



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ ΚΑΙ
ΜΙΚΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΔΗΜΑΚΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΡΤΕΜΙΣ

1059730

ΜΟΥΡΤΖΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Ιούνιος 2023

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία πληροφοριών αλλάζουν τη βιομηχανία σε όλο τον κόσμο. Η τεχνολογία πληροφοριών είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του φυσικού και του εικονικού χώρου. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο χώρων οδηγεί σε μεγαλύτερη ευελιξία των συστημάτων παραγωγής. Επιπλέον, η χρήση αναδυόμενων ψηφιακών τεχνολογιών όπως τα Κυβερνο-φυσικά συστήματα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και το Υπολογιστικό Νέφος επιτρέπει τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος όπου τα μεγάλα δεδομένα, οι διεργασίες, οι υπηρεσίες, τα συστήματα και οι άνθρωποι συνδέονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα τα Έξυπνα Εργοστάσια και τα εργοστάσια του μέλλοντος. Ένα ψηφιοποιημένο έξυπνο εργοστάσιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα νησί δεδομένων και οι μηχανικοί έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και τεχνικών σε μια προσπάθεια να μετατρέψουν τα ακατέργαστα δεδομένα σε πληροφορίες και κατά συνέπεια σε γνώση. Με την επίτευξη της αποτελεσματικής χρήσης των δεδομένων, οι διαδικασίες παραγωγής βελτιστοποιούνται περαιτέρω και μπορεί να υποστηριχθεί η εκτέλεση της απομακρυσμένης συντήρησης. Επομένως, είναι σημαντικό να αξιοποιηθεί πλήρως ο τεράστιος όγκος δεδομένων (Big Data) που παράγεται από τις εργαλειομηχανές. Ως εκ τούτου, σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένα πλαίσιο για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας αρχιτεκτονικής ψηφιακού διδύμου για την απομακρυσμένη παρακολούθηση και συντήρηση εργαλειομηχανών. Οι βασικές πτυχές του προτεινόμενου πλαισίου είναι η συλλογή και η επεξεργασία δεδομένων και η προσομοίωση της εργαλειομηχανής στον εικονικό χώρο. Επίσης, χρησιμοποιείται η Μικτή Πραγματικότητα για την υποστήριξη των τεχνικών των καταστημάτων κατά την εκτέλεση των εργασιών συντήρησης.

Μια αρχιτεκτονική κυβερνοφυσικής εργαλειομηχανής αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία: 1) τις φυσικές συσκευές, οι οποίες συλλέγουν δεδομένα και πληροφορίες από την εργαλειομηχανή, 2) τα δίκτυα, τα οποία τα μεταδίδουν στον κυβερνοχώρο και 3) το ψηφιακό δίδυμο εργαλειομηχανής, το οποίο μιμείται τα χαρακτηριστικά της και παρακολουθεί και ελέγχει την κατάστασή της σε πραγματικό χρόνο. Παραδείγματα φυσικών συσκευών αποτελούν η εργαλειομηχανή, τα κοπτικά εργαλεία, τα εργοτεμάχια και οι συσκευές συλλογής δεδομένων, δηλαδή διάφοροι αισθητήρες και μετρητικές συσκευές. Τα δίκτυα συνδέουν τον φυσικό χώρο με τον εικονικό, επιτυγχάνοντας έγκυρη και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ της πραγματικής εργαλειομηχανής, του ψηφιακού της δίδυμου και των ανθρώπων. Τέλος, το ψηφιακό δίδυμο εργαλειομηχανής αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη: 1) τη συγχώνευση δεδομένων, η οποία είναι η προπαρασκευαστική ενέργεια για την εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου και περιλαμβάνει μεταξύ

άλλων τον καθαρισμό και την προεπεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων από τους αισθητήρες, 2) το μοντέλο πληροφοριών, το οποίο αναπαριστά τη δομή της εργαλειομηχανής και τις συνδέσεις των κύριων εξαρτημάτων της, 3) τους έξυπνους αλγόριθμους, οι οποίοι φροντίζουν για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών, για την πρόβλεψη σφαλμάτων, για την οπτικοποίηση των δεδομένων κ.α. και 4) τη βάση δεδομένων, η οποία αποθηκεύει τον τεράστιο όγκο των δεδομένων. Με λίγα λόγια, στον φυσικό χώρο συλλέγονται δεδομένα από την εργαλειομηχανή και μέσω των δικτύων μεταφέρονται στον εικονικό χώρο όπου τροφοδοτούνται στο ψηφιακό της δίδυμο.

