



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ

Τεχνικές μετρήσεων για τη δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων με εφαρμογές στη βιομηχανία

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΠΑΤΖΟΓΙΑΝΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ [Α.Μ. 7517007]

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΕΛΠΙΝΙΚΗ

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια και τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν πολλές διαφορετικές τεχνολογίες μετρήσεων. Πλέον, οι τεχνικές μετρήσεων για τη δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων αποτελούν ένα ουσιαστικό εργαλείο για τους βιομηχανικούς παραγωγούς που χρειάζονται ακριβή επιθεώρηση διαστάσεων, εικονική εικόνα, ανάλυση και ακόμη και φυσική κατασκευή πρωτοτύπων. Συνεπώς, παρουσιάζουν τεράστιες δυνατότητες για χρήση σε βιομηχανικούς τομείς, αφού μπορούν να καλύψουν διάφορες προκλήσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις τεχνικές μετρήσεων για τη δημιουργία τρισδιάστατων (3D) δεδομένων, οι οποίες εφαρμόζονται στην δημιουργία και αναγνώριση δεδομένων βιομηχανικών γεωμετριών. Ταυτόχρονα, αναλύεται η τρέχουσα κατάσταση της έρευνας για τον εντοπισμό συγκεκριμένων μεθόδων ανίχνευσης δειγμάτων πολύ γρήγορα, με υψηλή ακρίβεια και χωρίς καμία απτική φυσική επαφή με την επιφάνεια του αντικειμένου. Από αυτή την άποψη, οι συγκεκριμένες τεχνικές αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για πολλές εφαρμογές στις μεγάλες τάσεις όπως η Βιομηχανία 4.0. Το ενδιαφέρον για την δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων μετατοπίζεται για τη διασφάλιση ποιότητας στη βιομηχανική παραγωγή και στην ψηφιοποίηση του πραγματικού κόσμου για τη διευκόλυνση της ακριβούς ψηφιακής αναπαράστασης ενός αντικειμένου ή ενός περιβάλλοντος για τεκμηρίωση ή ως δεδομένα εισόδου. Συνεπώς, πραγματοποιείται η μελέτη των διαθέσιμων μεθόδων για την τρισδιάστατη δημιουργία δεδομένων, του σκοπού της χρήσης των μεθόδων, των τεχνικών πραγματοποίησης τους, του είδους της βιομηχανίας στις οποίες γίνεται η χρήση τους αλλά και των αποτελεσμάτων τους συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η βιβλιογραφική αναζήτηση που έλαβε χώρα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Λέξεις – κλειδιά: τεχνικές μέτρησης, τρισδιάστατα δεδομένα, εφαρμογές, βιομηχανικά δεδομένα, Βιομηχανία 4.0

Abstract

In recent years and decades, many different measurement technologies have been developed. Now, measurement techniques to create 3D data are an essential tool for industrial producers who need accurate dimensional inspection, virtual imaging, analysis and even physical prototyping. Therefore, they present enormous potential for use in industrial sectors, since they can cover various challenges. However, these techniques struggle with complex background textures, noise, and differences in application conditions.

This thesis investigates the measurement techniques for the creation of three-dimensional (3D) data, which are applied to the creation and recognition of industrial geometry data. At the same time, the current state of research is analyzed to identify specific methods of detecting samples very quickly, with high accuracy and without any tactile physical contact with the surface of the object. From this point of view, the specific techniques are a prerequisite for many applications in major trends such as Industry 4.0. Interest in 3D data generation is shifting to quality assurance in industrial production and real-world digitization to facilitate accurate digital representation of an object or environment for documentation or as input data. Therefore, the study of the available methods for the three-dimensional data creation, the purpose of using the methods, the techniques of their realization, the type of industry in which they are used and also their results compared to other methods is carried out. Finally, the conclusions and the bibliographic search that took place for the preparation of this diploma thesis are presented.

Keywords: measurement techniques, 3D data, applications, industrial data, Industry 4.0

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
1. Εισαγωγή	4
2. Θεωρητικό μέρος.....	8
2.1. Βιομηχανία 4.0.....	8
2.2. Μέθοδοι τρισδιάστατης μέτρησης επιφανειών	11
3. Τεχνικές δημιουργίας τρισδιάστατων δεδομένων	18
3.1. Laser Holographic Interferometer (LHI)	18
3.2. Digital Holographic Interferometer (DHI).....	20
3.3. Coordinate Measuring Machines (CMM).....	22
3.4. Confocal Laser Microscopy (CLM).....	24
4. Συμπεράσματα.....	25
Βιβλιογραφία	27

1. Εισαγωγή

Κατά την παραγωγική διαδικασία, εξαιτίας των ελλείψεων και της περιορισμένης αποδοτικότητας της παρούσας τεχνολογίας, των συνθηκών εργασίας καθώς και άλλων παραγόντων, η ποιότητα των μορφοποιημένων προϊόντων συχνά αποκλίνει από την επιθυμητή. Ανάμεσα των άλλων χαρακτηριστικών της ποιότητας των προϊόντων, σημαντικά είναι τα ελαττώματα της επιφάνειας του παραγόμενου αντικειμένου. Κατά συνέπεια, για να εξασφαλιστούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ποιότητας που έχουν οριστεί για το προϊόν, είναι απαραίτητη η δυνατότητα αναγνώρισης των σφαλμάτων επιφάνειας τους. Ως ελάττωμα, ορίζονται γενικά οι ατέλειες σε περιοχές της επιφάνειας του προϊόντος συγκριτικά με το αρχικό δείγμα αναφοράς.

Η αναγνώριση σφαλμάτων επιφάνειας, αναφέρεται στην αναγνώριση αλλαγής χρώματος, ρωγμών, αλλαγής στιλπνότητας και κρατήρων στην περιοχή που ελέγχεται, ώστε να αποκτηθεί ένα σύνολο σχετικών πληροφοριών, όπως η κατηγορία, η τοποθεσία, το είδος των ελαττωμάτων επιφάνειας που ανιχνεύθηκαν στο συγκεκριμένο προϊόν που ελέγχεται. Μέχρι σήμερα ο παραδοσιακός τρόπος αναγνώρισης σφαλμάτων και ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος ήταν η χειροκίνητη αναγνώριση από παρατηρήσεις εργατών, ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι αναποτελεσματική, επειδή διαφορετικοί παράγοντες, όπως η υποκειμενικότητα των αποφάσεων των εργατών και η πιθανές λανθασμένες αποφάσεις λόγω κούρασης ή άλλων παραγόντων, καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο μη αποδοτική και αναποτελεσματική για αναγνώριση σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο. Για τους παραπάνω λόγους, η καθιερωμένη μέθοδος σταδιακά αντικαθίσταται από άλλες μεθόδους.

Σήμερα, έχουν ξεκινήσει αρκετές έρευνες αναφορικά με την αναγνώριση σφαλμάτων επιφάνειας σε τρισδιάστατα αντικείμενα, με την έρευνα στον τομέα να αποκτά συνεχώς και περισσότερο ενδιαφέρον. Σε πληθώρα δημοσιεύσεων, αναφέρονται οι τελευταίες πιο σύγχρονες μέθοδοι, εφαρμογές, σημεία ενδιαφέροντος καθώς και άλλα δεδομένα, αναφορικά με τις διαδικασίες αναγνώρισης σφαλμάτων επιφανειών από τρισδιάστατα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Συνοπτικά, μη καταστροφικές δοκιμές

προϊόντων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό, όπως για παράδειγμα επιθεώρηση με μαγνητικά σωματίδια (magnetic particle inspection), επιθεώρηση δινορρευμάτων (eddy current inspection), επιθεώρηση με υπερήχους (ultrasonic inspection), μηχανική όραση (machine vision), και βαθιά μηχανική μάθηση (deep learning). Πολλές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όμως για να προκύψει μια σωστή αναπαράσταση του προφίλ της επιφάνειας ενός προϊόντος. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η χρήση κάμερας που λαμβάνει φωτογραφίες της επιφάνειας. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις διαφέρουν κυρίως στον τρόπο φωτισμού. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση αισθητήρων στο σύνολο της επιφάνειας για να μπορεί να αναλυθεί ολόκληρη η επιφάνειά του.

Οι παραδοσιακές τεχνικές λαμβάνουν μια δισδιάστατη φωτογραφία της επιφάνειας με χρήση λευκού φωτός. Οι εικόνες που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την αναγνώριση σφαλμάτων βασισμένη στο χρώμα των πίξελ της εικόνας (Xie, 2008), της υφής, (S. Jain, 2020) ή του σχήματος του αντικειμένου (W. Yu, 2020). Αυτές οι τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση μη ογκομετρικών ελαττωμάτων όπως δυσχρωμίες, που σε περίπτωση μεταλλικών αντικειμένων, είναι δυνατό να προκύπτουν από εσωτερικά ελαττώματα ή αλλαγή του υλικού. Παρόλα αυτά, οι προσεγγίσεις αυτές δεν δίνουν πολύ αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Έτσι, τέτοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται απλώς για να δείξουν και να προτείνουν περιοχές του τμήματος του αντικειμένου που θα πρέπει να ελεγχθούν με άλλα συστήματα που δίνουν πιο λεπτομερή αποτελέσματα, πριν γίνει απόρριψη ή αποδοχή του προϊόντος.

