο, με αρθρώσεις κάμψης-μεντεσέδων. Αυτό το ρομπότ είναι προσαρμοσμένο για εφαρμογές εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας.
- Έχουν αναπτυχθεί αρκετές διατάξεις "γραμμικού τριγώνου" όπου οι κινητήρες κινούν γραμμικούς ενεργοποιητές αντί να περιστρέφουν έναν βραχίονα. Τέτοιες γραμμικές διατάξεις δέλτα μπορούν να έχουν πολύ μεγαλύτερους όγκους εργασίας από τις διατάξεις περιστροφικών δέλτα.

Η πλειοψηφία των ρομπότ δέλτα χρησιμοποιεί περιστροφικούς ενεργοποιητές. Πρόσφατα χρησιμοποιήθηκαν κάθετοι γραμμικοί ενεργοποιητές (χρησιμοποιώντας γραμμικό σχέδιο δέλτα) για την παραγωγή ενός νέου σχεδίου τρισδιάστατου εκτυπωτή. Αυτοί προσφέρουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές που βασίζονται σε βίδες γρηγορότερης πρόσβασης σε μεγαλύτερο όγκο κατασκευής για συγκρίσιμη επένδυση σε υλικό.

2.7.2 Εφαρμογές για Ρομπότ Δέλτα

Τα ρομπότ Delta είναι ιδανικά για συναρμολόγηση, διανομή, επιλογή και τοποθέτηση, χειρισμό υλικών, μεταφορά εξαρτημάτων και ρομποτικές εφαρμογές συσκευασίας. Τα μέρη που χειρίζονται τα ρομπότ δέλτα θα πρέπει να είναι ελαφριά και να αποτελούνται από απλές γεωμετρίες, καθώς αυτά τα ρομπότ λειτουργούν με γρήγορες ταχύτητες. Τα βαρύτερα ή πολύπλοκα μέρη δεν ευνοούν τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις των ρομπότ-δέλτα.

Πολλά από αυτά τα ρομπότ έχουν αναπτυχθεί στις βιομηχανίες τροφίμων, ηλεκτρονικών, ιατρικών και φαρμακευτικών βιομηχανιών για ελαφριές διαδικασίες συναρμολόγησης. Αυτά τα ρομπότ έχει αποδειχθεί ότι αυξάνουν δραστικά την παραγωγικότητα και να μειώσει τους χρόνους του κύκλου. Ορισμένα ρομπότ δέλτα είναι ικανά να μαζεύουν έως και 300 μέρη ανά λεπτό για δραματικά υψηλούς ρυθμούς διεκπεραίωσης. Τα ρομπότ Delta μπορούν επίσης να ενσωματωθούν με πρόσθετη ρομποτική τεχνολογία, όπως αισθητήρες δύναμης και όραση. Αυτά τα συστήματα ενισχύουν και τελειοποιούν την ακρίβεια και την ακρίβεια των ρομπότ αράχνης, επιτρέποντας την αυτοματοποίηση πιο περίπλοκων εφαρμογών.

Μέρος Γ. Η Υποστήριξη των Ρομποτικών συστημάτων στη Μελέτη Μη Καταστροφικών Ελέγχων

Η ρομποτική και οι ΜΚΕ είναι δύο υψηλά ανεπτυγμένα πεδία μηχανολογικού τομέα. Η απαίτηση αύξησης των ταχυτήτων επιθεώρησης για μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) σύνθετων εξαρτημάτων αεροδιαστημικής είναι κοινή σε πολλούς κατασκευαστές. Η επικράτηση πολύπλοκων καμπυλωτών επιφανειών στη βιομηχανία παρέχει σημαντικό κίνητρο για τη χρήση ρομπότ 6 αξόνων για την ανάπτυξη ανιχνευτών NDT σε αυτές τις επιθεωρήσεις.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων δοκιμών που χρησιμοποιούνται συνήθως στο πεδίο των μη καταστροφικών δοκιμών (NDT), συμπεριλαμβανομένων, ενδεικτικά, των δοκιμών υπερήχων, των δοκιμών δινορευμάτων, των δοκιμών διείσδυσης βαφής και της δοκιμής μαγνητικών σωματιδίων. Υπάρχουν πολλές απαιτήσεις υλικοτεχνικής υποστήριξης και σταδιοποίησης για μη καταστροφικά έργα δοκιμών που σχετίζονται με τη φυσική πρόσβαση στη δομή και με θέματα ασφάλειας κατά την επιθεώρηση. Οι ανησυχίες για την ασφάλεια του έργου NDT περιλαμβάνουν εργασία σε ύψη και προστασία από πτώση, ανέγερση κριωμάτων, είσοδο σε περιορισμένο χώρο και εργασία μέσα και γύρω από επικίνδυνα χημικά. Σε πολλές περιπτώσεις, η σταδιοποίηση για NDT υπερβαίνει το κόστος για την πραγματοποίηση της πραγματικής επιθεώρησης. Ο εξοπλισμός σταδιοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των κριωμάτων, τείνει να γίνεται αρκετά ακριβός, ειδικά για έργα μεγαλύτερης διάρκειας. Λόγω της οικονομικής επιβάρυνσης της σταδιοποίησης επιθεώρησης NDT, Παρακάτω θα αναπτυχθεί το πόρισμα, πως τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να βοηθήσουν στη μελέτη.

Κεφάλαιο 3.1 Η τεχνολογία των μη επανδρωμένων σκαφών

Μη επανδρωμένο όχημα (UV ή UAV), κοινώς γνωστό ως drone, είναι ένα σκάφος ή όχημα χωρίς άνθρωπο πιλότο, πλήρωμα ή επιβάτες. Τα UAV αναπτύχθηκαν αρχικά κατά τον εικοστό αιώνα για στρατιωτικές αποστολές πολύ «βαρετές, βρώμικες ή επικίνδυνες» για τους ανθρώπους, και από τον εικοστό πρώτο, είχαν γίνει ουσιαστικά περιουσιακά στοιχεία για τους περισσότερους στρατούς. Καθώς οι τεχνολογίες ελέγχου βελτιώθηκαν και το κόστος μειώθηκε, η χρήση τους επεκτάθηκε σε πολλές μη στρατιωτικές εφαρμογές. Αυτές περιλαμβάνουν αεροφωτογράφιση, γεωργία ακριβείας, παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών, παρακολούθηση ποταμών, περιβαλλοντική παρακολούθηση, αστυνόμευση και επιτήρηση, επιθεωρήσεις υποδομής, λαθρεμπόριο, παραδόσεις προϊόντων, ψυχαγωγία και αγώνες drone.



Εικόνα 3.1 Παράδειγμα μη επανδρωμένου σκάφους

3.1.1 Η ανάπτυξη των UAV

Ο όρος drone χρησιμοποιήθηκε από τις πρώτες μέρες της αεροπορίας, και εφαρμόστηκε σε αεροσκάφη στόχων εξ αποστάσεως που χρησιμοποιούνται για εξάσκηση πυροβόλων όπλων θωρηκτού, όπως το Fairey Queen της δεκαετίας του 1920 και το 1930 de Havilland Queen Bee. Αργότερα παραδείγματα περιελάμβαναν το Airspeed Queen Wasp και το Miles Queen Martinet, πριν από την τελική αντικατάσταση από το GAF Jindivik. Ο όρος παραμένει σε κοινή χρήση. Εκτός από το λογισμικό, τα αυτόνομα drones χρησιμοποιούν επίσης μια σειρά από προηγμένες τεχνολογίες που τους επιτρέπουν να εκτελούν τις αποστολές τους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, όπως υπολογιστικό νέφος, όραση υπολογιστή, τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση, βαθιά μάθηση και θερμικούς αισθητήρες. Για ψυχαγωγικές χρήσεις, ένα drone αεροφωτογράφισης (σε αντίθεση με ένα UAV) είναι ένα αεροσκάφος που διαθέτει βίντεο πρώτου προσώπου, αυτόνομες δυνατότητες ή και τα δύο.

Ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) ορίζεται ως ένα «ηλεκτροκίνητο, εναέριο όχημα που δεν μεταφέρει άνθρωπο χειριστή, χρησιμοποιεί αεροδυναμικές δυνάμεις για την ανύψωση οχήματος, μπορεί να πετάει αυτόνομα ή να πιλοτάρεται εξ αποστάσεως, μπορεί να είναι αναλώσιμο ή ανακτήσιμο και μπορεί να μεταφέρει θανατηφόρο ή μη θανατηφόρο ωφέλιμο φορτίο». UAV είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις στρατιωτικής χρήσης. Ωστόσο, οι πύραυλοι με κεφαλές δεν θεωρούνται UAV επειδή το ίδιο το όχημα είναι

πυρομαχικά. Επίσης, η σχέση των UAV με τα τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα αεροσκαφών είναι ασαφής. Τα UAV μπορεί να περιλαμβάνουν ή όχι τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα αεροσκαφών. Ορισμένες δικαιοδοσίες βασίζουν τον ορισμό τους στο μέγεθος ή το βάρος. Ωστόσο, η FAA των ΗΠΑ ορίζει οποιοδήποτε μη πληρωμένο ιπτάμενο σκάφος ως UAV ανεξάρτητα από το μέγεθος. Τα UAV μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως στοιχείο ενός συστήματος μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAS), το οποίο περιλαμβάνει την προσθήκη ενός ελεγκτή εδάφους και ενός συστήματος επικοινωνίας με το UAV.

Ο όρος *σύστημα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAS)* υιοθετήθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ και την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Αεροπορίας των ΗΠΑ το 2005 σύμφωνα με τον οδικό χάρτη για το σύστημα μη επανδρωμένων αεροσκαφών 2005-2030. Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας και η Βρετανική Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας υιοθέτησαν αυτόν τον όρο, ο οποίος χρησιμοποιείται επίσης στον οδικό χάρτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Έρευνα Ενιαίου Ευρωπαϊκού Ουρανού για το 2020. Αυτός ο όρος τονίζει τη σημασία στοιχείων εκτός από το αεροσκάφος. Περιλαμβάνει στοιχεία όπως σταθμούς ελέγχου εδάφους, ζεύξεις δεδομένων και άλλο εξοπλισμό υποστήριξης. Παρόμοιος όρος είναι ένα *σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAVS)*, *τηλεκατευθυνόμενο εναέριο όχημα (RPAV)*, *σύστημα τηλεκατευθυνόμενου αεροσκάφους (RPAS)*. Πολλοί παρόμοιοι όροι χρησιμοποιούνται. Το «μη κατοίκιο» και το «ακατοίκητο» χρησιμοποιούνται περιστασιακά ως εναλλακτικές του «μη επανδρωμένους». Σύμφωνα με νέους κανονισμούς που τέθηκαν σε ισχύ την 1η Ιουνίου 2019, ο όρος RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) έχει υιοθετηθεί από την канаδική κυβέρνηση ως «ένα σύνολο διαμορφώσιμων στοιχείων που αποτελείται από ένα τηλεχειριζόμενο αεροσκάφος, τον σταθμό ελέγχου του, τις ζεύξεις διοίκησης και ελέγχου και κάθε άλλο στοιχείο συστήματος που απαιτείται κατά τη λειτουργία της πτήσης».

3.1.2 Ταξινόμηση των UAV

Τα μη επανδρωμένα οχήματα μπορούν να ταξινομηθούν βάσει πολλών μεταβλητών. Μερικές αναπτύσσονται παρακάτω.