Η συλλογή δεδομένων είναι η διαδικασία συλλογής πληροφοριών και μετατροπής σημάτων αισθητήρων σε ψηφιακές τιμές. Τα δεδομένα που συλλέγονται από μια εργαλειομηχανή μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα δεδομένα αισθητήρων και τα δεδομένα παραγωγής. Από τη μια πλευρά, τα δεδομένα αισθητήρων συλλέγονται αρχικά από διάφορους αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στην εργαλειομηχανή και στη συνέχεια από μια συσκευή συλλογής δεδομένων. Παραδείγματα αισθητήρων είναι οι μετρητές ισχύος για τη μέτρηση της ισχύος και του ρεύματος του κινητήρα, τα επιταχυνσιόμετρα για τη μέτρηση των ταλαντώσεων, τα δυναμόμετρα ή οι μετρητές τάσης για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής και των ροπών, οι αισθητήρες ΑΕ για τη μέτρηση της ακουστικής εκπομπής, τα θερμοστοιχεία ή τα θερμόμετρα υπέρυθρων για τη μέτρηση της θερμοκρασία ζώνης κοπής και οι κάμερες για την οπτικοποίηση της διαδικασίας κατεργασίας. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα παραγωγής συλλέγονται απευθείας από τον ελεγκτή της εργαλειομηχανής. Περιέχουν τις κρίσιμες παραμέτρους κατεργασίας που περιγράφουν τη διαδικασία, όπως είναι το υλικό και οι διαστάσεις του εργοτεμαχίου, η θέση του κοπτικού εργαλείου, οι παράμετροι κοπής (ταχύτητα κοπής, πρόωση, βάθος κοπής), ο κώδικας G, η κατάσταση λειτουργίας (on/off και απασχολημένη, αδράνεια ή διακοπή έκτακτης ανάγκης), η στάθμη του ψυκτικού υγρού, ο αριθμός εργαλείου, οι συναγερμοί κ.λπ. Επιπρόσθετα, η συλλογή δεδομένων συχνά συνοδεύεται από τη χρήση ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι ένα σύνολο κανόνων και κανονισμών που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές να συνδέονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους διαμέσου ενός δικτύου. Όπως φαίνεται στη βιβλιογραφία, τα πρωτόκολλα OPC Unified Architecture (OPC UA) και MTConnect προτιμώνται στις εφαρμογές ψηφιακών διδύμων.

Τα παραπάνω δεδομένα είναι πολλαπλών πηγών και αδόμητα, επομένως είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν με κατανοητό και τυποποιημένο τρόπο. Η UML (Unified Modelling Language),

η Ενοποιημένη Γλώσσα Σχεδίασης Προτύπων, είναι μια γλώσσα μοντελοποίησης γενικής χρήσης. Χρησιμοποιεί κυρίως γραφικές σημειώσεις για τον προσδιορισμό, την οπτικοποίηση, την κατασκευή και την τεκμηρίωση στοιχείων συστημάτων λογισμικού καθώς και άλλων συστημάτων. Η UML σχετίζεται με τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό και είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε γλώσσα ή τεχνολογία. Τα διαγράμματα UML ορίζουν τις βασικές οντότητες του συστήματος και τα χαρακτηριστικά τους. Ως αποτέλεσμα, τα διαγράμματα UML βοηθούν τους προγραμματιστές να υλοποιήσουν τη σχεδίαση του συστήματος χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού. Η επεκτάσιμη γλώσσα σήμανσης (XML) είναι μια γλώσσα σήμανσης και μια μορφή αρχείου που αποθηκεύει και μεταφέρει δεδομένα με κοινόχρηστο τρόπο. Παρέχει κανόνες για τον καθορισμό των δεδομένων και υποστηρίζει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συστημάτων υπολογιστών. Η XML δεν μπορεί να πραγματοποιήσει υπολογιστικές λειτουργίες όπως άλλες γλώσσες προγραμματισμού, αλλά δεν εξαρτάται από το λογισμικό και τα υλικά μέρη ενός υπολογιστή. Έτσι, τα δομημένα δεδομένα μπορούν να διαχειρίζονται από οποιαδήποτε άλλη γλώσσα προγραμματισμού ή λογισμικό.