Στις περισσότερες τεχνικές ελέγχου αντικειμένων που επικεντρώνονται στα ογκομετρικά ελαττώματα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί τρισδιάστατη αναπαράσταση των αντικειμένων. Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι που δημιουργούν τρισδιάστατες αναπαραστάσεις αντικειμένων, η φωτομετρική στερεογραφία (photometric stereo), και η αναπαραγωγή τρισδιάστατου προφίλ με χρήση laser (3D laser profiling). Οι τεχνικές φωτομετρικής στερεογραφίας χρησιμοποιούν αρκετές πηγές φωτός με τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλούν σκιές σε περίπτωση ύπαρξης ενός ελαττώματος όγκου. Όταν η θέση της πηγής φωτός, της κάμερας και του αντικειμένου είναι γνωστά, το βάθος ή το ύψος του ελαττώματος στον όγκο του αντικειμένου μπορεί να αναγνωρισθεί με απλές γεωμετρικές αναλύσεις. Μία από αυτές τις τεχνικές ονομάζεται shape from shadow (σχήμα από σκιά), και περιλαμβάνει την διαδικασία

γνωστή ως Spectral Image Differentiation Procedure (B. Li, 2018). Αυτή η τεχνική δημιουργεί εικόνες οι οποίες ελέγχονται από έναν αλγόριθμο που αναλύει τις αλλαγές στο χρώμα του αντικειμένου ελέγχου (Z. Zhang, 2020).

Όλες αυτές οι τεχνικές βασίζονται στη χρήση πηγών λευκού φωτός, οι οποίες μπορούν να επηρεαστούν κατά πολύ από της συνθήκες του περιβάλλοντος καθώς και από τις ταλαντώσεις του συστήματος, αφού η απόλυτη θέση του αντικειμένου είναι πολύ σημαντική για την λειτουργία του αλγορίθμου. Ενώ αυτές οι μέθοδοι μπορούν να βρουν ελαττώματα στον όγκο των αντικειμένων, δεν έχουν τόσο μεγάλη ακρίβεια. Όπως αναφέρεται από τους Z. Zhang και συνεργάτες (2020), κάποιες τεχνικές όπως η Spectral Image Differentiation Procedure μπορούν να ανακαλύπτουν αλλαγές στην επιφάνεια από το ένα σκανάρισμα στο επόμενο αλλά αυτά δεν μπορούν να συγκριθούν με το ζητούμενο σχήμα του προϊόντος (Z. Zhang, 2020).

Τα συστήματα τρισδιάστατου προφίλ βασίζονται σε ζεύγη κάμερα με λέιζερ τα οποία λαμβάνουν προφίλ ως διατομές του τεμαχίου. Αυτά τα προφίλ αποτελούνται από σημεία τα οποία λέγονται νέφη σημείων, τα οποία ορίζουν την επιφάνεια του αντικειμένου σε μία περιοχή. Συνδυάζοντας τα διάφορα προφίλ σε όλες τις περιοχές προκύπτει μία αναπαραγωγή του αντικειμένου σε τρισδιάστατο χώρο. Σημαντικό είναι να τονιστεί πως ο φωτισμός δεν επηρεάζει τη συγκεκριμένη τεχνική διότι οι κάμερες λαμβάνουν και επηρεάζονται μόνο από το μήκος κύματος του λέιζερ που χρησιμοποιείται. Σε αρκετές εφαρμογές, η τεχνική χρησιμοποιείται στις κατασκευαστικές βιομηχανίες για να κατασκευαστεί μία πλήρη αναπαράσταση του αντικειμένου χρησιμοποιώντας ρομποτικά χέρια, ή χρησιμοποιώντας κίνηση των ζευγών κάμερας-λέιζερ η του αντικειμένου για να γίνει αναπαράσταση όλου του όγκου του.

Γενικά, η χρήση αυτών των τεχνικών γίνεται για τη μέτρηση μεγεθών όπως ο όγκος ή η τραχύτητα του αντικειμένου. Αφού έχει παραχθεί η επιφάνεια του αντικειμένου, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις στην ανάλυσή της ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί: πρώτων μπορεί να γίνει σύγκριση της επιφάνειας του τελικού αντικειμένου με του επιθυμητού αντικειμένου ή να συγκριθεί κάθε ένα προφίλ με μία τομή του τελικού αντικειμένου με του επιθυμητού αντικειμένου. Αφού γίνει η σύγκριση, γίνεται ο υπολογισμός των διαφορών μεταξύ των προφίλ του αντικειμένου με το επιθυμητό σχήμα (C. Tastimur, 2016).

Αφού γίνει η λήψη της επιφάνειας του αντικειμένου, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για την επεξεργασία των τελικών εικόνων: οι παραδοσιακές τεχνικές ανάλυσης εικόνων ή χρήση ανεπτυγμένων αλγορίθμων όπως των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Κατά τη συνήθη πρακτική, οι εικόνες επεξεργάζονται κάνοντας χρήση διαφόρων τεχνικών μηχανικής όρασης (computer vision) οι οποίες βασίζονται στο να βρίσκουν ανωμαλίες ή επιθυμητά σχήματα και μετά φιλτράροντας τις περιοχές βασισμένες σε χαρακτηριστικά όπως διαστάσεις, υφή της επιφάνειας και άλλα. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί γνώση και των εικόνων αλλά και των αλγορίθμων ανάλυσης των εικόνων. Μια άλλη προσέγγιση κάνοντας χρήση τεχνητής νοημοσύνης είναι επίσης αρκετά ενδιαφέρουσα και χρησιμοποιείται κατά κόρον στη βιομηχανική πρακτική. Ταυτόχρονα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές νέες μέθοδοι για την κατηγοριοποίηση και την αναγνώριση σφαλμάτων σε επιφάνειες βιομηχανικών εξαρτημάτων.

Η μηχανική όραση χρησιμοποιείται κατά κόρον σε διαδικασίες αναγνώρισης σφαλμάτων σε επιφάνειες εξαρτημάτων. Συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθείται μπορεί να διακριθεί σε συγκεκριμένες κατηγορίες: Η λήψη της εικόνας επιφάνειας, η αναγνώριση των σφαλμάτων επιφάνειας και η κατηγοριοποίησή τους. Εξαιτίας των γρήγορων, με μεγάλη ακρίβεια και με μικρό κόστος αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι μία αρκετά θελκτική διαδικασία για τις βιομηχανίες. Η κατηγοριοποίηση των σφαλμάτων της επιφάνειας με αυτή τη διαδικασία γίνεται με βάση του χρώματος, της υφής και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων. Ωστόσο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ποιότητα της εικόνας και από τον αλγόριθμο που κάνει την επεξεργασία και τις διαδικασίες της αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης.

Παρόλο που οι κλασικές μέθοδοι αναγνώρισης είναι αρκετά απλές, συνήθως εξαρτώνται και απαιτούν ανθρώπινη παρουσία για τη σωστή λειτουργία τους. Αυτό δεν είναι απαραίτητο κατά τη διαδικασία της μηχανικής όρασης με χρήση αλγορίθμων βαθιάς μάθησης, επομένως οι τεχνολογίες αυτές καθίστανται αρκετά θελκτικές για τις βιομηχανικές μεθόδους διασφάλισης ποιότητας.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των τεχνικών μετρήσεων για τη δημιουργία 3D δεδομένων σε συνδυασμό με τη χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές, μέσω της μελέτης των διαθέσιμων μεθόδων για

τριδιάστατα δεδομένα, του σκοπού της χρήσης αυτών των τεχνικών, του είδους της βιομηχανίας στις οποίες γίνεται η χρήση τους αλλά και των αποτελεσμάτων τους συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Συνεπώς, αυτή η διπλωματική προσπαθεί να δώσει μια εννοιολογική επισκόπηση σχετικά με την εξέλιξη μιας ευρείας ποικιλίας αρχών μέτρησης 3D δεδομένων που εξελίχθηκαν και απέκτησαν κάποια σημασία για 3D βιομηχανικές εφαρμογές και των σχετικών τεχνολογικών δυνατοτήτων τους.

2. Θεωρητικό μέρος

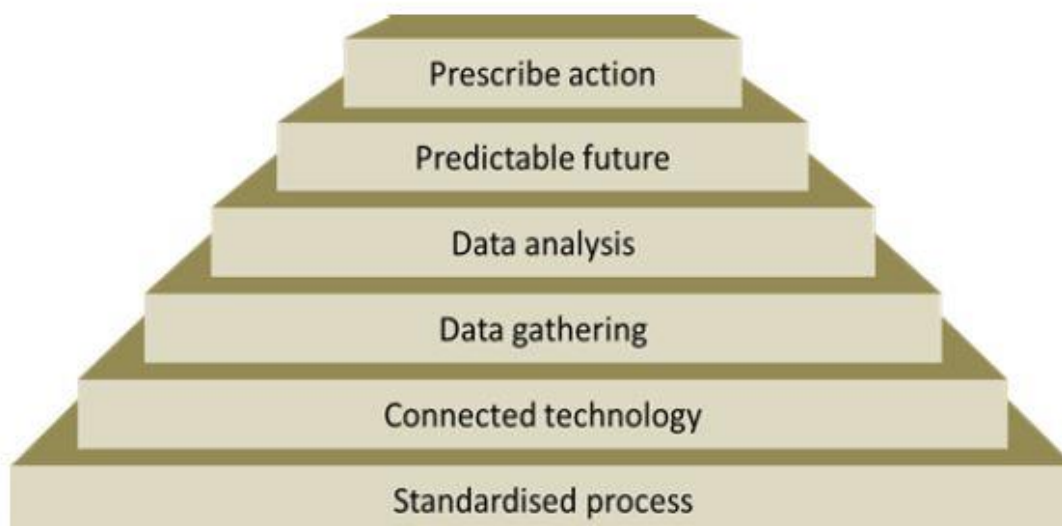
2.1. Βιομηχανία 4.0

Από την αρχή της βιομηχανικής παραγωγής μέχρι τη σημερινή περίοδο, η ανάπτυξη της τεχνολογίας ήταν πάνω και πέρα από τα προσδοκώμενα. Όλες οι βιομηχανικές επαναστάσεις είχαν ως κύριο δεδομένο τις μεγάλες αλλαγές στη παραγωγική διαδικασία, η οποία συνεχώς γινόταν με πιο εξελιγμένα, σύγχρονα και αποδοτικά τεχνολογικά μέσα. Στη σημερινή εποχή, είμαστε μάρτυρες της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης, η οποία ονομάζεται Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0) κατά την οποία η κύρια στόχευση είναι στο να συνδεθούν όλα τα τμήματα και οι διεργασίες στη παραγωγική διαδικασία μεταξύ τους (Michael Rüssmann, 2015).