➤ Περιβάλλον χρήσης και σύστημα κίνησης

Μέχρι και σήμερα έχουν κατασκευαστεί μη επανδρωμένα που χρησιμοποιούνται σε αναέριες μελέτες, το λεγόμενα UAV με έλικες ή αεροσκάφη με φτερά. Τα περισσότερα drones εδάφους κινούνται συνήθως με αρματοσιά όπως στα τεθωρακισμένα στρατιωτικά οχήματα αλλά υπάρχουν και συστήματα που εκμεταλεύονται και τυπικούς τροχούς παντός εδάφους με αναρτήσεις για υψηλότερες ταχύτητες. Τα υποβρυχία drone κινούνται με την ίδια τεχνολογία των υποβρυχίων. Δηλαδή κατέχουν έλεγχο άνωσης και κατάβασης και προώθησης με προπέλλες.

➤ Μέγεθος και βάρος

Ανάλογα με την επιθυμητή διαδικασία, κάθε drone έχει και ένα συγκεκριμένο μέγεθος και μάζα ανάλογα με την ακατασκευή του και τον εξοπλισμό που πρέπει να κουβαλάει. Στα μικρά UAV καταχωρούνται τα συστήματα συνολικού βάρους από 250 γραμμάρια (νανορομπότ) μέχρι και 24 κιλά. Από 25 κιλά έως και τα 150 κιλά είναι τα drones μεσαίου μεγέθους ενώ πάνω των 150 κιλών είναι τα μεγάλα UAV.

➤ **Εμβέλεια λειτουργίας και αντοχή αυτονομίας**

Κάθε UAV έχει και μια συγκεκριμένη εμβέλεια στην οποία μπορεί να λειτουργεί χωρίς να υπάρχει καθυστέρηση ή διακοπή στην ασύρματη σύνδεσή του (lag) με το κέντρο αφετηρίας. Drone με χαμηλή εμβέλεια, μέχρι και 5 χιλιόμετρα είναι συνήθως πολιτικού τύπου drones και drones που χρησιμοποιούνται από υπηρεσίες ασφάλειας. Αυτά είναι drones που κινούνται με έλικα. Drone με μεγαλύτερη εμβέλεια, από 50 μέχρι και 650 χιλιόμετρα, χρησιμοποιούνται συνήθως από στρατιωτικές μεταρχίες, σε εργασίες σε τέτοιες αποστάσεις με μεγάλο υψόμετρο λειτουργίας (υψόμετρο έως και 5.500 μέτρα). Οχήματα με τέτοιο μεγάλο βεληνεκές συνήθως είναι αεροσκάφη.

Στην αντοχή αυτονομίας εμπεριέχεται η αντοχή του μηχανισμού που παρέχει ενέργεια σε όλο το σύστημα του μη επανδρωμένου οχήματος (μπαταρία συνήθως). Η αντοχή συσχετίζεται με την εμβέλεια του οχήματος με τα χαμηλής εμβέλειας να αντέχουν κοντά στα τρία τέταρτα της ώρας στην αυτονομία. Σε μεγαλύτερης εμβέλειας, μπορούν να αντέξουν και 6 ώρες, με εμβέλεια όμως στα 650 χιλιόμετρα μπορούν να λειτουργούν μέχρι και 2 μέρες πριν χρειαστεί να επιστρέψουν στη βάση τους.

➤ **Άνοιγμα φτερών (εναέρια οχήματα)**

Στη κατηγορία των εναέριων drone, τα οχήματα μεγάλης εμβέλειας κατευθύνονται με τη χρήση φτερών και το μέγεθός τους βασίζεται στο μέγεθος του σκάφους. Τα μικρά σκάφη έχουν μέγεθος φτερών έως και 50 εκατοστά με τα μεγάλα να φτάνουν μέχρι και τα 10 μέτρα

➤ **Βαθμός αυτονομίας**

Τα drones μπορούν επίσης να ταξινομηθούν με βάση τον βαθμό αυτονομίας στις πτητικές λειτουργίες τους. Η ICAO ταξινομεί τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη είτε ως τηλεκατευθυνόμενα αεροσκάφη είτε ως πλήρως αυτόνομα. Ορισμένα UAV προσφέρουν ενδιάμεσους βαθμούς αυτονομίας. Για παράδειγμα, ένα όχημα μπορεί να πιλοτάρεται εξ αποστάσεως στα περισσότερα περιβάλλοντα, αλλά να έχει μια αυτόνομη λειτουργία επιστροφής στη βάση. Ορισμένοι τύποι αεροσκαφών μπορεί προαιρετικά να πετούν επανδρωμένα ή ως UAV, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν επανδρωμένα αεροσκάφη που έχουν μετατραπεί σε μη επανδρωμένα ή προαιρετικά χειριζόμενα οχήματα (OPV). Η πτήση των UAV μπορεί να λειτουργεί υπό τηλεχειρισμό από ανθρώπινο χειριστή, ως τηλεχειριζόμενο αεροσκάφος (RPA) ή με διάφορους βαθμούς αυτονομίας, όπως υποστήριξη αυτόματου πιλότου, μέχρι πλήρως αυτόνομα αεροσκάφη που δεν έχουν καμία ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση.

Στη τελική όμως η αυτονομία ποικίλλει σε drones βάσει της λειτουργίας της:

- Self-level: σταθεροποίηση στάσης στους άξονες επιπέδου και στροφής.
- Διατήρηση υψομέτρου: Το αεροσκάφος διατηρεί το ύψος του χρησιμοποιώντας βαρομετρική πίεση ή/και δεδομένα GPS.
- Αίωρηση/αναμονή θέσης: Διατηρήστε το βήμα και την κύλιση σε επίπεδο, σταθερή στροφή και υψόμετρο ενώ διατηρείτε τη θέση χρησιμοποιώντας GNSS ή αισθητήρες αδράνειας.
- Λειτουργία χωρίς κεφαλή: Έλεγχος βήματος σε σχέση με τη θέση του πιλότου και όχι σε σχέση με τους άξονες του οχήματος.
- Δίχως έλεγχο: αυτόματος έλεγχος κύλισης και εκτροπής κατά την οριζόντια κίνηση

- Απογείωση και προσγείωση (χρησιμοποιώντας μια ποικιλία αεροσκαφών ή επίγειων αισθητήρων και συστημάτων)
- Δικλείσα ασφάλειας: αυτόματη προσγείωση ή επιστροφή στην αφετηρία σε περίπτωση απώλειας του σήματος ελέγχου
- Επιστροφή στη βάση: πτήση πίσω στο σημείο απογείωσης (συχνά αυξάνετε το υψόμετρο πρώτα για να αποφεύγονται πιθανά παρεμβαλλόμενα εμπόδια όπως δέντρα ή κτίρια).
- Ακολουθήση χειριστή: ακολουθεί τη πορεία κινούμενου πιλότου ή άλλου αντικείμενου χρησιμοποιώντας GNSS, αναγνώριση εικόνας ή φάρο θέσης.
- Πλοήγηση με σημεία GPS: Χρήση GNSS για πλοήγηση σε μια ενδιάμεση τοποθεσία σε μια διαδρομή ταξιδιού.
- Τροχιά γύρω από ένα αντικείμενο: Παρόμοια με την Ακολουθήση χειριστή, αλλά κυκλώνει συνεχώς έναν στόχο.
- Προγραμματισμένα ακροβατικά.

Διατίθεται πλήρης αυτονομία για συγκεκριμένες εργασίες, όπως ανεφοδιασμός καυσίμων κατά τη διάρκεια πτήσεων ή επίγεια αλλαγή μπαταρίας.

Άλλες λειτουργίες που είναι διαθέσιμες ή υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν: συλλογική πτήση, αποφυγή σύγκρουσης σε πραγματικό χρόνο, παρακολούθηση τοίχου, κεντράρισμα διαδρόμων, ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση και σμήνος, γνωστικό ραδιόφωνο και μηχανική μάθηση. Σε αυτό το πλαίσιο, η όραση υπολογιστή μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο για την αυτόματη διασφάλιση της ασφάλειας των πτήσεων.

3.1.3 Αντοχή και αξιοπιστία κατασκευής

Η αντοχή των UAV δεν περιορίζεται από τις φυσιολογικές ικανότητες ενός ανθρώπου πιλότου. Λόγω του μικρού μεγέθους, του μικρού βάρους, των χαμηλών κραδασμών και της υψηλής αναλογίας ισχύος προς βάρος, οι περιστροφικοί κινητήρες Wankel χρησιμοποιούνται σε πολλά μεγάλα UAV. Οι ρότορες του κινητήρα τους δεν είναι επηρεπής σε διακοπές. Ο κινητήρας δεν υπόκειται σε ψύξη κραδασμών κατά την κάθοδο και δεν απαιτεί εμπλουτισμένο μείγμα καυσίμου για ψύξη σε υψηλή ισχύ. Αυτά τα χαρακτηριστικά μειώνουν τη χρήση καυσίμου, αυξάνοντας την αυτονομία ή το ωφέλιμο φορτίο.

Η σωστή ψύξη του drone είναι απαραίτητη για τη μακροπρόθεσμη αντοχή του drone. Η υπερθέρμανση και η επακόλουθη βλάβη του κινητήρα είναι η πιο κοινή αιτία βλάβης του drone. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, χρησιμοποιώντας ισχύ υδρογόνου, μπορεί να είναι σε θέση να επεκτείνουν την αντοχή μικρών UAV, έως και αρκετές ώρες.

Η αντοχή των μικροαεροκίνητων οχημάτων μέχρι στιγμής επιτυγχάνεται καλύτερα με τα UAV με πτερύγια, ακολουθούμενα από αεροπλάνα και πολυστροφείς που στέκονται τελευταίοι, λόγω του χαμηλότερου αριθμού Reynolds.

Τα ηλιακά-ηλεκτρικά UAV, μια ιδέα που αρχικά υποστηρίχθηκε από το AstroFlight Sunrise το 1974, έχουν επιτύχει χρόνους πτήσης αρκετών εβδομάδων. Οι ηλιακοί ατμοσφαιρικοί δορυφόροι ("atmosats") που έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία σε υψόμετρα άνω των 20 km (12 μίλια ή 60.000 πόδια) για όσο διάστημα πέντε ετών θα μπορούσαν ενδεχομένως να εκτελούν

καθήκοντα πιο οικονομικά και με μεγαλύτερη ευελιξία από τους δορυφόρους σε χαμηλή τροχιά της Γης. Πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν καιρικά drones για παρακολούθηση καιρού, αποκατάσταση καταστροφών, απεικόνιση της γης και επικοινωνίες.

Οι βελτιώσεις αξιοπιστίας στοχεύουν σε όλες τις πτυχές των συστημάτων UAV, χρησιμοποιώντας τεχνικές ελαστικότητας και ανοχής σφαλμάτων. Η εξατομικευμένη αξιοπιστία καλύπτει την ευρωστία των ελεγκτών πτήσης, για τη διασφάλιση της ασφάλειας χωρίς υπερβολικό πλεονασμό για την ελαχιστοποίηση του κόστους και του βάρους. Επιπλέον, η δυναμική αξιολόγηση του φακέλου πτήσης επιτρέπει UAV ανθεκτικά στη ζημιά, χρησιμοποιώντας μη γραμμική ανάλυση με σχεδιασμένους ad hoc βρόχους ή νευρωνικά δίκτυα. Η ευθύνη του λογισμικού UAV στρέφεται προς τη σχεδίαση και τις πιστοποιήσεις του λογισμικού αεροηλεκτρονικού εξοπλισμού με πλήρωμα. Η ανθεκτικότητα του σμήνους περιλαμβάνει τη διατήρηση των επιχειρησιακών δυνατοτήτων και την αναδιαμόρφωση των εργασιών με δεδομένες αστοχίες της μονάδας.