Μια εργαλειομηχανή είναι ένα σύνθετο μηχανοτρονικό σύστημα που περιλαμβάνει πολλαπλά υποσυστήματα όπως μηχανικά, ηλεκτρικά και υδραυλικά καθώς και πολλά μηχανικά μέρη. Το μοντέλο πληροφοριών του ψηφιακού διδύμου εργαλειομηχανής είναι η ψηφιακή αναπαράσταση της πραγματικής εργαλειομηχανής και θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα μηχανικό υποσύστημα, ένα ηλεκτρικό υποσύστημα, ένα υδραυλικό υποσύστημα και ούτω καθεξής όπως η πραγματική. Για να γίνει αυτό, χρειάζεται μια γλώσσα μοντελοποίησης. Η Modelica από τη Modelica Association είναι μια αντικειμενοστραφή, δηλωτική, βασισμένη σε εξισώσεις γλώσσα για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων φυσικών συστημάτων πολλαπλών τομέων που περιέχουν μηχανικά, ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, υδραυλικά, θερμικά, ελέγχου, ηλεκτρικής ενέργειας ή προσανατολισμένα στη διαδικασία υποεξαρτήματα. Επομένως, για τη μοντελοποίηση του μηχανικού υποσυστήματος της εργαλειομηχανής με αυτή τη γλώσσα προσδιορίζονται το φορτίο, η αδράνεια και άλλες μηχανικές παράμετροι καθώς και δυναμικές εξισώσεις. Παρόμοια, για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού υποσυστήματος προσδιορίζονται το ρεύμα, η τάση και άλλες ηλεκτρικές παράμετροι καθώς και εξισώσεις του συστήματος ελέγχου. Και τέλος για τη μοντελοποίηση του υδραυλικού υποσυστήματος προσδιορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι της αντλίας και της βαλβίδας καθώς και η εξίσωση υπολογισμού πίεσης και ροής. Για την υλοποίηση χρησιμοποιούνται περιβάλλοντα μοντελοποίησης και προσομοίωσης που βασίζονται στη Modelica.

Η εκτεταμένη πραγματικότητα (Extended Reality, XR) είναι ένας όρος-ομπρέλα που αναφέρεται στο φάσμα των εμβυθιστικών εμπειριών που συνδυάζουν τον πραγματικό και τον ψηφιακό κόσμο. Οι τεχνολογίες που περιλαμβάνονται είναι η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality, AR), η μικτή πραγματικότητα (Mixed Reality, MR) και η εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality, VR). Η μικτή πραγματικότητα συγχωνεύει ψηφιακές πληροφορίες και αντικείμενα στο πραγματικό περιβάλλον. Ο χρήστης μπορεί να αλληλοεπιδράσει σε πραγματικό χρόνο με τα ψηφιακά στοιχεία, ενώ διατηρεί επαφή με το περιβάλλον του. Το Vuforia Engine SDK (software development kit) από τη PTC είναι μια δημοφιλής πλατφόρμα για ανάπτυξη AR/MR εφαρμογών, η οποία παρέχει τη δυνατότητα αναγνώρισης και παρακολούθησης εικόνων. Επίσης, υποστηρίζει την ανάπτυξη στη Unity. Η Unity είναι μια μηχανή παιχνιδιών ή αλλιώς μια πλατφόρμα 3D ανάπτυξης σε πραγματικό χρόνο (Real Time 3D, RT3D) από την Unity Technologies, η οποία δημιουργεί το γραφικό περιβάλλον του χρήστη. Κατά συνέπεια, αυτά τα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή οδηγιών συντήρησης με παραστατικό τρόπο. Αρχικά, τα 3D CAD αρχεία της εργαλειομηχανής μετατρέπονται σε κατάλληλο τύπο αρχείου για εφαρμογές Android, όπως αρχεία dae, Collada ή obj και στη συνέχεια εισάγονται στη Unity. Στο περιβάλλον της Unity και σε συνδυασμό με τη Vuforia δημιουργούνται σκηνές MR. Οι οδηγίες για κάθε εργασία συντήρησης παρέχονται βήμα προς βήμα. Κάθε βήμα αποτελείται από προσομοιώσεις, κείμενο και ένα κουμπί για τη μετάβαση στο επόμενο βήμα. Οι απαιτούμενες πληροφορίες λαμβάνονται από το εγχειρίδιο. Στο τέλος, η εφαρμογή Unity μετατρέπεται σε συμβατή μορφή για Android και ως αποτέλεσμα οι τεχνικοί του καταστήματος μπορούν να έχουν πρόσβαση στην εφαρμογή από κινητό ή tablet. Έτσι, όταν παρουσιαστεί μια βλάβη, ο τεχνικός του καταστήματος ανοίγει την εφαρμογή στο κινητό ή το tablet. Αρχικά, επιλέγει τη κατάλληλη εργασία συντήρησης και μετά στρέφει την κάμερα στην εικόνα. Το κινητό ή το tablet αναγνωρίζει την εικόνα και ένα τρισδιάστατο μοντέλο της εργαλειομηχανής μαζί με το γραφικό περιβάλλον του χρήστη εμφανίζονται στο πραγματικό περιβάλλον. Στη συνέχεια, ο τεχνικός του καταστήματος μπορεί να αλληλοεπιδράσει μαζί τους, να δει την προσομοίωση της διαδικασίας και να την ακολουθήσει βήμα προς βήμα.