Το όραμα και η στόχευση της βιομηχανίας 4.0 είναι να συνδεθούν όλες οι διεργασίες της παραγωγικής διαδικασίας σε ένα ενωμένο δίκτυο, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη διαδικασιών όπως το «έξυπνο εργοστάσιο» (Smart factory) και το «Φυσικό σύστημα στον κυβερνοχώρο» (Cyber Physical System) (P. Lacy, 2015). Σε τέτοια συστήματα, η παραγωγική διαδικασία ρυθμίζεται με τη χρήση συγκεκριμένων μέσων (agent), οι οποίοι αναλόγως τις ανάγκες της διεργασίας δίνουν τις ανάλογες εντολές για τη ρύθμιση της παραγωγής. Με την χρήση συγκεκριμένων αισθητήρων, τα μέσα αυτά λαμβάνουν ως είσοδο τις μετρήσεις τους, αναλύουν την κατάσταση με βάση συγκεκριμένων αλγορίθμων και τις αρχιτεκτονικής του συστήματος και έπειτα δρουν και ρυθμίζουν τη διεργασία αναλόγως (P. Lacy, 2015).

Εκτός από την παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιείται επίσης και η αρχιτεκτονική δρομολογούμενη από τα γεγονότα (event driven architecture). Με βάση τις παραπάνω διαδικασίες, προκύπτει η αύξηση της αποδοτικότητας των διεργασιών παραγωγής,

αύξηση του ρυθμού παραγωγής προϊόντων καθώς και μείωση του ποσοστού απόρριψης των προϊόντων, δηλαδή αύξηση της ποιότητας και των κερδών της παραγωγικής διαδικασίας. Σε συστήματα όπου η αρχιτεκτονική είναι δρομολογούμενη από τα γεγονότα, υπάρχουν αρκετά μέσα τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν ώστε να βρεθεί η βέλτιστη απόκριση ανάλογα με τις συγκεκριμένες εισόδους που προέρχονται από τους πολυάριθμους αισθητήρες. Σύμφωνα με τον Schwab (2016), η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση εξελίσσεται με επιταχυνόμενο ρυθμό και οι τεχνικές γνώσεις θα παίζουν σημαντικό ρόλο στην εργασία στον βιομηχανικό τομέα (Schwab, 2016). Συγκεκριμένα, θα αναπτυχθούν μεγάλες διαφορές μεταξύ των ανθρώπων που είναι τεχνικά καταρτισμένοι και μη, ωστόσο η βιομηχανία 4.0 θα οδηγήσει σε αύξηση του επιπέδου ζωής. Αυτό θα φέρει μία συνολική αλλαγή στην αγορά εργασίας στον βιομηχανικό τομέα, όπου θα έχουν μεγάλη ζήτηση τεχνικά καταρτισμένοι εργαζόμενοι, και μικρή ζήτηση οι ανειδίκευτοι εργάτες. Τα έξυπνα εργοστάσια επομένως είναι αποτέλεσμα της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης και περιλαμβάνουν τη σύνδεση των συστημάτων παραγωγής σε ένα δίκτυο ώστε να γίνονται όλες οι εργασίες αποδοτικότερα (Schwab, 2016). Στην εικόνα 1 απεικονίζονται τα επίπεδα ψηφιοποίησης σε έξυπνα εργοστάσια παραγωγής, τα οποία είναι η τυποποιημένη διαδικασία, η συνδεδεμένη τεχνολογία, η συλλογή δεδομένων, η ανάλυση δεδομένων, το προβλέψιμο μέλλον και η προβλέψιμη δράση. Αυτά αποτελούν τα βασικά στοιχεία στα οποία στηρίζεται η αυτοματοποίηση των διεργασιών. Συγκεκριμένα, η φιλοσοφία του συστήματος παραγωγής με βάση αυτά τα επίπεδα ψηφιοποίησης δηλώνει ότι ένα εργοστάσιο πρέπει πάντα να εργάζεται με συνεχείς βελτιώσεις του συστήματος παραγωγής για να το κάνει πιο αποτελεσματικό και αποδοτικό. Έτσι, στο πλαίσιο της προσπάθειάς του εργοστασίου για συνεχή βελτίωση, πρέπει να αναλαμβάνονται διάφορες πρωτοβουλίες στον τομέα της ψηφιοποίησης (Εικόνα 1) που αφορούν την τυποποίηση, τη συνδεδεμένη τεχνολογία και τη συλλογή δεδομένων και έπειτα να στοχεύουν τα υψηλότερα επίπεδα της πυραμίδας που είναι η ανάλυση και η πρόβλεψη για δράση και υλοποίηση (Jelena Milisavljevic-Syed, 2020).



Εικόνα 1. Επίπεδα ψηφιοποίησης στην έξυπνη παραγωγή (Jelena Milisavljevic-Syed, 2020).

Για την ψηφιοποίηση των διαδικασιών παραγωγής των έξυπνων εργοστασίων, απαιτείται η δημιουργία τυποποιημένων διαδικασιών οι οποίες αποτελούν ακόμη τον ακρογωνιαίο λίθο της παραγωγικής διαδικασίας. Η συνδεδεμένη τεχνολογία με την παραγωγική διαδικασία και οι αισθητήρες δίνουν τα απαραίτητα δεδομένα που χαρακτηρίζουν την παραγωγή, τα δεδομένα συγκεντρώνονται και έπειτα αναλύονται σε επόμενο στάδιο. Ανάλογα με τα δεδομένα που εισάγονται στο σύστημα και της διαδικασίας ανάλυσής τους, προβλέπονται οι αποκρίσεις του συστήματος και ο τρόπος που θα επιφέρει τον βέλτιστο έλεγχό τους. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο βέλτιστος έλεγχος των διεργασιών, η προσαρμογή με τον βέλτιστο τρόπο σε μία πληθώρα διαφορετικών περιπτώσεων λειτουργίας και προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία του. Έτσι, μπορούν να προβλεφθούν και να αποτραπούν συγκεκριμένες καταστάσεις, και αυτό είναι το βασικό χαρακτηριστικό της έξυπνης βιομηχανίας. Ακόμα ένα θετικό των παραπάνω διεργασιών είναι η χρήση λιγότερης ενέργειας για τη λειτουργία των διεργασιών και η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας. Με βάση τα παραπάνω, τα χαρακτηριστικά των έξυπνων εργοστασίων, μπορούν να περιγραφούν στα παρακάτω (F. Shrouf, 2014):

- Απομακρυσμένη παρακολούθηση.
- Προληπτική συντήρηση.
- Ευκολία στην προσαρμογή σε νέα δεδομένα.
- Μαζική προσαρμογή.
- Έξυπνη διαχείριση ενέργειας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση αυτοματοποιημένων τεχνικών για την ανίχνευση ελαττωμάτων στις επιφάνειες αντικειμένων και προϊόντων είναι ένα σημαντικό κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας.

2.2. Μέθοδοι τρισδιάστατης μέτρησης επιφανειών

Γενικά, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη μέτρηση και απεικόνιση επιφανειών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις κατηγορίες που το όργανο μέτρησης έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο που σαρώνεται και σε κατηγορίες που το όργανο μέτρησης δεν έρχεται σε επαφή με το προς σάρωση αντικείμενο. Το σύνολο των μεθόδων καθώς και κάποιων χαρακτηριστικών που διέπουν τις διαδικασίες εμφανίζεται στην εικόνα 2.

Measurement System Type	Contact	Non-Contact
Ultimate resolution	Atomic scale	Diffraction limit
Measurement data size	Small	Large
Measurement speed	Low	High
Measurement noise	Low	Relatively high
Maintenance cost	High	Low
Damage during measurement	Possible damage	No damage
Representative technologies	CMM, AFM	CLM, LHI, SLS

Εικόνα 2. Σύγκριση των μεθόδων με ή χωρίς επαφή για τρισδιάστατες μετρήσεις (Yuhang Yang, 2021).

Συνήθως, τα συστήματα που δεν περιλαμβάνουν την επαφή με το αντικείμενο, κατέχουν ένα όργανο το οποίο κινείται και συμπεριλαμβάνει κάποιους αισθητήρες, οι οποίοι αναγνωρίζουν την επαφή και έχουν μηχανική επαφή με το αντικείμενο. Οι αισθητήρες αναγνωρίζουν την επαφή και στέλνουν ανάλογα σήματα σε επεξεργαστή, ο οποίος στη συνέχεια συνθέτει την εικόνα του αντικειμένου. Η μηχανική επαφή όμως μπορεί να επιφέρει μη ανεκτά αποτελέσματα όπως εκούσια καταστροφή του αντικειμένου κατά τη σάρωση, λόγω της επαφής, και χρησιμοποιείτε μόνο σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η μέθοδος αυτή εκτός των

παραπάνω, μπορεί να επιφέρει και σημαντικά οικονομικά προβλήματα, λόγω του μεγάλου κόστους αντικατάστασης και συντήρησης των οργάνων μέτρησης, και των αντικειμένων προς σάρωση σε περίπτωση καταστροφής τους. Συνεπώς, εξαιτίας των παραπάνω προβλημάτων αλλά και των πλεονεκτημάτων των εφαρμογών αναγνώρισης τρισδιάστατων επιφανειών χωρίς να υπάρχει επαφή μεταξύ των αντικειμένων, έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται συχνά η μέθοδος απεικόνισης επιφάνειας χωρίς επαφή.