3.1.4 Σύνοψη

Τη τελευταία δεκαετία, τα μη επανδρωμένα συστήματα έχουν προσφέρει σημαντικές οφέλεις σε διάφορους τομείς. Συγκεκριμένα:

- Ασφάλεια προς το περιβάλλον:

Τα UAV χρησιμοποιούνται σε πολλά περιστατικά λόγω της πρόδου τους στην ασφάλεια. Με τις ικανότητες τηλεχειρισμού τους, τα Drone παρακολουθούν τοποθεσίες, επικοινωνούν πιθανούς κινδύνους και ειδοποιούν απειλητικές συνθήκες, όπως διωλιστήρια πετρελαίου και φυσικού αερίου, αγωγούς και στοίβες φωτοβολίδων. Όχι μόνο αυτό, αλλά η τεχνολογία Drone χρησιμοποιείται στον στρατό και σε περιόδους υψηλού κινδύνου. Τα χαρακτηριστικά τους τους επιτρέπουν να λαμβάνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να δημιουργήσουν και να διατηρήσουν ένα ασφαλές περιβάλλον.

- Εξοικονόμηση κόστους:

Καθώς η δυνατότητα εφαρμογής του drone γίνεται πιο εκτεταμένη, οι τιμές τους οδηγούν επίσης στο να γίνουν πιο φιλικόι προς την τσέπη. Τα UAV δεν είναι πλέον εξοπλισμένα μόνο για τον στρατό, τις νομικές αρχές ή την ελίτ. Δεδομένου ότι τα UAV αναλαμβάνουν πολλά εργατικά δυναμικά, οχήματα και δραστηριότητες λειτουργίας σε εμπορικές χρήσεις, πολλά κόστη διατηρούνται. Για παράδειγμα, ένα Drone είναι πιο οικονομικό στην αγορά, διατήρηση και καύσιμο από τα αεροπλάνα για επιθεωρήσεις.

- Ποιότητα λήψης εικόνων:

Με τις φωτογραφικές μηχανές υψηλής ανάλυσης εξοπλισμένες με κορυφαίους αισθητήρες, τα UAV μπορούν να τραβούν εξαιρετικές φωτογραφίες και βίντεο και να συγκεντρώνουν μεγάλους όγκους ακριβών δεδομένων.

- Ακρίβεια θέσης:

Τα UAV διαθέτουν GPS στο λογισμικό τους, γι' αυτό μπορούν να προγραμματιστούν και να καθοδηγηθούν με ακρίβεια σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Για παράδειγμα, ένα αεροσκάφος Drone χρησιμοποιείται για την εκτέλεση πολλών γεωργικών υποχρεώσεων, όπως ψεκασμό φυτοφαρμάκων, αναγνώριση ζιζανίων, παρακολούθηση της υγείας των καλλιεργειών, ζημιές στις καλλιέργειες, αξιολόγηση καλλιεργειών, ανάλυση εδάφους αγρού, παρακολούθηση άρδευσης κ.λπ. Αυτό το χαρακτηριστικό της ακρίβειας μέσω του GPS εξοικονομεί χρόνο και έξοδα για τους αγρότες.

- Εύκολος έλεγχος και ανάπτυξη:

Η τακτική πρόοδος στην τεχνολογία ελέγχου drone επιτρέπει στους χειριστές να αναπτύσσουν και να χειρίζονται γρήγορα drones ακόμη και με σχετικά ελάχιστο τεχνικό υπόβαθρο. Με μια εκτεταμένη γκάμα drones χαμηλού κόστους που διατίθενται για διάφορους σκοπούς, τα drones είναι ανοιχτά σε ένα ευρύ φάσμα χειριστών. Τα μη επανδρωμένα οχήματα έχουν πιο ολοκληρωμένο εύρος κίνησης, πετούν χαμηλότερα προς όλες τις κατευθύνσεις και μπορούν να πλοηγηθούν αβίαστα σε αντίθεση με ένα αεροσκάφος με πλήρωμα.

- Ασφάλεια:

Με σχετικές άδειες και άδειες, οι χειριστές drone μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα σύστημα μη επανδρωμένων συστημάτων οχημάτων (UVS) για να παρέχουν ασφάλεια και επιτήρηση σε ιδιωτικούς οργανισμούς, πιθανούς χώρους διεξαγωγής και άλλα έξοδα. Τα drones μπορούν επίσης να συγκεντρώσουν αξιόπιστες πληροφορίες από φυσικές καταστροφές για να υποστηρίξουν τις προσπάθειες ασφάλειας και ανάκαμψης.

- Ελαχιστοποίηση κινδύνου:

Με την υποστήριξη ενός Drone, πολλοί κίνδυνοι όπως το υψόμετρο, ο άνεμος, ο καιρός και η ακτινοβολία που υπέστησαν νωρίτερα τα μέλη του πληρώματος έχουν αντικατασταθεί με πιο βιώσιμες και ασφαλέστερες εναλλακτικές λύσεις. Τα drones διευκολύνουν τις απλές και ασφαλείς επιθεωρήσεις πανύψηλων και περίπλοκων κατασκευών όπως διυλιστήρια πετρελαίου, δεξαμενές και ανεμογεννήτριες.

- Εις βάθος λεπτομερής ανάπτυξη:

Πολλά μοντέλα drone κυκλοφορούν στην αγορά με δυνατότητες αποφυγής εμποδίων. Μπορούν να λειτουργούν πολύ κοντά σε κατασκευές και αυτό τους ενθαρρύνει να αξιοποιήσουν ακριβή δεδομένα. Τραβούν εικόνες υψηλής ανάλυσης ή βίντεο 4K που αποκαλύπτουν ρητά ρωγμές, ζημιές, μετατοπισμένα καλώδια και πρόσθετα ελαττώματα που δεν μπορούμε να εντοπίσουμε με γυμνό μάτι. Τα UAV επιτρέπουν τη λήψη πλήρων δεδομένων χωρίς να τίθενται σε κίνδυνο τα μέλη του πληρώματος επιθεώρησης της εταιρείας.

- Ευελιξία για γρήγορες επιθεωρήσεις

Εφόσον τα Drones διατίθενται με ποικίλες προδιαγραφές, πολλά μπορούν να παρέχουν επιθεωρήσεις υψηλού ή χαμηλού υψομέτρου. Η ευελιξία αυτών των χαρακτηριστικών δίνει τη

δυνατότητα στους πελάτες να προσαρμόζουν εύκολα τα εργαλεία για τα έργα τους. Τα drones είναι κατάλληλα τόσο για τακτικά όσο και για σενάρια έκτακτης ανάγκης, η κατασκευαστική βιομηχανία συμμορφώνεται με αυτά τα πλεονεκτήματα, ειδικά οι κατασκευαστές κτιρίων για επιθεωρήσεις στέγης. Τα drones μπορούν να εκτελέσουν πολλαπλούς ρόλους, όπως λήψη φωτογραφιών, βίντεο, θερμικών εικόνων, κ.λπ. υψηλής ποιότητας. Στη συνέχεια, αυτά τα δεδομένα μεταδίδονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία αμέσως, σε αντίθεση με τη χρονοβόρα συμβατική μέθοδο.

- Έλεγχοι σε επικίνδυνες περιοχές:

Τα UAV καθιστούν τη λήψη αποτελεσματικών δεδομένων από δυσπρόσιτες τοποθεσίες μια βόλτα για τους επαγγελματίες του κλάδου. Είναι η καταλληλότερη εναλλακτική για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των παραδοσιακών μεθόδων σχετικά με την ασφάλεια των εργαζομένων, ειδικά σε επικίνδυνες καταστάσεις όπως η παρακολούθηση ακτινοβολίας, η επιθεώρηση γραμμών υψηλής τάσης. Τα drones επιτρέπουν επίσης μια πιο οικονομική προσέγγιση για τις επιθεωρήσεις αυτών των τοποθεσιών.

Αλλά, όπως όλες οι μορφές τεχνολογίας, έτσι και τα μη επανδρωμένα συστήματα έχουν και τις ατέλειές τους:

- Απόρρητο:

Ενώ τα οφέλη του drone είναι ατελείωτα, η τεχνολογία των drone έχει πολλά μειονεκτήματα. Τα UAV μπορούν γρήγορα να πέσουν θύματα χειραγώγησης και να παραβιάσουν το απόρρητο μιας ομάδας ή ενός ατόμου. Αν και πολλοί επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν drones για τη διατήρηση της ασφάλειας, θα μπορούσε να παραβιάσει πολλές ατομικές ελευθερίες στο όνομα της δημόσιας ασφάλειας.

- Νομοθεσία:

Ο νόμος εξακολουθεί να αναπτύσσεται, δεδομένου ότι είναι μια νέα τεχνολογία στον κλάδο. Οι ειδικές πρακτικές που έχουν εγκατασταθεί για μικροσκοπικά drones ισχύουν επίσης για εμπορικές και ψυχαγωγικές εφαρμογές, αλλά εξακολουθούν να είναι ασαφείς σε πολλές διαστάσεις. Οι κανόνες για τη ρύθμιση της κίνησης των drones και την προστασία της ιδιοκτησίας από εναέρια παραβίαση βρίσκονται ακόμη υπό διαμόρφωση. Έτσι, η τεχνολογία UAV λειτουργεί σε μια δικαστική γκρίζα ζώνη. Υπάρχουν πολυάριθμες προστριβές μεταξύ των κυβερνητικών κανονισμών και οποιωνδήποτε νόμων της πολιτείας ή της πόλης για τη διαχείριση των δικαιωμάτων ιδιοκτησίας στον εναέριο χώρο, εξαιτίας των οποίων οι χειριστές drone ενδέχεται να παραβιάζουν κανόνες που δεν γνώριζαν.

- Ασφάλεια:

Η ασφάλεια είναι ένα θεμελιώδες στοιχείο που πρέπει να δοθεί προτεραιότητα κατά τη λειτουργία της τεχνολογίας drone. Τα UAV εξοπλισμένα με αισθητήρες υψηλής ποιότητας αναγνωρίζουν πιθανές συγκρούσεις και σχεδιάζουν με ασφάλεια τον τρόπο γύρω τους, καθιστώντας τα ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Αυτές οι ικανότητες drone πρέπει να μοιάζουν με αυτές των επανδρωμένων πλοηγών αεροσκαφών. Είναι αξιόπαινο να προσλαμβάνουμε

επαγγελματίες παρόχους υπηρεσιών drone που μπορούν να χειριστούν ένα εναέριο drone χωρίς να το συντρίψουν. Τα drones που λειτουργούν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές έχουν αυξημένο κίνδυνο πρόσκρουσης ή ζημιάς στο έδαφος, κυρίως λόγω δυσλειτουργίας του συστήματος ή πειρατείας

- Δυσλειτουργίες λογισμικού:

Υπήρχαν προηγουμένως πολλά drones που εκτόξευαν όπλα σε απλούς ανθρώπους, προκαλώντας σημαντικό αριθμό θυμάτων, τραυματισμών και ζημιών λόγω δυσλειτουργιών ή σφαλμάτων λογισμικού. Ατυχίες με drone χτυπούν και την ασφάλεια άλλων στρατιωτικών. Τα drones βρίσκονται ακόμη σε διαδικασία βελτίωσης για τον περιορισμό των ατυχημάτων ή των κινδύνων που μπορούν να επηρεάσουν την υγεία και την ασφάλεια των ανθρώπινων ζώων.