Εν κατακλείδι, η 4η βιομηχανική επανάσταση αναφέρεται στη σύγχρονη εποχή της ψηφιοποίησης του κατασκευαστικού τομέα, καθοδηγούμενη από τις τεχνολογικές εξελίξεις. Στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, τα κυβερνοφυσικά συστήματα παραγωγής αποτελούν τον πυρήνα των έξυπνων εργοστασίων και εργοστασίων του μέλλοντος στα οποία βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα των

διαδικασιών και των συστημάτων παραγωγής. Οι εργαλειομηχανές, ως η βάση οποιουδήποτε συστήματος παραγωγής, μετατρέπονται σε κυβερνο-φυσικές εργαλειομηχανές, μια νέα γενιά εργαλειομηχανών, γνωστών και ως Εργαλειομηχανές 4.0. Οι Εργαλειομηχανές 4.0 είναι πιο έξυπνες, πιο αξιόπιστες, πιο ευέλικτες και ευρέως προσβάσιμες. Ωστόσο, οι εργαλειομηχανές είναι πολύπλοκα συστήματα στα οποία εμπλέκονται διάφοροι τομείς εφαρμογής και γι' αυτόν τον λόγο η ανάπτυξη του εικονικού τους μοντέλου, το οποίο ονομάζεται ψηφιακό δίδυμο, είναι δύσκολη. Σε αυτή την εργασία, αναπτύσσεται ένα πλαίσιο για το σχεδιασμό ενός ψηφιακού διδύμου εργαλειομηχανών. Αρχικά, προτείνεται μια αρχιτεκτονική συστήματος η οποία αποτελείται από τρία επίπεδα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα είδη των δεδομένων που συλλέγονται από την εργαλειομηχανή καθώς και οι αντίστοιχοι αισθητήρες. Σε αυτό το βήμα, η χρήση πρωτοκόλλων επικοινωνίας είναι σημαντική για τη διανομή και την επεξεργασία των δεδομένων. Επιπλέον, συζητείται μια μέθοδος ομαδοποίησης των δεδομένων που προέρχονται από διάφορες πηγές. Στη συνέχεια αναλύεται το μοντέλο πληροφοριών που αναπαριστά στον εικονικό χώρο τα υποσυστήματα και τα βασικά μέρη της εργαλειομηχανής καθώς και των μεταξύ τους σχέσεων. Τέλος, παρουσιάζεται μια εφαρμογή μικτής πραγματικότητας για την παροχή οδηγιών συντήρησης ώστε να βοηθήσει και να καθοδηγήσει τους τεχνικούς του καταστήματος. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αποτελέσει η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και της αρχιτεκτονικής του συστήματος. Θα ήταν δόκιμο να πραγματοποιηθεί μια μελέτη περίπτωσης προκειμένου να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του προτεινόμενου πλαισίου και να γίνουν αλλαγές και βελτιώσεις. Τα σχόλια από πραγματικούς χρήστες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως ένας τρόπος διόρθωσης σφαλμάτων και προσθήκης νέων λειτουργιών. Επιπλέον, προηγμένες αναλύσεις δεδομένων και έξυπνοι αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν για την επίτευξη της προγνωστικής συντήρησης. Με αυτόν τον τρόπο οι τεχνικοί του καταστήματος θα μπορούν να ενημερωθούν για μια επερχόμενη βλάβη της εργαλειομηχανής και να εκτελέσουν εργασίες συντήρησης εκ των προτέρων ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας της εργαλειομηχανής. Έτσι, θα αυξηθεί η απόδοση και θα μειωθεί περαιτέρω το κόστος συντήρησης. Τέλος, το προτεινόμενο πλαίσιο πρέπει να χειρίζεται έναν τεράστιο όγκο δεδομένων, τα οποία θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ευαίσθητα. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τεχνικές ασφάλειας δεδομένων και κρυπτογράφησης.