Η μηχανή τύπου CMM (Coordinate Measuring Machines) είναι αναγνωρισμένη ως η πρώτη τρισδιάστατη μέθοδος απεικόνισης επιφανειών (M. R. Dury, 2015). Η συγκεκριμένη μέθοδος χαρακτηρίζεται ως μέθοδος απεικόνισης με επαφή, αφού η αναγνώριση του αντικειμένου γίνεται με βάση την επαφή ενός οργάνου και του αντικειμένου προς σάρωση. Τέτοιες μηχανές υψηλής ακριβείας μπορούν να εκτελέσουν μετρήσεις της τάξεως των νανομέτρων. Μεταξύ άλλων, οι εφαρμογές της συγκεκριμένης τεχνικής μπορούν να γίνουν για μετρήσεις των διαστατολογικών χαρακτηριστικών προϊόντων που παράχθηκαν με τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς και για πληθώρα άλλων εφαρμογών που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως για παράδειγμα την μέτρηση των επιφανειακών χαρακτηριστικών μετάλλων που παράχθηκαν για χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία (V. M. R. Santos, 2019).

Η τεχνική AFM (Atomic Force Microscope) είναι μία διαδικασία μικροσκοπίας για να δοθούν τοπογραφικές εικόνες σε ατομικό επίπεδο του αντικειμένου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με επαφή και χωρίς επαφή. Στην πρώτη τεχνική, μία εξαιρετικά μικρή τοποθεσία επαφής είναι συνδεδεμένη με ένα υποστήριγμα και υπάρχει πραγματική επαφή του οργάνου με το αντικείμενο για να επιτευχθεί η σάρωση. Στη δεύτερη τεχνική, το υποστήριγμα ταλαντώνεται στην ιδιοσυχνότητα του με μήκος κύματος μερικά μικρόμετρα, και η κορυφή του υποστηρίγματος δεν έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο. Η τοπογραφία της επιφάνειας μπορεί να μετρηθεί με τον μηχανικό συντονισμό του αντικειμένου. Παρόλο που μπορεί να γίνει και χωρίς ουσιαστική επαφή, πολλές φορές η συγκεκριμένη διαδικασία θεωρείται ότι γίνεται με επαφή. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι μια από τις λίγες τεχνικές που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση επιφανειών σε τάξη κλασμάτων ενός νανομέτρου, κάτι που είναι πολύ μικρότερο από το όριο περίθλασης των οπτικών συστημάτων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την τοπογραφία επιφανειών σε παραγωγικές διαδικασίες της τάξης των νανομέτρων και σε νανοτεχνολογικές εφαρμογές. Ένα ακόμα

πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαδικασίας, είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις επιφανειών για πληθώρα εφαρμογές όπως για παράδειγμα σε πολυμερή, κεραμικά και βιολογικά δείγματα.

Η τεχνική CLM (Confocal Laser Microscopy), σε αντίθεση με άλλες τεχνικές οπτικής απεικόνισης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για συνθήκες ακόμα και μετά το όριο περίθλασης. Η τεχνική αυτή μετρά το κάθε αντικείμενο χρησιμοποιώντας κάθετη σάρωση και υπολογίζει την κορυφή της έντασης για κάθε διαφορετικό πίκσελ. Κορυφές με υψηλή ένταση δημιουργούνται από περιοχές που βρίσκονται ακριβώς μέσα στο εστιακό επίπεδο. Αυτό το χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης εφαρμογής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθεί υψηλή αξονική ανάλυση της απεικόνισης καθώς και ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο στην τελική μέτρηση. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει την υψηλότερη ανάλυση μεταξύ των τεχνικών οπτικής απεικόνισης, και για τον λόγο αυτό είναι μία καλή επιλογή για εφαρμογές που χρειάζονται υψηλή ακρίβεια, και έχουν μία σχετική επιφάνεια προς σάρωση. Χρησιμοποιείται συχνά για την ανάλυση επιφανειών σε νάνο και μικρο επίπεδο, όπως για παράδειγμα η ανάλυση της επίπτωσης διαφόρων κατεργασιών στην τοπογραφία της επιφάνειας των αντικειμένων και η ανάλυση της τρισδιάστατης γεωμετρίας του τελικού προϊόντος από τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Η τεχνική LHI (Laser Holographic Interferometer) είναι μια τεχνική δύο σταδίων που συνδυάζει την συμβολομετρία με χρήση λέιζερ και την ολογραφία. Στη διαδικασία αυτή, ένα ψηφιακό ολογραφικό μοτίβο παρεμβολής δημιουργείται, και χωρίζεται σε μία δέσμη αναφοράς και μία δέσμη μέτρησης και στη συνέχεια οι δύο διαφορετικές δέσμες που γυρνούν από το αντικείμενο προς σάρωση συνδυάζονται και καταγράφονται ταυτόχρονα. Το καταγεγραμμένο ολόγραμμα περιέχει και το πλάτος αλλά και τη φάση της δέσμης που γυρνά, και η επιφάνεια του αντικειμένου μπορεί να αναπαρασταθεί βασισμένο σε αυτό το ολόγραμμα. Επειδή η τεχνική LHI βασίζεται στη μέτρηση της αλλαγής φάσης, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα κάθετη ανάλυση σε τάξη μερικών εκατοντάδων νανομέτρων και πλευρική ανάλυση σε τάξη μικρομέτρων. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα αποδοτική στο να αποτυπώνει αντικείμενα σε μικροκλίμακα και για αυτό είναι αρκετά χρήσιμη στη βιομηχανία παραγωγής ημιαγωγών για την αναγνώριση ελαττωμάτων κατά την παραγωγή τους (De Nicola, Ferraro, & Finizio, 2004).

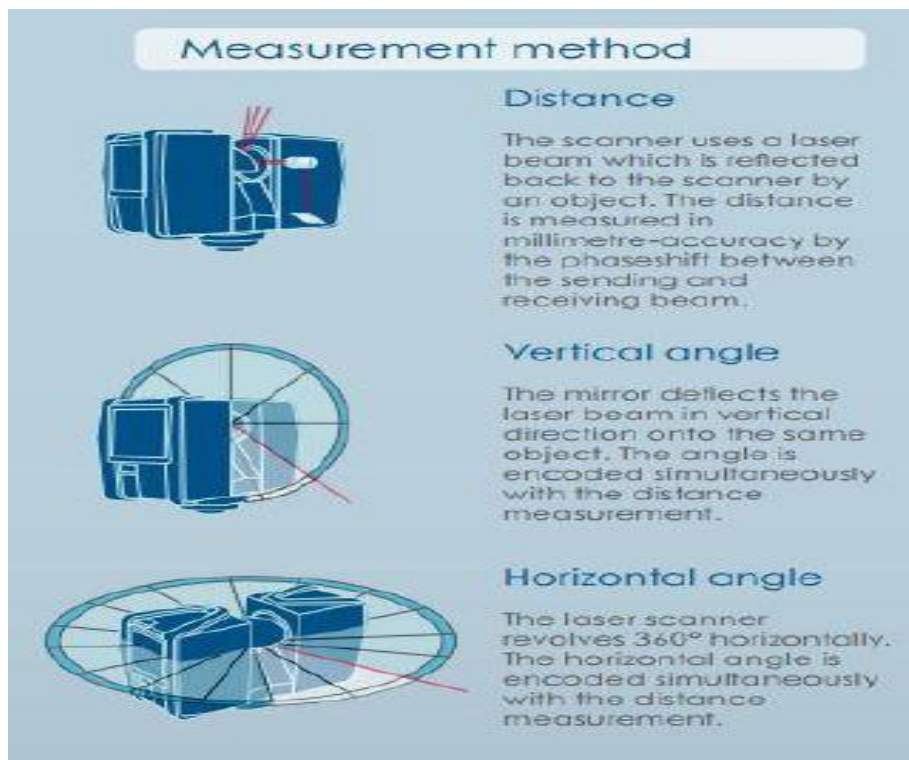
Η τεχνική SLS (Structured Light Scanner) προβάλλει μοτίβα φωτός σε συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας και είναι σχετικά παρόμοια με την τεχνική LHI. Κατά την μέτρηση με την τεχνική SLS, διάφορα μοτίβα φωτός εκπέμπονται και στη συνέχεια αναλύονται εκτενώς για να προκύψουν οι πληροφορίες για την επιφάνεια. Η τεχνική αυτή έχει μεγάλη ταχύτητα μέτρησης και τελευταία χρησιμοποιείται πολύ σε εφαρμογές που η γρήγορη σάρωση αντικειμένων είναι το επιθυμητό και όχι τόσο η μεγάλη ακρίβεια. Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παρακολούθηση και σάρωση των αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, σε κάθε μία από τις παραπάνω τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την σάρωση τρισδιάστατων αντικειμένων είναι απαραίτητη η ανάλυση των μετρήσεων τους με στατιστικά στοιχεία για να βρεθούν τυχόν εσφαλμένα ή αλλοιωμένα δεδομένα.

Η συσκευή σάρωσης αντικειμένων με λέιζερ είναι μία συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει τα χωρικά δεδομένα γύρω από μία συγκεκριμένη περιοχή, τα οποία κατασκευάζουν μία εικονική αναπαράσταση των αντικειμένων μαζί με τα δεδομένα τοποθεσίας και της αντίστοιχης γεωμετρίας τους. Μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι η σάρωση με λέιζερ, η οποία χρησιμοποιεί το LiDAR (Light detection and ranging), η οποία είναι μία τεχνολογία στην οποία η συσκευή εκπέμπει ακτίνες λέιζερ σε αντικείμενα στο πεδίο που μπορεί να λειτουργήσει και μετρά την απόσταση βασιζόμενη στην επιστροφή της ακτίνας λέιζερ. Με αυτή τη διαδικασία οι τρισδιάστατοι σαρωτές λέιζερ συλλέγουν χωρικά δεδομένα των αντικειμένων που ερευνούνται και έπειτα τα δεδομένα αυτά, που συνήθως είναι εκατομμύρια σημεία στον χώρο, συντάσσονται μέσω αλγορίθμων μεταξύ τους και δημιουργείτε ένα νέφος σημείων (Point cloud) (Howard J. Klein, 2012).