- Κατασκοπεία:

Πολλοί παραβάτες χρησιμοποιούν drones ως στρατηγική για να στοχεύσουν τα θύματά τους και να διατηρήσουν ένα ίχνος πάνω τους. Οι κραυγαλέοι θόρυβοι της έλικας δεν προκαλούν πλέον ανησυχία και είναι απαρατήρητοι, επιτρέποντας στους εγκληματίες να εισβάλουν στην ιδιωτική ζωή κάποιου. Πολλά drones εξοπλισμένα με θερμικούς και νυχτερινούς αισθητήρες εντοπίζουν σημάδια ζωής και στοχεύουν αποτελεσματικά εκείνα που ενδιαφέρουν αυτήν τη στιγμή ο κατάσκοπος. Δεδομένου ότι τα UAV μπορούν να συλλάβουν ακριβή δεδομένα, μπορούν να καταγράψουν τακτικές συνήθειες και να αναγνωρίζουν ύποπτες δραστηριότητες χωρίς άδεια.

- Επιρροή σε δυκτιακές εισβολές:

Ένα σημαντικό μειονέκτημα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των drone είναι η ευπάθειά της. Οι χάκερ μπορούν γρήγορα να επιτεθούν στο κεντρικό σύστημα ελέγχου ενός drone και να γίνουν ο αρχικός ελεγκτής του drone. Το πρωτεύον σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει σημαντικές γνώσεις που είναι ζωτικής σημασίας για να αποφύγουν οι χάκερ χωρίς την επίγνωση του αρχικού χειριστή. Οι χάκερ μπορούν να αποκτήσουν ιδιωτικές πληροφορίες, να καταστρέψουν ή να καταστρέψουν τα αρχεία και να διαρρεύσουν δεδομένα σε μη εξουσιοδοτημένα τρίτα μέρη.

- Καιρικές και περιβαντολλογικές συνθήκες:

Τα drones είναι συνήθως πιο ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες σε αντίθεση με τα παραδοσιακά αεροσκάφη. Για παράδειγμα, εάν οι κλιματικές συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές, το UAV δεν θα ελίσσεται κατάλληλα ούτε θα συλλέγει αξιόπιστα δεδομένα ή εικόνες. Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμα drones που είναι πιο σταθερά και μπορούν να αντέξουν με επιτυχία τις ριπές ανέμου.

- Ιστορικό γνώσεων:

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, εάν κάποιος χρειάζεται να συλλέξει ακριβή, υψηλής ποιότητας δεδομένα, πρέπει να διαθέτει το απαιτούμενο σύνολο δεξιοτήτων. Αυτή η προδιαγραφή θα υποδείκνυε ότι ένας μέσος αγρότης θα χρειαζόταν ολοκληρωμένη εκπαίδευση ή έναν τρίτο πάροχο υπηρεσιών drone για τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση των γεωργικών δεδομένων. Με την επέκταση των χειριστών στον κλάδο, το κόστος των drone και οι συνοδευτικές δαπάνες πόρων θα μειωθούν σταδιακά.

Κεφάλαιο 3.2 Τομείς Διεργασιών μελετών ΜΚΕ με ΡΣ

Η ανάγκη για μη επανδρωμένα ρομπότ (Μ.Ε.Ρ.) στο τομέα επιθεώρησης ακεραιότητας κατασκευών και ο συνεχής τους έλεγχος αυξάνεται όλο και περισσότερο. Σωστή καθοδήγηση, πλοήγηση και έλεγχος είναι ζωτικής σημασίας βήματα στη διαδικασία της επιθεώρησης. Οι τεχνικές ποικίλων ανάλογα με την απαιτούμενη τεχνολογία: υπάρχουν αυτοματοποιημένα μη επανδρωμένα συστήματα μακράς απόστασης με σταθερά φτερά ώστε να εκτελούν τις διεργασίες τους χιλιόμετρα μακριά από την αφετηρία, αλλά η ακρίβεια θέσης και καθοδήγηση πέρα από εμπόδια έρχονται δεύτερες όταν σχεδιάζεται το σχέδιο στροφών. Τα Μ.Ε.Ρ. με περιστρεφόμενα φτερά (έλικες), έχουν μικρότερο βελινεκές αλλά λειτουργούν καλύτερα σε χαμηλές ταχύτητες, επιτρέποντάς τους να αιωρούνται στο απαιτούμενο σημείο και να κάνουν ελιγμούς μέσα με στενά σημεία, τα οποία και προτεμούνται για επιθεωρήσεις ακεραιότητας κατασκευών.

Οι μη καταστροφικές δοκιμές που βασίζονται σε drone είναι μια εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές επιθεωρήσεις και ένα μέσο για την ελαχιστοποίηση της απαίτησης για πολλούς οδηγούς κόστους σταδιοποίησης NDT. Τα drones προσφέρουν μυριάδες πλεονεκτήματα.

➤ Εύρος δυνατοτήτων και εξοπλισμού

Η πρόοδος στη τεχνολογία επιτρέπει στα ρομποτικά συστήματα να είναι εξοπλισμένα με αποσπόμενες κεφαλές και αισθητήρες ανάλογα με την απαίτηση της μελέτης. Τα drones παρέχουν την ευελιξία, ώστε η μελέτη να γίνεται σε κάθε τοποθεσία, αγνοώντας την τοποθεσία ή την διαρύθμισή της. Ο συνδυασμός drone με την κατάλληλη τεχνολογία ΜΚΕ αυξάνει την ικανότητα εκτέλεσης μιας μεγάλης ποικιλίας επιθεωρήσεων χωρίς να καταστρέφονται ή να αλλάζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών. Αυτό βοηθά στον εντοπισμό των περισσότερων επιφανειακών και υποεπιφανειακών ελαττωμάτων και είναι χρήσιμο στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου λόγω της λεπτής φύσης του. Ορισμένες κοινές δοκιμές περιλαμβάνουν οπτικές επιθεωρήσεις, επιθεωρήσεις δινορευμάτων και υπερήχων, μέχρι και ραδιογραφική εικονοληψία. Καθένα από αυτά παράγει ένα σύνολο αποτελεσμάτων που βοηθούν στον προσδιορισμό εάν τα εξαρτήματα εξακολουθούν να πληρούν τα απαιτούμενα πρότυπα και κανονισμούς.

Τα drones επίσης έχουν και μορφές κίνησης ανάλογα με την απαίτηση της τοποθεσία. Υπάρχουν εναέρια μη επανδρωμένα τα οποία επιτρέπουν μελέτες σε μεγάλα ύψη και αρκετές φορές είναι εξοπλισμένα ώστε να μπορούν να καθοδηγούν πέρα από εμπόδια και πολύ στενούς χώρους. Αξιοσημείωτα είναι και τα ερπυστιοφόρα, τα οποία μπορούν να συνδεθούν μαγνητικά σε επίπεδες επιφάνειες ώστε να γίνονται οι μελέτες σε υψηλές επιφάνειες χωρίς το ρίσκο τραυματισμού κατά την αναρρήγηση ή στο εσωτερικό δεξαμενών και σιλό που δεν είναι εύκολο ένας άνθρωπος να πατήσει.

Παρομοίως υπάρχουν και υποβρύχια drones. Ένα υποβρύχιο drone λειτουργεί ελέγχοντας την άνωσή του ώστε να μην βυθίζεται. Οι ενσωματωμένοι κινητήρες σπρώχνουν το νερό και

επιτρέπουν στο drone να ελέγχεται εξ αποστάσεως ή χρησιμοποιώντας τους δικούς του ενσωματωμένους αισθητήρες. Τα drones είναι ειδικά σχεδιασμένα για να λειτουργούν σε σκληρά περιβάλλοντα χαμηλού φωτισμού. η κάμερα παρέχει αξιόπιστα εξαιρετικό υλικό για τους χειριστές. Τα υποβρύχια drones συνδέονται με τον πίνακα ελέγχου όπου οι χειριστές μπορούν να δουν οθόνες υψηλής ανάλυσης για να δουν ακριβώς τι βλέπει το drone από την τοποθετημένη κάμερά του. Ο φορητός ελεγκτής επιτρέπει στους χειριστές να καθοδηγούν το drone στον στόχο του, να ελέγχουν την κάμερα αλλάζοντας τη γωνία, ζουμ και περιστρέφοντας. Τέτοια μη επανδρωμένα σκάφη χρησιμοποιούνται σε επιθεωρήσεις σε θαλάσσιες υποδομές, συμπεριλαμβανομένων κατασκευών τοιχωμάτων αποβάθρας, προβλήτες και κυματοθραύστη χωρίς τους κινδύνους που συνδέονται με την εργασία. Αυτά τα drones είναι αρκετά ανθεκτικά για πολλαπλές αναπτύξεις, γεγονός που επιτρέπει στους χειριστές να πραγματοποιούν επιθεωρήσεις σε κλειστούς χώρους. Για παράδειγμα, η δομική ακεραιότητα ενός λιμένα απαιτεί περιοδικές επιθεωρήσεις.

➤ **Ασφάλεια**

Πιο αξιοσημείωτη είναι η πτυχή της ασφάλειας που παρέχουν. Δεδομένου ότι πολλές μέθοδοι NDT απαιτούν από τεχνικούς να εργάζονται σε ύψη, ο σημαντικός κίνδυνος για τον επιθεωρητή μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας επιθεωρήσεις drone. Η χρήση drones όχι μόνο εξαλείφει το μεγαλύτερο μέρος της ανάγκης για τέτοια επικίνδυνη δραστηριότητα, αλλά παρέχει επίσης πολλές πρόσθετες υπηρεσίες σε τέτοια ύψη που οι άνθρωποι δεν μπορούν να εκτελέσουν με αντίστοιχη αποτελεσματικότητα. Μεταξύ άλλων αξιοσημείωτων πλεονεκτημάτων για τα drones όσον αφορά την ασφάλεια είναι η ευκολία αποφυγής επικίνδυνων ατμοσφαιρών ή πιθανών περιορισμένων χώρων για τεχνικούς.