Πίνακας με Επεξηγήσεις της Ορολογίας

Ορολογία	Επεξήγηση
Big Data	Τα Μεγάλα Δεδομένα είναι ο τεράστιος όγκος δεδομένων ή τα σύνθετα δεδομένα τα οποία δεν μπορούν να επεξεργαστούν με τις συμβατικές μεθόδους
Cloud Computing	Το Υπολογιστικό Νέφος είναι η διάθεση υπολογιστικών πόρων μέσω διαδικτύου
Cyber-Physical Machine Tool (CPMT)	Ο συνδυασμός εργαλειομηχανών, διαδικασιών κατεργασίας, υπολογισμών και δικτύωσης
Cyber-Physical Systems (CPS)	Στα Κυβερνοφυσικά Συστήματα οι ενσωματωμένοι υπολογιστές και τα δίκτυα παρακολουθούν και ελέγχουν τις φυσικές διεργασίες
Data Acquisition (DAQ)	Η συλλογή δεδομένων είναι η διαδικασία συλλογής πληροφοριών και μετατροπής σημάτων αισθητήρων σε ψηφιακές τιμές
Digital Twin (DT)	Το Ψηφιακό Δίδυμο είναι η εικονική αναπαράσταση ενός αντικειμένου, ενός συστήματος ή μιας διεργασίας
Graphical User Interfaces (GUIs)	Το Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη είναι ένα σύνολο εικονικών στοιχείων με τα οποία αλληλοεπιδρά ο χρήστης
Industry 4.0	Η τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση
Information Technology (IT)	Η χρήση υπολογιστών για την επεξεργασία δεδομένων και πληροφορίας
Internet of Things (IoT)	Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελεί ένα δίκτυο επικοινωνίας
Machine Tool 4.0	Μια νέα γενιά εργαλειομηχανών
Machine Tool Digital Twin (MTDT)	Ψηφιακό δίδυμο εργαλειομηχανής
Mixed Reality (MR)	Στη Μικτή Πραγματικότητα ο χρήστης αλληλοεπιδρά σε πραγματικό χρόνο με

	ψηφιακά στοιχεία, ενώ διατηρεί επαφή με το περιβάλλον του
MTConnect	Πρωτόκολλο επικοινωνίας
OPC Unified Architecture (OPC UA)	Πρωτόκολλο επικοινωνίας
Smart Factories & Factories of the Future	Τα Έξυπνα Εργοστάσια και εργοστάσια του μέλλοντος είναι κυβερνοφυσικά συστήματα που χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες
Software Development Kit (SDK)	Ένα σύνολο εργαλείων ανάπτυξης λογισμικού
Unified Modeling Language (UML)	Η Ενοποιημένη Γλώσσα Σχεδίασης Προτύπων είναι μια γλώσσα μοντελοποίησης γενικής χρήσης
Extensible Markup Language (XML)	Η επεκτάσιμη γλώσσα σήμανσης είναι μια γλώσσα σήμανσης και μια μορφή αρχείου που αποθηκεύει και μεταφέρει δεδομένα με κοινόχρηστο τρόπο
Extended Reality (XR)	Η εκτεταμένη πραγματικότητα είναι ένας όρος-ομπρέλα που αναφέρεται στο φάσμα των εμβυθιστικών εμπειριών που συνδυάζουν τον πραγματικό και τον ψηφιακό κόσμο.