Η μέτρηση της απόστασης συνήθως γίνεται με διαφορετικούς τρόπους, κυρίως εκ των οποίων είναι η μέτρηση του χρόνου, στον οποίο η ακτινοβολία θα επιστρέψει, και η αλλαγή της φάσης του εκπεμπόμενου φωτός. Στη δεύτερη μέθοδο, γίνεται μέτρηση της αλλαγής της φάσης των ακτινοβολιών. Η μεγάλη ακρίβεια της μεθόδους μέτρησης αλλαγής φάσης σε μικρές αποστάσεις αλλά και η πυκνότητα του πλήθους νέφους σημείων που προκύπτει με τη χρήση της, την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε

σάρωση αντικειμένων που βρίσκονται σε απόσταση λιγότερη των 100 μέτρων (Mathieu Dassot, 2011). Στην Εικόνα 3 απεικονίζεται η διαδικασία μέτρησης απόστασης με χρήση συγκεκριμένων συσκευών. Όπως είναι άμεσα αντιληπτό από την εικόνα, ο σαρωτής μπορεί να περιστραφεί κατά 360 μοίρες στον οριζόντιο και 320 στον κάθετο άξονα, γεγονός που του επιτρέπει ολόκληρο τον χώρο γύρω από τον σαρωτή. Μπορεί, ανάλογα με το αντικείμενο προς σάρωση, να κάνει μία ή και περισσότερες σαρώσεις και να προκύψει με συγκεκριμένες μεθόδους το νέφος σημείων του αντικειμένου. Έτσι, με τη διαδικασία αυτή προκύπτει το νέφος σημείων που αντιπροσωπεύει το αντικείμενο, το οποίο μπορεί να συγκριθεί με το νέφος σημείων αναφοράς του ιδανικού αντικειμένου και να γίνει σύγκριση ώστε να ταυτοποιηθούν πιθανά ελαττώματα στην επιφάνειά του (Mathieu Dassot, 2011).



Εικόνα 3. FARO FOCUS μέθοδος μέτρησης απόστασης.

Το νέφος σημείων είναι ένα τρισδιάστατο σετ δεδομένων που περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες των σημείων του αντικειμένου. Τα νέφη σημείων μπορούν να περιλαμβάνουν και δεδομένα χρώματος, αλλά και δεδομένα πυκνότητας σημείων. Βασισμένα σε τρισδιάστατα δεδομένα, οι προσεγγίσεις των μεθόδων μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται συχνά για την αναγνώριση σφαλμάτων.

Αφού γίνει η παραγωγή του νέφους των σημείων από τη χρήση ενός LiDAR πρέπει να γίνει η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν, για να λάβει χώρα η ανάλυση των αντικειμένων και η ανίχνευση κάποιου ελαττώματος της επιφάνειάς του. Μία πολύ χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η χρήση τεχνικών εποπτευόμενης μηχανικής μάθησης. Η χρήση βαθέων νευρωνικών δικτύων σε συνδυασμό με τεχνικές εποπτευόμενης βαθιάς μηχανικής μάθησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνευθούν τρισδιάστατα αντικείμενα από νέφη σημείων. Έτσι, η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε επιφάνειες. Ακόμη, η χρήση του PointNet, ενός συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (Convolutional Neural Network, CNN), χρησιμοποιείται συχνά για την ανάλυση τρισδιάστατων αντικειμένων από νέφη σημείων (Charles R. Qi, 2017). Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τρία διαφορετικά στάδια: το στάδιο της ταξινόμησης (Classification), της τμηματοποίησης των εξειδικευμένων μερών (part segmentation) και σημασιολογικής κατάτμησης (semantic segmentation). Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του PointNet είναι η καλή συμπεριφορά και αντιμετώπιση είτε λανθασμένων είτε χαμένων σημείων στο νέφος σημείων που προκύπτει.

Σύμφωνα με (M. Narollahi, 2019), η χρήση LiDAR με ταυτόχρονη χρήση νευρωνικών δικτύων έγινε για την ανίχνευση σφαλμάτων σε επιφάνεια από σκυρόδεμα. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι ανίχνευσης σφαλμάτων, η χρήση LiDAR και ανάλυση του νέφους σημείων με CNN όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, και η χρήση της μεθόδου ανάλυσης γεωμετρίας. Η χρήση αυτής τη μεθόδου, μετά από έντονη ερευνητική δραστηριότητα, χρησιμοποιείται συνήθως για την ανίχνευση της αλλαγής του όγκου σε συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας για να ανιχνευθούν τα ελαττώματα. Η χρήση όμως των νευρωνικών δικτύων που είναι ένα τμήμα της γενικότερης επιστήμης της τεχνητής νοημοσύνης γίνεται συνεχώς και ποιο χρήσιμη σε παρόμοιες εφαρμογές (M. Narollahi, 2019).

Η τεχνητή νοημοσύνη είναι μία διαδικασία η οποία μπορεί να δώσει σε υπολογιστικά συστήματα την δυνατότητα να «μαθαίνουν» από δεδομένα που λαμβάνουν χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένο πρόγραμμα για τη μηχανική μάθηση. Στους αλγόριθμους βαθιάς μάθησης, πρώτα τα δεδομένα χωρίζονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες δεδομένων, το μεγαλύτερο τμήμα χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της μάθησης, και τα επόμενα χρησιμοποιούνται για την επικύρωση και για τις δοκιμές. Τα

συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN) αποτελούν μία τάξη βαθέων νευρωνικών δικτύων τα οποία είναι εμπνευσμένα από βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν μεταξύ των νευρώνων. Ένα δίκτυο CNN περιλαμβάνει στρώματα εισαγωγής, συνέλιξης, υποδειγματοληψίας (subsampling) και εξόδου. Χρησιμοποιώντας φίλτρα με διαφορετικούς συντελεστές, οι νευρώνες του συστήματος τεχνητής νοημοσύνης βγάζουν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, όπως προσόψεις, ακμές και άλλα, από το νέφος των σημείων (M. Narollahi, 2019).

Οι βασικές προσεγγίσεις των CNN μεθόδων για ανάλυση νέφους σημείων, μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις διαφορετικές μεθόδους. Συγκεκριμένα, οι προσεγγίσεις αυτές είναι η βασιζόμενη στα πίξελ μέθοδος (pixel based method), η μέθοδος βασιζόμενη στα βόξελ εικονομετρικών ογκοστοιχείων (Voxel based method) και η μέθοδος βασιζόμενη σε τρισδιάστατα στοιχεία. Στις μεθόδους με χρήση των πίξελ, τρισδιάστατα δεδομένα μετατρέπονται σε δισδιάστατη απεικόνιση (Hang Su, 2015). Στη μέθοδο που είναι βασισμένη στα ογκομετρικά εικονοστοιχεία, απλώς χρησιμοποιούνται τα τρισδιάστατα δεδομένα για την παραγωγή των βόξελ.

Όσον αφορά την τελευταία μέθοδο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα CNN και να εφαρμοστεί αλγόριθμος τρισδιάστατης αναγνώρισης για την ανίχνευση σφαλμάτων σε τρισδιάστατες επιφάνειες. Συνήθως, γίνεται χρήση των τρισδιάστατων δεδομένων για την παραγωγή των βόξελ, αφού αυτή η τεχνική είναι η πλέον διαδεδομένη, αλλά τα δεδομένα τις περισσότερες φορές συνήθως έχουν κάποιες ασάφειες. Για τον λόγο αυτό, η χρήση των τρισδιάστατων δεδομένων και μηχανικής μάθησης για την ανάλυσή τους είναι μία πιο αποδοτική διαδικασία. Σύμφωνα με την έρευνα των (Charles R. Qi, 2017), έγινε συστηματική χρήση LiDAR και τεχνητής νοημοσύνης για την επεξεργασία των νεφών δεδομένων που προέκυψαν από τη χρήση της τεχνολογίας λείζερ. Τα αποτελέσματα συγκριτικά με άλλες μεθόδους είναι σημαντικά, με τη χρήση παραπάνω μεθόδων ταξινόμησης να είναι δυνατό να προκύψουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

3. Τεχνικές δημιουργίας τρισδιάστατων δεδομένων

3.1. Laser Holographic Interferometer (LHI)

Οι τεχνικές μέτρησης φάσης έχουν εφαρμοστεί σε ένα ολογραφικό συμβολόμετρο λέιζερ διπλής πλάκας (LHI). Η ολογραφική συμβολομετρία μπορεί να είναι ένα διαγνωστικό εργαλείο με υψηλή ανάλυση, υψηλή ακρίβεια και με γρήγορη ανάκτηση δεδομένων (W. J. Yanta, 1989). Η ολογραφία είναι μια διαδικασία δύο σταδίων, εγγραφής ενός μετώπου κύματος και στη συνέχεια ανακατασκευής του κύματος. Ενώ η ολογραφία χρησιμοποιείται συχνά για τη λήψη όμορφων τρισδιάστατων εικόνων, ωστόσο υπάρχουν αρκετές μηχανικές εφαρμογές, η πιο συνηθισμένη και σημαντική είναι η ολογραφική μη καταστροφική δοκιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με ολογραφική συμβολομετρία, όπου η συμβολομετρία πραγματοποιείται με ολογραφικά παραγόμενα μέτωπα κύματος. Συγκεκριμένα, ένα μοτίβο κηλίδων δημιουργείται όταν ένα αντικείμενο με μία τραχιά επιφάνεια φωτίζεται με μια εξαιρετικά συνεκτική πηγή φωτός, όπως είναι το λέιζερ. Αρχικά θεωρήθηκε ότι ο θόρυβος των κηλίδων ήταν ένα τεράστιο σύνολο ολογράφων, ώσπου έγινε αντιληπτό ότι αυτά τα στίγματα μεταφέρουν πληροφορίες για την επιφάνεια που παράγουν (Varun Kumar, 2016).