➤ **Μείωση χρόνου και κόστους επιθεώρησης**

Οι μη καταστροφικές δοκιμές που βασίζονται σε drone επιτρέπουν τον εύκολο, ταχύτερο και πιο οικονομικό εντοπισμό ελαττωμάτων σε υλικά. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο τμήμα συντήρησης να πραγματοποιήσει έγκαιρες επισκευές στα προϊόντα τους πριν προκύψουν προβλήματα. Κάθε μία από τις τεχνολογίες παίζει τον ατομικό της ρόλο στη μείωση του κόστους και του χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης επιθεώρησης. Περαιτέρω, η δοκιμή χωρίς διακοπή λειτουργίας σημαίνει ότι η εταιρία θα εξοικονομήσει χρόνο και θα αποφύγει τις απώλειες παραγωγής. Μόνο λίγοι εργαζόμενοι πρέπει να βρίσκονται στο χώρο εργασίας για να γίνουν οι έλεγχοι. Επιπλέον, οι επιθεωρήσεις ΜΚΕ που βασίζονται σε drone μειώνουν σημαντικά την ανάγκη για μεγάλα μεταφορικά οχήματα και ελικόπτερα να φτάσουν σε απομακρυσμένες περιοχές. Οι τεχνολογίες μειώνουν το κόστος μεταφοράς καθώς και το κόστος ασφάλισης και επειδή οι δοκιμές είναι λιγότερο χρονοβόρες, το κεφάλαιο που παρέχεται για διανομές και επιδόματα είναι μικρότερο. Οι επιθεωρήσεις ΜΚΕ που βασίζονται σε drone μπορούν να εντοπίσουν πιο γρήγορα τα περισσότερα ελαττώματα και έτσι παρέχουν στο

προσωπικό συντήρησης αρκετές πληροφορίες που θα τους επιτρέψουν να διορθώσουν προβλήματα και να αποτρέψουν διαρροές και ζημιές στους αγωγούς.

➤ **Αξιοπιστία Εγκατάστασης**

Η παραβίαση σχεδιασμού του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια των καταστροφικών δοκιμών επηρεάζει την αξιοπιστία του και μερικές φορές τη διάρκεια ζωής του. Αν, για παράδειγμα, απαιτείται η κοπή ενός μεταλλικού υλικού, η επανασυγκόλλησή του οδηγεί σε αλλαγές στη δομή του. Αυτό μπορεί να αποδυναμώσει τη συγκολλημένη ή τη περιβάλλουσα περιοχή του, κάνοντας κάποια από τμήματα της περιοχής να ανταποκρίνονται διαφορετικά σε λειτουργικές καταπονήσεις. Η επιθεώρηση ΜΚΕ από την άλλη, δεν παρεμβαίνει στις κατασκευές και έτσι μπορούν να διατηρούν την αρχική σχεδιαστική μορφή τους. Τέτοιες μελέτες είναι ένας πολύ καλός τρόπος να καθοριστεί εάν οι κατασκευές πληρούν κάποιες συγκεκριμένες απαιτήσεις περιβάλλοντος και ασφάλειας. Οι περισσότερες από αυτές τις δοκιμές, οι οποίες είναι τακτικές, μπορούν να πραγματοποιηθούν αβίαστα με τη χρήση μη επανδρωμένων συστημάτων. Εάν πληρούν τα αποδεκτά επίπεδα, τότε επιτρέπεται να λειτουργούν σε συστήματα να συνεχίσουν τη λειτουργία τους, διαφορετικά θα χρειαστεί να πραγματοποιούνται επισκευές ή αντικαταστάσεις για την αποφυγή προβλημάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε απρογραμματίστες διακοπές λειτουργίας ή και καταστροφές.

➤ **Πλήρης και Ακριβής αναφορά επιθεώρησης**

Χρησιμοποιώντας ένα μη επανδρωμένο σύστημα για πρόσβαση σε δύσβατες περιοχές, οι ΜΚΕ μπορούν στη συνέχεια να αξιολογήσουν τις δομές και να παρέχουν ολοκληρωμένα δεδομένα που θα χρειάζονταν αρκετές μέρες αν εκμεταλλευόμασταν τις κλασικές μεθόδους πρόσβασης. Οι επιθεωρήσεις ΜΚΕ που βασίζονται σε drone στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα δοκιμών για μια ποικιλία ιδιοτήτων. Το καλύτερο είναι ότι η διαδικασία επιθεώρησης είναι συνήθως επαναλαμβανόμενη και μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη κατά την ανάλυση της αποτελεσματικότητας οποιωνδήποτε επισκευών. Χρησιμοποιώντας τη θέση και άλλα χειριστήρια, τα drones μπορούν να κάνουν τις ίδιες δοκιμές από το ίδιο σημείο και γωνία ξανά και ξανά. Αυτό βοηθά το προσωπικό συντήρησης να παράγει ακριβή αποτελέσματα και να εξαλείφει τα σφάλματα που θα προέκυπταν από τη διενέργεια δοκιμών σε διαφορετικές τοποθεσίες.

3.2.1 Ανάπτυξη πορισμάτων συσχέτισης μελετών ΜΚΕ με ΡΣ

- Αρθρωτά

Μέχρι και σήμερα, τα αρθρωτά ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούνται για κατασκευές, μεταφορές και συγκολλήσεις. Στον τομέα του Μη Καταστροφικού Ελέγχου, οι αρθρωτοί βραχίονες μπορούν να βοηθήσουν σε μεγάλο εύρος μελετών. Όμως κάθε μελέτη έχει και τους περιορισμούς τις όσο αφορά τοποθεσία και περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Σε επίγειες και σταθερές επιφάνειες, κάθε μελέτη είναι εφικτή όσο αφορά τις προαναλυμένες εφαρμογές ΜΚΕ. Όμως σε εναέριες δοκιμές (π.χ. μελέτες με εναέρια μη επανδρωμένα ρομπότ –drone-) ο Οπτικός Έλεγχος είναι εφικτός, όσο ο ενδιάμεσος μελέτης είναι καλής ποιότητας και ο χειριστής του drone είναι έμπειρος αρκετά ώστε να κρατάει το όχημα σταθερό. Παρόλη τη σταθερότητά τους, η πορεία του αέρα μπορεί να καταστήσει δύσκολη τη μελέτη. Τόσο στον αέρα όσο και υποβρύχια είναι εφικτή, όσο τα στοιχεία του υποβρύχιου περιβάλλοντος δεν παρουσιαστούν εμπόδιο στη μελέτη.

Σε πιο ειδικευμένες μελέτες όμως, όπως η Ραδιογραφία, τα Δινορεύματα και τα ΔΥ, η μελέτη είναι, αν όχι αδύνατη, απόλυτα δύσκολη. Κάθε άλλο αλλά η μελέτη Ραδιογραφίας απαιτεί απομονωμένο και αποστειρωμένο περιβάλλον για να μπορέσει να αποδώσει κατάλληλα αποτελέσματα. Σε ένα ανοιχτό χώρο ή κάτω από το νερό θα είναι δύσκολο γιατί ο μηχανισμός ακτινών Χ πρέπει να είναι σταθερός για να λάβει καθαρή εικόνα και επιπλέον εξωτερικοί παράγοντες μπορεί να παρέμβουν και να δυσκολέψουν ή χειρότερα να σταματήσουν τη διαδικασία. Πρέπει να αναφερθεί φυσικά ότι η ακτινοβολία που παράγεται είναι βλαβερή για το περιβάλλον, ειδικά στην υδρόβια ζωή.

Στη περίπτωση των Δινορευμάτων δεν ισχύει τόσο ο κίνδυνος προς το περιβάλλον όσο η δυνατότητα φορητότητας της συσκευής. Επιπλέον με το νερό να είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, η μελέτη θα είναι άκρως επικίνδυνη για το υδρόβιο περιβάλλον και την ίδια τη συσκευή (ακόμα και με μη επανδρωμένα).

Η μελέτη με χρήση Διεσδυτικών υγρών είναι εφικτή σε κάθε μορφής ρομποτικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που θα αναλυθούν παρακάτω, σε επίγειες σταθερές επιφάνειες, αρκεί να είναι εφικτή η διαδικασία μέχρι πέρας (Καθαρισμός επιφάνειας, εφαρμογή υγρού εμφάνισης, καθαρισμός περίσσιου, εφαρμογή εμφανιστή). Εναέρια δεν θα ήταν εφικτό επειδή για να μπορέσει να καθαριστεί φορητά η επιφάνεια πρέπει να εφαρμοστεί δύναμη από τη πλευρά του ρομπότ, κάτι που είναι σχετικά δύσκολο ειδικά σε εναέριες συνθήκες.

Σε υποβρύχιες συνθήκες τα Δ.Υ. είναι θεωρητικά και πρακτικά αδύνατον να αποδώσουν αποτελέσματα. Τα υγρά εφαρμόζονται με πιεσμένο αέρα (σπρέι). Κάτω από το νερό δεν θα είναι εφικτή η κατάλληλη εφαρμογή τους, και αν υπήρχε μια πιθανότητα επιτυχής εφαρμογής τα αποτελέσματα δεν θα ήταν πολύ ξεκάθαρα για να αποδοθεί καθαρή ετυμηγορία αποτελεσμάτων.

Η μελέτη με χρήση Μαγνητικών Σωματιδίων είναι εφικτή στον αέρα, αλλά, όπως και στα Δ.Υ., ο αέρας μπορεί να εμποδίσει την σωστή εφαρμογή των μαγνητικών ρινισμάτων και μπορεί να οδηγήσει σε σπατάλη του σπρέι. Για τέτοιες μελέτες που έχουν λεπτομερή διαδικασία, συνήθως χρησιμοποιούνται υβριδικά ρομπότ ώστε να γίνει πιο εύκολη η διαδικασία τους. Για παράδειγμα ένα κυλινδρικό ρομπότ που έχει συνδεδεμένους αρθρωτούς βραχίονες. Υποβρύχια επίσης δεν είναι εύκολη η εφαρμογή του σπρέι μεταλλικών ρινισμάτων, και επειδή δεν είναι ασφαλή για το περιβάλλον, δεν είναι ιδανικά για υποβρύχιες μελέτες.

Μελέτες όπως οι Υπέρηχοι μπορούν να πραγματοποιηθούν σε υδάτινο περιβάλλον πιο εύκολα σε σχέση με εναέριες τοποθεσίες. Η ανάγκη επαφής με την επιφάνεια μελέτης, καθιστά το νερό πιο εύκολο στη μελέτη από τις εναέριες τοποθεσίες.

- **Καρτεσιανά**

Τα καρτεσιανά ρομπότ, εξαιτίας των πρισματικών συνδέσμων καθιστά, ως ένα βαθμό, δύσκολη ως και αδύνατη τη μελέτη με κάποιες προηγμένες εφαρμογές ΜΚΕ σε εναέριες και υδάτινες τοποθεσίες. Τα καρτεσιανά ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιούνται με μέσα που τα κάνουν να συνδέονται, μαγνητικά συνήθως, πάνω στις επιφάνειες για να γίνουν μελέτες ΜΚΕ. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει χαρτογράφηση του εσωτερικού ενός συστήματος σωληνώσεων. Σε μελέτες με Υπερήχους, αν και συνήθως χρονοβόρες, είναι εφικτές σε υδάτινο περιβάλλον, αρκεί να υπάρχει σταθερότητα για να γίνει σωστή λήψη αποτελεσμάτων.

- **Κυλινδρικά και Σφαιρικά**

Λόγω των τύπων σύνδεσης των αρθρώσεων, τέτοια ρομποτικά συστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο του εσωτερικού δεξαμενών και άλλων κυλινδρικών και σφαιρικών επιφανειών με ευκολία. Σε υποβρύχιες και εναέριες τοποθεσίες όμως είναι δύσκολο ως αδύνατο διότι, το ρομπότ πρέπει να είναι σταθερό για τη χρήση του. Επιπλέον τα σφαιρικά ρομπότ, τα οποία πρακτικά είναι υβριδική εκδοχή των κυλινδρικών ρομπότ, κατασκευάζονται συνήθως με ένα εξωτερικό σφαιρικό θόλο για να γίνουν οι μελέτες ή συναρμολογήσεις μέσα σε αυτόν, κάτι που περιορίζει το μέγεθος του αντικειμένου προς μελέτη. Στον εναέριο τομέα έχουν κατασκευαστεί ρομπότ που περιστρέφουν τους βραχίονες που κατέχουν τους αντίστοιχους αισθητήρες και κατευθύνονται με τη βοήθεια προπέλων.

- **SCARA**

Εξαιτίας της μορφής, της θέσης δέκτη των ρομπότ SCARA, μόνο σταθερές επίγειες επιφάνειες θα μπορούσαν να μελετηθούν με επιτυχία. Μέχρι σήμερα τα ρομπότ SCARA χρησιμοποιούνται στο τομέα συναρμολόγησης και μεταφοράς αντικειμένων. Οι μελέτες ΜΚΕ θα μπορούσαν να είναι εφικτές με υβριδικά ρομπότ SCARA για μελέτες που κάνουν χρήση πολλαπλών υλικών για τη λήψη αποτελεσμάτων.

- Δέλτα

Η ευελιξία και σταθερότητα των ρομπότ Δέλτα δεν καθιστά απόλυτα εύκολη τη μελέτη ΜΚΕ με τη χρήση τους. Θεωρητικά ο Οπτικός Έλεγχος και η μελέτη με Υπερήχους θα ήταν εφικτή σε δύσβατες τοποθεσίες αλλά ταυτόχρονα η ανάγκη ειδίκευσης καθιστά δύσκολη την επιτυχή εφαρμογή μελετών.

Συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα γίνεται συσχέτιση των ρομποτικών συστημάτων του μέρους Β σε σχέση με τις μελέτες μη καταστροφικού ελέγχου που αναλύθηκαν στο Μέρος Α.

ΜΚΕ ΡΣ	ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ			ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙ Α			ΥΠΕΡΗΧΟΣ			ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΑ			ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ			ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ		
	1	0	?	1	0	0?	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	?	0
ΑΡΘΡΩΤΑ	1	1	1	1	0	0?	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	?	0
ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΑ	1	0	?	1	0	0	1	0	?	1	0	0	1	0	0	1	?	0
ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ	1	0	?	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	?	0
ΣΦΑΙΡΙΚΑ	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	?	0
SCARA	1	1?	0	1?	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	?	0
ΔΕΛΤΑ	?	?	?	?	0	0	?	?	?	?	0	0	?	0	0	1	?	0

1 – ΝΑΙ

Πίνακας 3.1 Συνοπτικός πίνακας συσχέτισης των ρομποτικών συστημάτων με μελέτες ΜΚΕ.

0 – ΟΧΙ

 – ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

 – ΑΝΑΕΡΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

 – ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

? – ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΕΦΙΚΤΟ

3.1.2 Σύνοψη

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα:

- Τα ρομπότ προσφέρουν ευελιξία στη χρήση και στη διαδικασία μελέτης, και λόγω της σταθερότητας.
- Η αυτοματοποίηση μπορεί να βοηθήσει σε ταχύτατες και ταυτόχρονα πολύ αναλυτικές μελέτες.
- Ευελιξία ως προς το περιβάλλον εφαρμογής τους.
- Κατάλληλη προστασία των συστημάτων μπορεί να βοηθήσει σε διευκόλυνση μελετών που εμπεριέχουν ακτινοβολία, ηλεκτρικά ρεύματα και μαγνητικά πεδία.

Αλλά σε μειονεκτήματα:

- Εκτός από ειδίκευση στις μεθόδους ΜΚΕ, απαιτείται και εμπειρία με τη χρήση μη επανδρωμένων ρομπότ, ένας συνδυασμός γνώσης που μέχρι και σήμερα δεν είναι αρκετά ανεπτυγμένος.
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού και περιόδου εκμάθησης.
- Παρόλη την ευκολία τους, ο κίνδυνος ατυχήματος κατά τη διαδικασία μελέτης παραμένει.
- Η αυτοματοποίηση θα σβήσει πολλές θέσεις εργασίας.
- Κάθε μελέτη ΜΚΕ καθώς και κάθε είδος ρομποτικού συστήματος, έχει τους περιορισμούς του όσο αφορά τον χώρο και το περιβάλλον εργασίας.
- Τα υβριδικά ρομπότ αν και λύνουν κάποια από τα προβλήματα που μπορεί να έχουν κάποια από τα κομμάτια τους, θα προκαλέσουν την ανάγκη για επιπλέον εκπαίδευση στη χρήση τους.

Κεφάλαιο 3.3 Η τεχνολογία του σήμερα

3.3.1 Οπτικός Έλεγχος



Εικόνα 3.1 Μη επανδρωμένα ρομποτικά συστήματα κατασκευασμένα για μελέτες NDT.

^[5]Μέχρι και σήμερα ο **Οπτικός Έλεγχος** χρησιμοποιείται σε σύνδεση με μη επανδρωμένα ρομπότ. Έτσι μπορούν να ελέγχονται εγκαταστάσεις οι οποίες είναι, ως ένα βαθμό, ανθρώπινα δύσβατες. Παραδείγματα είναι η κορυφές εγκαταστάσεων εξόρυξης πετρελαίου, οι υποβρύχιες βάσεις υδροφράγματων και γραμμές διανομής ηλεκτρικού ρεύματος. Εταιρίες όπως η AETOS του ομίλου MISTRAS Inc έχουν κατασκευάσει μη επανδρωμένα ρομποτικά συστήματα για κάλυψη επιθεωρήσεων ΜΚΕ σε εναέριες, επίγειες και υποβρύχιες τοποθεσίες που εξορίζουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο και πετροχημικά, σε αστικές υποδομές και βιομηχανίες κοινής ωφέλειας αλλά και την ενέργεια. Οι δυνατότητες επιθεώρησης drone ΜΚΕ της AETOS, σε συνδυασμό με τις προσφορές της MISTRAS ως παγκόσμιου παρόχου λύσεων προστασίας περιουσιακών στοιχείων, προσφέρουν την ευκαιρία για πλήρως ολοκληρωμένη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, ακόμη και σε περιορισμένες ή επικίνδυνες τοποθεσίες. Οι συνδυασμένες τους λύσεις με δυνατότητα τεχνολογίας παρέχουν στους χειριστές εγκαταστάσεων μοναδικά ωφέλιμες λύσεις για τη διενέργεια επιθεωρήσεων κατά τη χρήση, τη βελτίωση της λειτουργικής υγείας, τη διαχείριση και τον εντοπισμό ελαττωμάτων, την υποστήριξη κρίσεων και καταστροφών, την επίβλεψη των εργασιών κατασκευής και επισκευής και την οικονομική παρακολούθηση των εσωτερικών και εξωτερικών περιουσιακών στοιχείων.

Στον τομέα εναέριας επιθεώρησης καλύπτεται η ακεραιότητα κατασκευών που βρίσκονται σε ψηλά, κάτι που καθιστά τον έλεγχο ακεραιότητάς τους δύσκολο. Μερικά από αυτά είναι:

➤ Γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας

Η σταθερή και αξιόπιστη ισχύς είναι ζωτικής σημασίας για την ομαλή λειτουργία των διαδικασιών. Οι τακτικές επιθεωρήσεις NDT πύργων, συνδέσεων και μονωτών είναι κεντρικές σε αυτές τις λειτουργίες και η χρήση UAS*² επιτρέπει την ολοκλήρωσή τους εύκολα, αποτελεσματικά και γρήγορα. Στις βιομηχανίες ηλεκτρικής ενέργειας και υπηρεσιών κοινής

ωφέλειας, οι ζημιές από καταιγίδες και άλλα ζητήματα μπορούν να επηρεάσουν την ακεραιότητα των γραμμών ή της δομής. Οι επιθεωρήσεις με drone μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό προβλημάτων διατηρώντας παράλληλα το προσωπικό σε ασφαλή τοποθεσία. Εκτός από τις επιθεωρήσεις UAV γραμμών ισχύος, η AETOS έχει επίσης εμπειρία στη διεξαγωγή επιθεωρήσεων ενεργειακής βιομηχανίας σε λέβητες, γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας (HRSGs), ανεμογεννήτριες και ηλιακού συλλέκτες.

➤ Πύργοι ψύξης βιομηχανιών

Οι πύργοι ψύξης μπορεί να χάσουν την αποτελεσματικότητά τους καθώς γερνούν και τα υποκείμενα προβλήματα μπορεί να είναι δύσκολο να διαγνωστούν. Ως προηγμένη τεχνική για τη διεξαγωγή επιθεωρήσεων πύργων ψύξης σταθμών παραγωγής ενέργειας και πετροχημικών διυλιστηρίων, η θερμική απεικόνιση έχει γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο ρομποτικής επιθεώρησης NDT στην ενεργειακή βιομηχανία.

Χρησιμοποιώντας μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα για τη λήψη μιας υπερυψωμένης, πλήρους κάλυψης υπέρυθρη /θερμική εικόνα του πύργου, των ανεμιστήρων εξάτμισης και της συσκευασίας, οι μηχανικοί μπορούν να εντοπίσουν πιο εύκολα προβλήματα. Η αναποτελεσματικότητα στις στήλες απόσταξης σημαίνει απώλεια κερδών. Η μη επανδρωμένη θερμική και οπτική απεικόνιση μπορεί να εκθέσει προβλήματα μόνωσης ή διεργασιών, ενημερώνοντας αποτελεσματικά τις προετοιμασίες ανάκαμψης.

Η ίδια εταιρία παρέχει και M.E.P. εδάφους, προσαρμοσμένους με εξαρτήματα και με αρθρωτούς βραχίονες για λειτουργία σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές.

➤ Σωληνώσεις

Οι περισσότερες σωληνώσεις εντός διυλιστηρίων διεργασιών και χημικών εργοστασίων και πολλοί εξωτερικοί αγωγοί μπορεί να είναι αδύνατο να επιθεωρηθούν με τις συμβατικές μεθόδους επιθεώρησης, συχνά λόγω της δυσκολίας πρόσβασης στις τοποθεσίες τους. Κατά τη διάρκεια των ανατροπών, αυτά τα περιουσιακά στοιχεία πρέπει να υποβληθούν σε ενδεδειγμένες επιθεωρήσεις, καθώς τα επικίνδυνα υλικά που ρέουν μέσα από αυτά δημιουργούν εξαιρετικά περιβάλλοντα για διάφορους μηχανισμούς ζημιάς.

➤ Δεξαμενές

Η εταιρία έχει κατασκευάσει μη επανδρωμένα ερπυστιοφόρα ρομπότ που συνδέονται μαγνητικά για επιθεωρήσεις τα δάπεδα και τους τοίχους των δεξαμενών για συντρίμια, διάβρωση, τριβή, ρωγμές, ρήξεις επένδυσης/φλύκταινες και άλλα. Οι ρομποτικές επιθεωρήσεις drone εξαλείφουν την ανάγκη να τεθούν εκτός λειτουργίας οι δεξαμενές διυλιστηρίων πετρελαίου και φυσικού αερίου και χημικών εργοστασίων, εξοικονομώντας τεράστια έξοδα.