Σχετικά με την LHI στον τομέα της βιομηχανικής μετρολογίας, η τρισδιάστατη μη καταστροφική απεικόνιση ανακλαστικών μεταλλικών επιφανειών είναι ένα λεπτό ζήτημα. Στη μελέτη των (Neelam Barak, 2022), προτείνεται μια νέα εφαρμογή ενός ηλεκτρικά συντονιζόμενου φακού (ETL) στην ψηφιακή ολογραφία για την απεικόνιση αντικειμένων που αντανακλούν κατοπτρικά. Το ακριβές προφίλ επιφάνειας του μικροσκοπικού ύψους βήματος σε διαφορετικά αξονικά βάρη λαμβάνεται με συντονισμό του υγρού φακού σε διαφορετικά ρεύματα. Αρχικά, η εστιακή απόσταση του ETL ρυθμίζεται μέσω της ρύθμισης του ρεύματος ελέγχου του, για να απεικονίσει την κατοπτρική ανάκλαση που παρατηρείται από την επιφάνεια του ανακλώμενου δείγματος. Το ρεύμα του ETL ρυθμίζεται ανάλογα

καθώς το δείγμα μετακινείται σε διαφορετικές θέσεις z. Προκειμένου να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης ρύθμισης, το αντικείμενο διατηρείται σε πολλαπλές αξονικές αποστάσεις εντός του βάθους πεδίου του ETL. Σύμφωνα με την παρούσα μελέτη, λαμβάνει χώρα η πραγματοποίηση μετρήσεων ύψους βήματος και υπολογίζεται μια αβεβαιότητα μέτρησης $0,083\mu\text{m}$ για μετρήσεις ύψους βήματος σε διαφορετικές αξονικές θέσεις που κυμαίνονται από 2cm έως 21cm . Το αξονικό εύρος της ρύθμισης επικυρώνεται διατηρώντας δύο κατοπτρικά αντανакλαστικά δείγματα στο οπτικό πεδίο του ETL. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του ETL σε ένα ψηφιακό ολογραφικό σύστημα για την ακριβή απεικόνιση αντικειμένων που ανακλούν κατοπτρικά σε πολλαπλά αξονικά βάθη. Η ρύθμιση είναι χρήσιμη για ακριβείς μετρήσεις ύψους βημάτων και για τη λήψη προφίλ επιφανειών μικροδομών (Neelam Barak, 2022).

Επίσης, η μέθοδος LHI μπορεί να ενεργοποιηθεί μέσω της ανάπτυξης της μεθόδους καταχώρισης ολογράμματος, για τη μέτρηση αντικειμένων μεγαλύτερων από το Field of view (FOV). Συνεπώς, υπάρχουν δύο παραδείγματα που χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις για εφαρμογή στην αξιολόγηση της ακρίβειας της μεθόδου καταχώρισης ολογράμματος. Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί μια μέτρηση αντικειμένου που είναι μικρό και χωράει στο FOV. Το αντικείμενο μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μέσω δημιουργίας μιας τυπικής μέτρησης ύψους $hs(x, y)$. Στη συνέχεια, το ίδιο αντικείμενο μετράται δύο φορές σε δύο πλευρές με επικαλυπτόμενη περιοχή ενδιάμεσα. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στον υπολογισμό της καταγεγραμμένης μέτρησης ύψους $hm(x, y)$. Η ακρίβεια της εγγραφής της μεθόδου ποσοτικοποιείται συγκρίνοντας το $hs(x, y)$ με το $hm(x, y)$. Η άλλη προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα αντικείμενο μέτρησης μεγαλύτερο από το FOV. Η CMM μέτρηση ολόκληρου του αντικειμένου χρησιμοποιείται ως τυπική μέτρηση $hs(x, y)$ και συγκρίνεται με την καταχωρημένη μέτρηση $hm(x, y)$ (Huang, 2006).

3.2. Digital Holographic Interferometer (DHI)

Η μελέτη της ροής θερμότητας και μεταφοράς θερμότητας από βιομηχανικά θερμαινόμενα αντικείμενα όπως καλώδια, κύλινδροι, αγωγοί και ψύκτρες εμπλέκεται σε πολλές επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η γνώση της θερμοκρασίας επιφάνειας και του προφίλ θερμοκρασίας κάθετα προς την επιφάνεια των θερμαινόμενων αντικειμένων αναζητείται για τις μετρήσεις των παραμέτρων μεταφοράς θερμότητας, όπως οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και η ροή θερμότητας (Naylor, 2003). Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι η προσεκτική χρήση οπτικών μεθόδων οδηγεί σε πιο ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις.

Στο παρελθόν, οι περισσότερες από τις μελέτες θερμοκρασίας και μεταφοράς θερμότητας, όπως φυσική συναγωγή, εξαναγκασμένες συναγωγές, ροή θερμότητας σε υγρά και αέρια από θερμαινόμενα αντικείμενα όπως κύλινδροι, κάθετες πλάκες, οριζόντιες πλάκες, πλάκες με πτερύγια, συμπαγή κανάλια, τσιπ μικροεπεξεργαστή, αυλακώσεις καναλιών, επιφάνειες θέρμανσης προς τα κάτω, κατακόρυφες επιφάνειες με ραβδώσεις και οριζόντιοι κύλινδροι, πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας κλασική συμβολομετρία. Στην κλασική συμβολομετρία ανήκουν τα συμβολόμετρα Mach-Zehnder Interferometry (MZI), Michelson Interferometry (MI) και η ολογραφική συμβολομετρία (HI) (M. Goharkhah, 2009; S. Fatehi, 2011; V. Sajith, 2012).

Το MI και το MZI χρησιμοποιήθηκαν από τους (D. Haridas, 2015), για τη μέτρηση της εξαναγκασμένης συναγωγής σε συμπαγή κανάλια. Σε αυτή τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι το MI παρέχει μεγαλύτερο αριθμό κροσσών (σημείων δεδομένων) στα πεδία θερμοκρασίας σε σύγκριση με το MZI, επομένως το MI είναι μια καλύτερη μέθοδος μέτρησης πεδίου θερμοκρασίας σε συμπαγή κανάλια (D. Haridas, 2015). Το MI είναι πιο ευαίσθητο στην αλλαγή θερμοκρασίας από το MZI, αλλά το MI δεν είναι καλό για τη μελέτη δυναμικών και ταχέως μεταβαλλόμενων φαινομένων, καθώς το φως πρέπει να διανύσει το πεδίο δοκιμής- τομής-αντικειμένου δύο φορές.

Όσον αφορά το HI, κατέχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την κλασική συμβολομετρία. Το HI δεν απαιτεί οπτικά εξαρτήματα υψηλής ποιότητας σε

σύγκριση με την κλασική συμβολομετρία, επειδή στο HI, αξιολογείται μόνο η σχετική αλλαγή φάσης των μετώπων κύματος αντικειμένων. Αυτό οδηγεί σε μειωμένο κόστος του ολογραφικού παρεμβολομετρικού εξοπλισμού. Ακόμη, το HI παρέχει το κύριο πλεονέκτημα της μεγαλύτερης πειραματικής και τεχνικής απλότητας. Έτσι, ο χρόνος που απαιτείται για τη ρύθμιση του εξοπλισμού και τη λήψη μετρήσεων μειώνεται επίσης σημαντικά.

Στην ψηφιακή ολογραφία (DH), τα ολογράμματα καταγράφονται σε ψηφιοποιημένη μορφή χρησιμοποιώντας αισθητήρες CCD ή CMOS και το πολύπλοκο πλάτος του μετώπου κύματος αντικειμένου από το εγγεγραμμένο ψηφιακό ολόγραμμα ανακατασκευάζεται με αριθμητικές μεθόδους χρησιμοποιώντας υπολογιστές (U. Schnars, 2002). Έτσι, η ακριβής ποσοτική ανακατασκευή και αξιολόγηση του πλάτους και της φάσης ενός αντικειμένου κυματομετώπου από ένα μόνο ψηφιακό ολόγραμμα είναι δυνατή στο DH χρησιμοποιώντας μεθόδους αριθμητικής ανακατασκευής. Στο DHΙ διπλής έκθεσης, καταγράφονται δύο ψηφιακά ολογράμματα, ένα σε κατάσταση περιβάλλοντος-αναφοράς του αντικειμένου και άλλο σε αλλαγμένη κατάσταση αντικειμένων. Η φάση παρεμβολής υπολογίζεται απευθείας από δύο ψηφιακά ολογράμματα αφαιρώντας την αριθμητικά ανακατασκευασμένη φάση του ολογράμματος αναφοράς από τη φάση του ολογράμματος αντικειμένου χωρίς να πραγματοποιηθεί καμία συμβολομετρία μετατόπισης φάσης. Έτσι, δεν απαιτούνται επιπλέον προσπάθειες στο DHΙ για την ανακατασκευή της φάσης παρεμβολής. Επίσης στο DH, ο ρυθμός απόκτησης δεδομένων είναι επίσης υψηλός επειδή με τη χρήση αισθητήρα CCD και CMOS, τα σήματα είναι διαθέσιμα σε βίντεο συχνότητες. Ο ρυθμός απόκτησης δεδομένων στο DH περιορίζεται μόνο από τον ρυθμό του αισθητήρα CCD και CMOS εγγραφής. Ο ρυθμός ανακατασκευής είναι επίσης υψηλός, περίπου 1 Hz, και μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση γρήγορων υπολογιστών και αποτελεσματικών αλγορίθμων ανακατασκευής (K. Jeong, 2010).