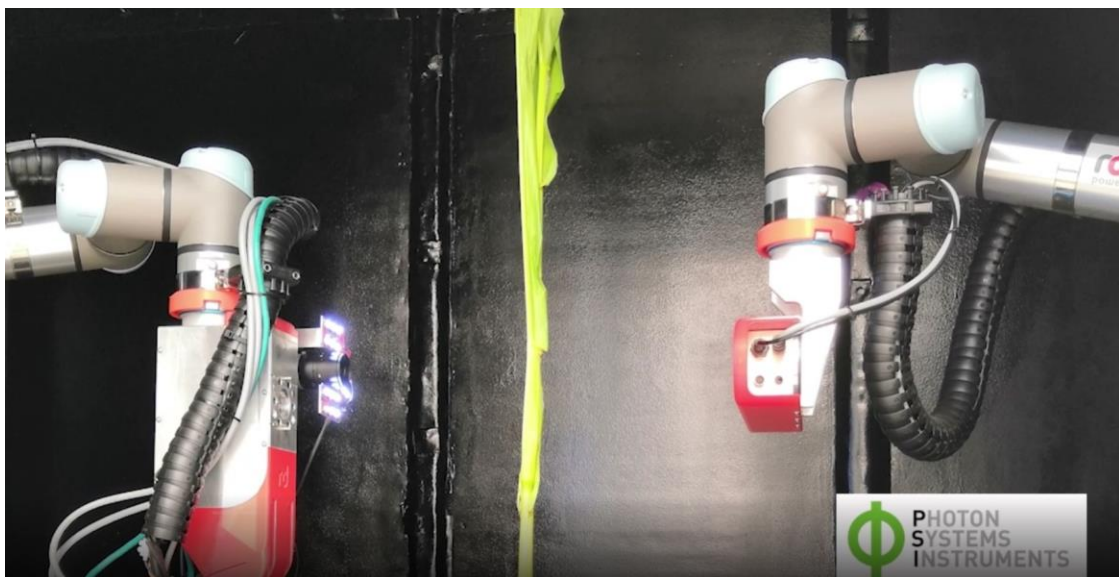
Τα επιφανειακά drones, τα οποία λειτουργούν εξ αποστάσεως και μπορούν να είναι συνδεδεμένα ή ασύρματα, μπορούν να εξοπλιστούν με φωτισμό καθώς και με αισθητήρες

οπτικής και θερμικής απεικόνισης. Οι επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται βάσει του κώδικα API 653*¹ έτσι ώστε οι δεξαμενές να διατηρούνται σε συμμόρφωση με τους κανονισμούς τους.

➤ Σκάφη

Τα δοχεία απαιτούν συχνούς ελέγχους, καθώς η διάβρωση, οι μηχανικές βλάβες και η κόπωση και το ράγισμα μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφική αστοχία. Αυτές οι επιθεωρήσεις γίνονται συχνά με παραδοσιακές μεθόδους οπτικής επιθεώρησης, οι οποίες απαιτούν είσοδο στο σκάφος, με αποτέλεσμα μια περίοδο εκτός λειτουργίας και κινδύνους για το προσωπικό. Οι ανιχνευτές της AETOS επιτρέπουν την ολοκλήρωση των οικονομικών επιθεωρήσεων πιο συχνά, χωρίς την ανάγκη προετοιμασίας της μονάδας για είσοδο προσωπικού. Τα drones παρέχουν μια τροφοδοσία βίντεο για πλοήγηση, μειώνοντας τις επιθεωρήσεις επικίνδυνων περιοχών και περιορισμένου χώρου .

3.3.2 Ραδιογραφία



Εικόνα 3.2 Ρομποτικό σύστημα λήψης ακτινογραφιών RadalyX

Εξαιτίας του κινδύνου στο χειρισμό, η **Ραδιογραφία** είναι επικίνδυνη, εξαιτίας της υψηλής ακτινοβολίας που παράγεται κατά τη μελέτη της. Με τη βοήθεια όμως της ρομποτικής, η εταιρία Radalytica δημιούργησε συστήματα λήψης εικόνων με συσκευές ακτίνων X. ^[6] Το RadalyX είναι ένα σύστημα απεικόνισης ακτίνων X μέτρησης μεμονωμένων σωματιδίων για εικόνες υψηλής ποιότητας με την ευελιξία των συνεργαζόμενων ρομπότ. Τα βασικά μέρη το σαρωτή είναι δύο ρομποτικοί βραχίονες με 6 αρθρώσεις. Ο πρώτος βραχίονας κρατά ένα σωλήνα ακτίνων X ενώ ο δεύτερος κρατάει τον ανιχνευτή απεικόνισης. Το ζεύγος σωλήνα ακτίνων X και ανιχνευτή μπορεί, χάρη στους ρομποτικούς βραχίονες, να κινείται και να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από το αντικείμενο μελέτης. Οι βραχίονες κινούνται συγχρονισμένα, έτσι ώστε η αμοιβαία θέση του σωλήνα ακτίνων X και του ανιχνευτή να παραμένει η ίδια υπό όλες τις συνθήκες. Σε αντίθεση με τις συμβατικές συσκευές, η ενσωμάτωση τεχνολογιών απεικόνισης σε ρομποτικούς βραχίονες έξι αξόνων δίνει στην

απεικόνιση τη δυνατότητα μεγάλης ευελιξίας όσον αφορά το μέγεθος και το σχήμα του δείγματος. Το σύστημα μπορεί να δοκιμάσει προηγμένα σύνθετα υλικά με πολύπλοκες καμπυλότητες χρησιμοποιώντας ανιχνευτές υπερήχων ή/και ακτίνων X.

Πολλές μη καταστροφικές επιθεωρήσεις προϊόντων ήταν προηγουμένως αδιανόητες, καθώς δεν μπορούσε να επιτευχθεί η ανάγκη τήρησης της προκαθορισμένης απόστασης της πηγής ακτίνων X, του ανιχνευτή και του δεδομένου δείγματος μαζί με τη γωνία σάρωσης για πιο σύνθετα σχήματα. Το RadalyX ξεπερνά αυτά τα εμπόδια και, χάρη στο ρομποτικό σύστημα απεικόνισης 2D και 3D (Υπολογιστική Τομογραφία, CT), επιτρέπει την αυτόματη επιθεώρηση ακόμη και για προϊόντα μεγάλων και πολύπλοκων σχημάτων. Τα ρομπότ προσφέρουν επομένως υψηλό βαθμό ευελιξίας στην παρακολούθηση της πολύπλοκης καμπυλότητας και στις δύο πλευρές του επιθεωρημένου αντικειμένου, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα απεικόνισης ακτίνων X, όπου τόσο ο σωλήνας ακτίνων X όσο και ο ανιχνευτής είναι σταθεροί ή έχουν περιορισμένη εμβέλεια κίνησης. Έτσι, τα ρομπότ επιτρέπουν τη σάρωση ενός δείγματος με τη χρήση ακτίνων X από διαφορετική οπτική γωνία για τον εντοπισμό ελαττωμάτων πιο εύκολα, γρήγορα και καλύτερα.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι ότι το σύστημα μπορεί να μετακινηθεί στο αντικείμενο που προορίζεται να επιθεωρηθεί. Αυτό έρχεται σε έντονη αντίθεση με τα κοινά βιομηχανικά συστήματα CT όπου το δείγμα πρέπει να χωράει μέσα. Το σύστημα αυτό μπορεί να λάβει πλήρης απεικόνιση του δείγματος προς μελέτη, άνευ μεγέθους.

3.3.2.1 Εναέρια μη επανδρωμένα της Pacific Imaging

Άλλο παράδειγμα είναι το DroneX (Εικόνα 3.3), κατασκευή της Pacific Imaging. Το DroneX είναι ένα σύστημα μη επανδρωμένου ρομπότ εξοπλισμένο με μια κάμερα ακτίνων X, σταθεροποιημένη σε ένα σύστημα αξόνων. Χρησιμοποιώντας ένα προσαρμοσμένο drone, το σύστημα DroneX χρησιμοποιεί επιτυχώς ένα τοποθετημένο μηχάνημα απεικόνισης ακτίνων X για να επιθεωρήσει με ασφάλεια τα χιτώνια των αγωγών στα καλώδια ρεύματος. Το DroneX αποκτά δεδομένα στον αέρα για πάνω από ένα χρόνο και παράγει ακριβείς και αξιόπιστες εικόνες. Χάρι σε αυτό, το κόστος και ο κίνδυνος που προξενεί η μελέτη ραδιογραφίας σε ανοιχτό περιβάλλον μειώνονται και εξαλείφεται η ανάγκη συμβατικών μέσων, που μέχρι τώρα είναι τα ελικόπτερα και τα φορτηγά με κουβά.



Εικόνα 3.3 DroneX της εταιρίας Pacific Imaging.

3.3.3 Υπέρηχοι



*Εικόνα 3.4
Αυτοματοποιημένη
ρομποτική
επιθεώρηση.*

Το πρόγραμμα Intacom είναι μια σειρά έργων που βασίζονται στην ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων επιθεώρησης που διευθύνεται από το Κέντρο Προηγμένων Μελετών ΜΚΕ της TWI στο Port Talbot της Νότιας Ουαλίας. Ο γενικός στόχος του προγράμματος είναι η μείωση του κόστους επιθεώρησης σύνθετων γεωμετρικών στοιχείων για την αεροδιαστημική βιομηχανία. Οι πρώτες φάσεις του έργου παρέδωσαν ένα πρωτότυπο αυτοματοποιημένο κελί επιθεώρησης χρησιμοποιώντας δύο βραχίονες ρομπότ 6 αξόνων για την επιθεώρηση εξαρτημάτων υψηλής καμπύλης σε ένα κλάσμα του χρόνου που συνήθως απαιτείται από άλλα αυτοματοποιημένα συστήματα NDT. Ενσωμάτωσε ειδικά εξελιγμένη προηγμένη τεχνολογία δοκιμών υπερήχων για την παροχή τρισδιάστατης απεικόνισης εξαρτημάτων που, σε πολλές περιπτώσεις, δεν μπορούσαν να επιθεωρηθούν με κανέναν άλλο τρόπο.

Η τελευταία φάση του έργου ενσωματώνει μια κυψέλη ρομπότ που περιέχει πολύ μεγαλύτερα ρομπότ και πρόσθετους άξονες, όπως πίστες 14 μέτρων και ένα πικάπ 4 μέτρων. Οι συνδυασμένοι άξονες επιτρέπουν στα ρομπότ να επιθεωρούν μεγάλα εξαρτήματα, όπως το σασί του αυτοκινήτου, τα τμήματα των φτερών και τα περιβλήματα των κινητήρων του αεροσκάφους. Κάθε ρομπότ μπορεί να εργαστεί ανεξάρτητα για επιθεωρήσεις παλμικής ηχούς ή σε συνεργασία για επιθεωρήσεις μέσω μετάδοσης. Για τη σύζευξη του υπερήχου με το εξάρτημα, χρησιμοποιούνται πίδακες νερού που εξαλείφουν την ανάγκη επαφής των ρομπότ με το υπό δοκιμή εξάρτημα. Το προηγμένο λογισμικό σχεδιασμού διαδρομής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μονοπατιών σάρωσης και τον έλεγχο για συγκρούσεις, χρησιμοποιώντας μοντέλα CAD για την προσομοίωση του πραγματικού περιβάλλοντος.