Ως εκ τούτου, οι διαδικασίες μέτρησης γίνονται ταχύτερες, αξιόπιστες και μάλιστα σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Η ευαισθησία της φωτογραφικής πλάκας είναι περίπου 105 φωτόνια/ μm^2 , ενώ η ευαισθησία της CCD μπορεί να είναι περίπου με 1 φωτόνιο/ μm^2 . Αυτό οδηγεί σε μεγάλη μείωση του χρόνου έκθεσης καθώς και σε απλούστερες απαιτήσεις σχετικά με τη σταθερότητα της πειραματικής ρύθμισης έναντι εξωτερικών κραδασμών και διαταραχών. Αυτές οι παράμετροι κάνουν το

σύστημα απλό, αξιόπιστο, στιβαρό, πιο ακριβές και πιο κατάλληλο για βιομηχανικό περιβάλλον. Ενώ, στα συμβατικά HI, η χρονοβόρα και κουραστική διαδικασία ανάπτυξης των υλικών εγγραφής καθιστά δύσκολη τη χρήση του HI σε βιομηχανικό περιβάλλον (X. Yu, 2014).

Στο παρελθόν, το DHI έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για πολλές εφαρμογές όπως η μέτρηση της θερμοκρασίας, η μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια θερμαινόμενων αντικειμένων, η μέτρηση του συντελεστή διάχυση, ανάλυση πεδίου ροής, παρατήρηση αποσύνθεσης αργού πετρελαίου κάτω από υγρό διασποράς, δείκτης διάθλασης υγρών, αγωγιμότητα θερμότητας σε γυαλί, διακύμανση συγκέντρωσης διαλύματος στη διαδικασία κρυστάλλωσης πρωτεϊνών, απεικόνιση θερμικών βαθμίδων σε βολβό και θερμοκρασία του ανθρώπινου δέρματος. Ωστόσο, η χρήση του DHI σε διαμόρφωση μετασχηματισμού Fourier χωρίς φακό (LLFT) παρουσιάζεται για τη διερεύνηση της κατανομής θερμοκρασίας και των παραμέτρων μεταφοράς θερμότητας, όπως ο φυσικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και η τοπική ροή θερμότητας γύρω από την επιφάνεια βιομηχανικών θερμαινόμενων αντικειμένων, όπως κυλινδρικά σύρματα και ψύκτρες.

3.3. Coordinate Measuring Machines (CMM)

Μέσω της ανάπτυξης μεθόδου προσομοίωσης αντικειμένων με τρισδιάστατη σάρωση, με μικρό αριθμό σημείων, επιτυγχάνεται παράλληλα ορισμένη επιτρεπόμενη απόκλιση στις μετρήσεις. Έτσι, έχουν παρουσιαστεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα για την αναπαράσταση ελεύθερων επιφανειών. Οι περισσότεροι υπάρχοντες αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν κυρίως για στενή προσέγγιση των επιμέρους επιφανειών και στη συνέχεια για ομαλή σύνδεση με τη βοήθεια NURBS (Non-Uniform Rational B-splines). Επίσης αναπτύχθηκαν γενετικοί αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση της διαδρομής μέτρησης CMM. Τα CMM δεν παρέχουν σαφείς πληροφορίες για τις μετρούμενες επιφάνειες και ο τεράστιος όγκος των σημείων δεδομένων από τα ληφθέντα αποτελέσματα είναι αρκετά χρονοβόρα για επεξεργασία (Mansour, 2014).

Παρακάτω παρουσιάζονται προσεγγίσεις βασικών μοντέλων CMM:

- (1) Αυτοματοποιημένη ακολουθία ρύθμισης σημείων που θα μετρηθούν, κατηγοριοποιώντας τα δεδομένα επαλήθευσης χρησιμοποιώντας αποστάσεις και γωνίες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο NUBS (κυβικό μη ομοιόμορφο B-spline) προσαρμοσμένο σε λείες επιφάνειες. Εκτός από τα σημεία αναφοράς, οι παράμετροι των καμπυλών και των επιφανειών NUBS αποτυγχάνουν να υποδείξουν σημεία – κόμβους που μπορούν να μετατρέψουν άμεσα μετρημένα σημεία σε ομαλές καμπύλες και επιφάνειες, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργία με τη μορφή τοπικού ελέγχου.
- (2) Ανάπτυξη αυτοματοποιημένων σημείων μέτρησης ελέγχου διεργασίας των επιφανειών, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για την προσαρμογή ικανοποιητικών σημείων σε επιφάνειες NURBS και συμπαγή μοντέλα.

Για τη βελτιστοποίηση της διαδρομής μέτρησης στο CMM, χρησιμοποιούνται ομοιόμορφα γενετικοί αλγόριθμοι (Mansour, 2014).

Συνεπώς, το CMM είναι ένα βασικό συστατικό στις σύγχρονες βιομηχανίες, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τις φυσικές διαστάσεις των εξαρτημάτων και των προϊόντων. Το CMM διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη έξυπνων εργοστασίων και έξυπνης κατασκευής και παρέχει ακριβείς μετρήσεις απαραίτητες για την αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία ενός έξυπνου εργοστασίου. Τα δεδομένα που παράγονται από το CMM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας και ακρίβειας της διαδικασίας παραγωγής. Για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό περιοχών όπου μπορούν να γίνουν βελτιώσεις στον σχεδιασμό των εξαρτημάτων ή στην ίδια τη διαδικασία κατασκευής. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη απόδοση και μείωση των απορριμμάτων, συμβάλλοντας στην αύξηση της συνολικής ανταγωνιστικότητας του κατασκευαστή. Επιπλέον, τα δεδομένα που παράγονται από το CMM μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας, παρέχοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη διαθεσιμότητα των ανταλλακτικών και το χρονοδιάγραμμα παραγωγής τους. Αυτό βοηθά στην ελαχιστοποίηση των διαταραχών στην αλυσίδα εφοδιασμού και διασφαλίζει ότι η διαδικασία παραγωγής εκτελείται ομαλά και αποτελεσματικά. Ακόμη, το CMM μπορεί να ενσωματωθεί στο συνολικό σύστημα έξυπνης κατασκευής, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της

παραγωγικής διαδικασίας, επιτρέποντας στους κατασκευαστές να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν γρήγορα τυχόν προβλήματα που προκύπτουν, μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας και αυξάνοντας την παραγωγικότητα (S. Hammad Mian, 2014).

Ειδικότερα, τα CMM εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας παρέχουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης πολύ απαιτητικών μετρήσεων με ακρίβεια μικρότερου του μικρού. Αυτά χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η μηχανολογία και όπου πρέπει να μετρηθούν ειδικές γεωμετρίες με τη μέγιστη ακρίβεια. Κάθε CMM εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας μπορεί να εξοπλιστεί με μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών για την ικανοποίηση μεμονωμένων απαιτήσεων. Οι διαφορετικοί απτικοί και οπτικοί αισθητήρες, η ταυτόχρονη σάρωση 4 αξόνων και μια εκτεταμένη γκάμα επιλογών λογισμικού με δυνατότητα ατομικής διαμόρφωσης είναι μόνο η αρχή των δυνατοτήτων των συστημάτων (S. Hammad Mian, 2014).

3.4. Confocal Laser Microscopy (CLM)

Το CLM παρέχει το συνεστιακό πλεονέκτημα. Η τρισδιάστατη παρατήρηση και μέτρηση είναι μια πραγματικότητα με ομοεστιακή μικροσκοπία. Βασικά πλεονεκτήματα της CLM είναι η μεγαλύτερη μεγέθυνση. Αυτό το είδος ισχύος επιτρέπει μετρήσεις κλίμακας νανομέτρων που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις ύψους βήματος και ογκομετρικές μετρήσεις. Πολλά βιομηχανικά εξαρτήματα απαιτούν επίσης ανάλυση τραχύτητας επιφάνειας υλικών σε αυτήν την κλίμακα (Siller, 2020).

Συνεπώς, η τρισδιάστατη ανακατασκευή των χαρακτηριστικών της επιφάνειας μεθόδων CLM αποτελεί μια πραγματικότητα με την ομοεστιακή τεχνολογία. Με την αλλαγή της εστίασης του μικροσκοπίου, μπορούν να ληφθούν εικόνες σε διαφορετικά βάθη. Κάθε εικόνα ονομάζεται z-section και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή ενός τρισδιάστατου χάρτη μιας επιφάνειας. Το μικροσκόπιο με CLM μπορεί να διαθέτει δύο οπτικά συστήματα, έγχρωμη απεικόνιση και συνεστιακό λέιζερ, που του επιτρέπουν να αποκτά πληροφορίες χρώματος και σχήματος καθώς και εικόνες υψηλής ανάλυσης. Ακόμη, ένα όφελος είναι η δημιουργία και η αποθήκευση πολλών δεδομένων γρήγορα. Για παράδειγμα, αφού ολοκληρωθεί μια

αρχική σάρωση και συγκεντρωθούν και υποβληθούν τα απαιτούμενα δεδομένα, συχνά προκύπτουν περαιτέρω ερωτήματα, όπως είναι για το εύρος της αρχικής σάρωσης και για την ψηφιακή αναδιαμόρφωση των αποθηκευμένων δεδομένων. Εν ολίγοις, η τεχνολογία ομοεστιακού μικροσκοπίου σάρωσης λέιζερ προσφέρει μια λύση όλα σε ένα για μη καταστροφικές τρισδιάστατες μετρήσεις χρωμάτων (Siller, 2020).

Επιπρόσθετα, η μέθοδος CLM προσφέρει μείωση της διακύμανσης των μετρήσεων. Ακόμη, προσφέρει επαναληψιμότητα και αξιοπιστία στο πρόγραμμα ποιοτικού ελέγχου. Ένα τέτοιο μικροσκόπιο περιλαμβάνει δύο χαρακτηριστικά, μέγιστη απόδοση με ελάχιστη απόκλιση. Σύμφωνα με δύο μελέτες, των (Alkmal, 2013) και των (P. J. Boltryk, 2008), συγκρίθηκε η ακρίβεια μέτρησης και οι δυνατότητες του τριγωνισμού των αισθητήρων λέιζερ (TL) και αισθητήρων συνεστιακού λέιζερ (CL), που δείχνουν ότι οι αισθητήρες CL είναι οι πιο αποτελεσματικοί, αξιόπιστοι και ακριβείς αισθητήρες για εφαρμογές μέτρησης προφίλ.

4. Συμπεράσματα

Η ζήτηση για ακριβή μέτρηση του τρισδιάστατου (3-D) σχήματος διαφόρων αντικειμένων έχει υπάρξει σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Ειδικά, η τεχνολογία γρήγορης μέτρησης μεγάλης επιφάνειας και μικροεπιφανειών απαιτείται στη διαδικασία επιθεώρησης ημιαγωγών, επίπεδων οθονών και μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Ωστόσο, αυτό απαιτεί μεγάλο εύρος σάρωσης σε βάθος. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για μέτρηση 3-D επιφανειών υψηλής ταχύτητας, όπου χρειάζεται λιγότερος χρόνος για τη μέτρηση ενός τρισδιάστατου σχήματος ενός αντικειμένου. Έτσι, ο φωτισμός πολλαπλών σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ταχύτητας πλευρικής σάρωσης με τη χρήση της διάταξης μικροφακών.

Μια εγκατάσταση μηχανών μέτρησης συντεταγμένων 3D (CMM) τελευταίας τεχνολογίας δίνει τη δυνατότητα τόσο στους ερευνητές όσο και στους βιομηχανικούς κατασκευαστές να αξιολογήσουν την ακρίβεια των διαφορετικών τεχνικών κατασκευής που συνήθως εφαρμόζονται για την παραγωγή του μηχανικού

εξαρτήματος. Ειδικά όταν το εξεταζόμενο εξάρτημα είναι ιδιαίτερης μορφής, λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας, μπορεί να προκύψουν μεγαλύτερα σφάλματα κατά τη διαδικασία κατασκευής. Αυτά τα σφάλματα έχουν ισχυρό αντίκτυπο στην τελική απόδοση. Η μέτρηση υψηλής ακρίβειας με ένα CMM απαιτεί σάρωση με μικρά βήματα, πράγμα που σημαίνει μέτρηση πολλών σημείων που χρειάζονται μακροχρόνια μέτρηση.

Συμπερασματικά, η παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζει τις τρισδιάστατες μεθόδους μέτρησης μεγάλων σύνθετων επιφανειών που βασίζονται στην μηχανική μάθηση, αναλύει τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τους περιορισμούς τους από τις υπάρχουσες μεθόδους μέτρησης και τα υπάρχοντα όργανα και συστήματα μέτρησης και παρέχει την αρχή λειτουργίας και το πλαίσιο επεξεργασίας ορισμένων τυπικών μεθόδων. Μέσα από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε ότι στη διαδικασία της τρισδιάστατης μέτρησης μεγάλων ή υπερμεγάλων αντικειμένων, απαιτείται συνδυασμός μεθόδων μέτρησης βιομηχανικών εξαρτημάτων.

Τέλος, από την μελέτη και σύγκριση των τρισδιάστατων μεθόδων απεικόνισης βιομηχανικών επιφανειών, η μηχανή τύπου CMM είναι αρκετά αναγνωρισμένη και διαδεδομένη λόγω της αναγνώρισης του αντικειμένου προς απεικόνιση μέσω επαφής οργάνου και αντικειμένου και λόγω υψηλής ακρίβειας μετρήσεων. Επίσης, η CLM προσφέρει υψηλή αξονική ανάλυση απεικόνισης. Ως αποτέλεσμα, η συγκεκριμένη τεχνική προσφέρει την υψηλότερη ανάλυση σε σύγκριση με άλλες τεχνικές οπτικής απεικόνισης και αποτελεί μία καλή επιλογή για εφαρμογές σάρωσης και απεικόνισης υψηλής ακρίβειας.

Βιβλιογραφία

- Alkmal, J. S. (2013). *Investigation of Optical Distance Sensors for Applications in Tool Industry: Optical Distance Sensors*. South Kariland, Finland: Saimaa University of Applied Science.
- B. Li, M. C.-M. (2018). Application of hyperspectral imaging for nondestructive measurement of plum quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*, σσ. 8-15.
- C. Tastimur, H. Y. (2016). Rail defect detection and classification with real time image processing technique. *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*.
- Charles R. Qi, H. s. (2017). PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D classification and Segmentation. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- D. Haridas, G. R. (2015). Digital interferometric measurement of forced convection fields in compact channels. *International Journal of Optomechatronics*, σσ. 9-34.
- De Nicola, S., Ferraro, P., & Finizio, S. G. (2004). Surface topography of microstructures in lithium niobate by digital holographic microscopy. *Meas. Sci. Technol.*
- F. Shrouf, J. O. (2014). Smart factories in industry 4.0: a review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of things paradigm. *Proceedings of the 2014 IEEE IEEM*.
- Hang Su, S. M.-M. (2015). Multi-view Convolutional Neural Networks for 3D Shape Recognition. *Computer Vision and Pattern Recognition*.

- Howard J. Klein, J. C. (2012). Reconceptualizing workplace commitment to redress a stretched construct: revisiting assumptions and removing confounds. *The Academy of Management Review*, σσ. 130-151.
- Huang, Z. (2006). 3D Laser Holographic Interferometry Measurements. *The University of Michigan*.
- Jelena Milisavljevic-Syed, J. L. (2020). The Digitization of Design and Manufacturing: A State-of-the-Art Report on the Transition from Strategic Vision to Implementation in Industry. *Procedia CIRP 93*, σσ. 575-580.
- K. Jeong, J. J. (2010). Speckle fluctuation spectroscopy of intracellular motion in living tissue using coherence-domain digital holography. *Journal of Biomedical Optics*.
- M. Goharkhah, M. A. (2009). Investigation of the accuracy of different methods of interferogram analysis for calculation of local free convection heat transfer coefficient on axisymmetric objects . *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- M. R. Dury, S. W. (2015). Surface finish and 3D optical scanner measurement performance for precision engineering. *Conference: 30th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*.
- Mansour, G. (2014). A developed algorithm for simulation of blades to reduce the measurement points and time on coordinate measuring machine (CMM). *Measurement*, σσ. 51-57.
- Mathieu Dassot, T. C. (2011). The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application Fields, Benefits and Challenges. *Annals of Forest Science* , σσ. 959-974.
- Michael Rüssmann, M. L. (2015, April 9). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *Digital Transformation*.
- Naylor, D. (2003). Recent developments in the measurement of convective heat transfer rates by laser interferometry. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, σσ. 345-355.

- Neelam Barak, V. K. (2022). Measurement of specular surfaces using electrically tunable lens in digital holography. *Journal of Optics*.
- P. J. Boltryk, M. H. (2008). A Comparison of Precision Optical Displacement Sensors for the 3D Measurement of Complex Surface Profiles. *Sens. Actuators A Phys.*, σσ. 2-11.
- P. Lacy, J. R. (2015). *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. London: Palgrave Macmillan.
- S. Fatehi, K. M. (2011). Measurement of convective heat transfer coefficient around a vertical hot wire in different heights using Michelson interferometer based on Abel transform. *Applied Physics Express*, σσ. 124-132.
- S. Hammad Mian, A. A.-A. (2014). New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*.
- S. Jain, G. S. (2020). Synthetic data augmentation for surface defect detection and classification using deep learning. *J. Int. Manufact.*
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*, by Klaus Schwab. Ανάκτηση από World Economic Forum: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab>
- Siller, M. A. (2020). High-speed 3D surface measurement using confocal. *Technologie-Lizenz-Büro*.
- U. Schnars, W. P. (2002). Digital recording and numerical reconstruction of holograms. *Measurement Science & Technology*.
- V. M. R. Santos, A. T.-W. (2019). Design and characterization of an additive manufacturing benchmarking artifact following a design-for-metrology approach. *Additive Manufacturing* .
- V. Sajith, C. B. (2012). Characterization of heat dissipation from a microprocessor chip using digital interferometry. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, σσ. 1298-1306.

- Varun Kumar, C. S. (2016). Testing of Micro-optics using Digital Holographic Interferometric. *In Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS 2016)*, σσ. 142-147.
- W. J. Yanta, W. C. (1989). Phase-measuring laser holographic interferometer for use in high speed flows," International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilitie, Gottingen, West Germany. σσ. 525-534.
- W. Yu, Y. Z. (2020). Visual inspection of surface defects based on lightweight reconstruction network. *Acta Autom. Sin.* .
- X. Yu, J. H. (2014). Review of digital holographic microscopy for three-dimensional profiling and tracking. *Optical Engineering*.
- Xie, X. (2008). A review of recent advances in surface defect detection using texture analysis techniques ELCVIA Electron. *Lett. Comput. Vis. Image Anal*.
- Yuhang Yang, Z. D. (2021). Data-Driven Intelligent 3D Surface Measurement in Smart Manufacturing : Review and Outlook .
- Z. Zhang, W. P. (2020). Deep Learning for Real-time Applications: A Survey. *J. Softw.* .
- M. Narollahi, N. B. (2019). Concrete surface defect detection using deep neural network based on lidar scanning. *CSCE Annual Conference*.