Προκειμένου να διατηρηθεί η ακρίβεια θέσης σε μια τόσο μεγάλη περιοχή, και να αντιμετωπιστεί η μεταβλητότητα στο σχήμα μερών και στη θέση εντός της κυψέλης, αναπτύσσεται ένας συνδυασμός συστημάτων μετρολογίας. Οι σαρωτές γραμμής λέιζερ αναπτύσσονται για τη δημιουργία προφίλ επιφάνειας πραγματικών εξαρτημάτων όπου τα δεδομένα CAD δεν είναι διαθέσιμα (όπως για εξαρτήματα παλαιού τύπου) ή δεν ταιριάζουν επαρκώς με το τελικό σχήμα του εξαρτήματος. Ένα σύστημα φωτογραμμετρίας που

χρησιμοποιεί οκτώ αδιάβροχες κάμερες χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της θέσης του ρομπότ και την παρακολούθηση της κίνησης, επιτρέποντας τον εντοπισμό οποιασδήποτε απόκλισης από τις προβλεπόμενες διαδρομές και παρέχοντας την επιλογή προσαρμογών σε πραγματικό χρόνο στις διαδρομές σάρωσης.

3.3.3.1 Ερπυστιοφόρα ρομπότ Eddyfi

Είναι σαφές ότι σε αυτή τη μεταβατική περίοδο, η μετάβαση από την επανδρωμένη στην μη επανδρωμένη επιθεώρηση, σε μια εποχή όπου η τεχνολογία προχωρά τόσο γρήγορα σε όλους τους τομείς της ζωής που αρχίζουμε να ανακαλύπτουμε νέες προκλήσεις.



Εικόνα 3.5 Ρομπότ crawler της Eddyfi.

Εταιρίες όπως η Eddyfi Technologies έχει κατασκευάσει ερπυστιοφόρα ρομπότ για επιθεωρήσεις στο εσωτερικό αγωγών. Ένα παράδειγμα είναι το Inuktun VT150 Vertical Crawler™, το οποίο είναι ένα ρομπότ που χρησιμοποιεί τρεις ισαπέχουσες περιφερειακά εμπλεκόμενες αρματοσιές, διατηρώντας έτσι την κεντρική θέση του ρομπότ εντός του σωλήνα – που το καθιστά το καλύτερο μέρος για τοποθέτηση οποιουδήποτε εξοπλισμού οπτικής επιθεώρησης που προσφέρει την καλύτερη, πιο ανεμπόδιση θέα όταν πλοήγηση και μείωση των επιπτώσεων της αιθάλης ή της αντιστάθμισης έκθεσης. Δεδομένης της ικανότητάς του να διανύει 1.000 μέτρα (3.280 πόδια), να λειτουργεί σε αγωγούς μεταξύ 400 και 800 χιλιοστών (16 έως 31 ίντσες), να χειρίζεται και να τοποθετεί έναν κεφαλή υπερήχων μέσα σε έναν σωλήνα σε διάφορες θέσεις για να επιτρέπει τη σάρωση και να λειτουργεί με περιορισμένο σύνδεσμο, το VT150VC πληρούσε όλες τις προϋποθέσεις του έργου.

Παρόμοια ρομπότ έρχονται και με δυνατότητες μαγνητισμού σε επιφάνειες. Έτσι μπορούν να κατευθύνονται σε κάθετες επιφάνειες που μελετούνται. Τέτοιες επιφάνειες είναι:

- Δεξαμενές αποθήκευσης
- Δοχεία πίεσης
- Περιορισμένοι χώροι
- Θαλάσσια σκάφη
- Υπεράκτιες πλατφόρμες
- Αγωγοί μεγάλης διαμέτρου
- Πύργοι νερού
- Ανεμογεννήτριες

3.3.3.2 Πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών δοκιμών με υπερήχους

Η νέα ρομποτική εγκατάσταση επιθεώρησης προσφέρει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές δοκιμές υπερήχων:

- Κίνηση ανιχνευτή 6 βαθμών ελευθερίας για επιθεώρηση σύνθετων γεωμετρικών τμημάτων
- Προηγμένη απεικόνιση υπερήχων, οπτικοποιημένη σε περιβάλλον 3D και επικάλυψη σε CAD
- Γρήγορες ταχύτητες επιθεώρησης
- Ευέλικτη και προσαρμόσιμη κυψέλη ρομπότ που μπορεί να τροποποιηθεί γρήγορα για να επιθεωρήσει νέα εξαρτήματα
- Σχεδιασμός διαδρομής εκτός σύνδεσης για οπτικοποίηση και αποφυγή σύγκρουσης
- Επαναληψιμότητα έως 0,1 mm
- Δυνατότητα χρήσης ενός αριθμού ανιχνευτών υπερήχων, ανάλογα με την εφαρμογή

3.3.4 Δινορεύματα

Στη μελέτη Δινορευμάτων, η εταιρία εναέριων ρομπότ Voliro έχει κατασκευάσει το μοντέλο T (Εικόνα 3.4) για μελέτες ΜΚΕ στο τομέα της βιομηχανίας. Ένα τέτοιο μη επανδρωμένο ρομπότ έρχεται με επιλογές όχι μόνο για δινορεύματα, αλλά και επιλογές για ελέγχους υπερήχων και εξοπλισμού μέτρησης πάχους με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικού ακουστικού μετατροπέα για ανοχές επιφάνειας και χημικομηχανική διάβρωση. Η τεχνολογία δινορευμάτων παρέχεται ρυθμισμένη για να γίνονται μετρήσεις που ξεπερνάνε μονωτικές στρώσεις.



Εικόνα 3.6 Μοντέλο T Voliro

Το ρομπότ είναι εξοπλισμένο με συστήματα καθοδύγησης και ασφάλειας ώστε να μπορεί είναι κυκλοφορεί πολύ κοντά σε κτίρια μέχρι και σε ζώνες όπου δεν θα μπορούσε άνθρωπος να πατήσει. Αυτό μαζί με την δυνατότητα κινήσεων σε 360 μοίρες το καθιστά ιδανικό για μελέτες σε κυρτές επιφάνειες και το συζευγμένο σύστημα διανυσματικής ώθησης επιτρέπει τη μελέτη (μη)σιδηρομαγνητικών υλικών. Επίσης, χάρη στο σύστημα ώθησης, δεν επηρεάζονται εύκολα από δυνατούς ανέμους και έχουν δυνατότητα αυτοματοποίησης εφαρμογών και πτήσης.

Τέτοια μη επανδρωμένα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές κατασκευές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μέχρι και σε ανεμογεννήτριες, αναιρόντας την ανάγκη για αναρύχιση στην κατασκευή. Έτσι ο χρόνος της διαδικασίας συρρικνώνεται μέχρι και 50 φορές και ο κίνδυνος τραυματισμού προσωπικού σε μεγάλα ύψη εφαιλείφεται εξ-ολοκλήρου. Μέχρι και πυλώνες διανομής ηλεκτρικού ρεύματος μπορούν να μελετηθούν χωρίς να γίνονται διακοπές στη ροή.

Κεφάλαιο 4. Βιβλιογραφία

[1]: “Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι”, Θεόδωρος Ματίκας, Δημήτριος Αγγέλης © Historic Scotland

[2]: <https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray#ProductionROB>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BA%CF%84%CE%AF%CE%BD%CE%B5%CF%82_%CE%A7

[3]: https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray

[4]: <https://www.instadose.com/blog/what-is-scatter-radiation>

[5]: <https://www.aetosgroup.com/>

[6]: <https://www.radalytica.com/en/robotic-imaging-system.html>

[7]: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/robotic-path-planning-for-non-destructive-testing-of-complex-shaped-surfaces>

Πηγές εικόνων και σχημάτων

Εικόνα 1.1 <https://www.metrorod.co.uk/help-and-advice/blogs/how-to-spot-a-cracked-pipe-or-drain-metro-rod-stoke/>

Εικόνα 1.2 <https://karenbemmes.wordpress.com/2012/11/27/the-blessing-of-a-cracked-plate/>

Εικόνα 1.3 <https://pexraytech.com/ndt-applications/>

Εικόνα 1.4

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BA%CF%84%CE%AF%CE%BD%CE%B5%CF%82_%CE%A7

Εικόνα 1.5 <https://www.protothema.gr/environment/article/1130882/astronomoi-kategrapsan-ti-megaluteri-ekrivi-aktinon-gamma-sto-suban-deite-to-video/>

Εικόνα 1.6

https://science.fandom.com/el/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%91%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1

Εικόνα 1.7 <https://www.customsigns.com/warning-radiation-hazard-aluminum-sign>

Εικόνα 1.8 <https://www.europeanbusinessreview.com/what-are-advantages-and-limitations-of-ultrasonic-testing/>

Εικόνα 1.9 <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/calculator/sound-frequency-wavelength/>

Σχήμα 1.4 https://www.researchgate.net/figure/The-two-main-types-of-bulk-acoustic-waves-a-The-thickness-shear-mode-illustrating_fig3_27539830

Σχήμα 1.5 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rayleigh_wave.jpg

Εικόνα 1.10 https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current

Σχήματα 1.6 – 1.18 -Κεφάλαιο 6: Δινορεύματα ‘Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι’ Θεόδωρος Ματίκας, Δημήτριος Αγγέλης

Εικόνα 1.11 <https://www.olympus-ims.com/en/ec-flaw/>, <https://www.qualitymag.com/articles/94623-digital-transformation-and-iot-comes-to-eddy-current-testing>

Εικόνα 1.12 <https://slideplayer.com/slide/5663028/>

Εικόνα 1.13 <https://www.eddycurrentprobe.com/>

Σχήμα 1.1α <https://www.innovo.us/piercing-info> , <https://www.hsinda-powdercoating.com/sale-11672291-thermosetting-epoxy-polyester-powder-coating-paint-for-spraying-metal-surface.html>

Εικόνα 1.14 <https://ircengg.com/liquid-penetrant-testing/>

Εικόνα 1.15 <https://www.tcsndt.com.au/magnetic-particle-inspection>

Εικόνα 2.1 <https://isac.gr/industrial-robotic-arms/>

Εικόνα 2.2 <https://en.huazhongcnc.com/industrial-robots/welding-robotic-arm/rjh605e-arc-and-spot-welding-robot/>

Εικόνα 2.3 <https://www.ief.de/produkte/komponenten/linearantriebe/mehrachskombinationen/anwendungsbeispiele/>

Εικόνες 2.4 – 2.5 <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/137/%CE%A3%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/1.INTRODUCTION.pdf>

Εικόνα 2.6 <https://howtorobot.com/expert-insight/scara-robots>

Εικόνα 2.7 <https://www.therobotreport.com/igus-delta-robot-cost-effective-assembly/>

Εικόνα 3.1 <https://www.uavos.com/uavos-fixed-wing-uav-sitaria-completed-flight-tests/>

Εικόνα 3.2 <https://www.aetosgroup.com/#land>

Εικόνα 3.3 <https://www.radalytica.com/en/robotic-imaging-system.html>

Εικόνα 3.4 <https://ndtsupply.com/radiography-x-ray/dr-digital-radiography/pacific-imaging/pacific-ndt-solution-dronex/>

Εικόνα 3.5 <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/robotic-automated-inspection>

Εικόνα 3.6 <https://www.eddyfi.com/en/product/robotics-for-nondestructive-testing>

Εικόνα 3.7 <https://ospreyintegrity.com/aerial-non-destructive-testing/>