



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤ

Παπαδοκωστάκης Μιχαήλ

1054576

**Επιβλέπων
Καθηγητής Μούρτζης Δημήτρης**

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, Φεβρουάριος 2022

Ορολογία	Ορολογία στην αγγλική	Επεξήγηση
Επενεργητής πέρατος	End effector	Σημείο ρομποτικού βραχίονα που αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του.
Συνεργατικό ρομπότ	Collaborative robot	Είδος ρομπότ σχεδιασμένο για να δουλεύει μαζί ή κοντά σε ανθρώπους.
Αριθμητικός έλεγχος εργαλειομηχανών	CNC	Η λειτουργία μιας εργαλειομηχανής με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.
Βιομηχανία 4.0	Industry 4.0	4 ^η βιομηχανική επανάσταση
Επαναληψιμότητα	Repeatability	Η συμφωνία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων συγκεκριμένης μεταβλητής υπό τις ίδιες συνθήκες μέτρησης .
Ευελιξία	Flexibility	Η δυνατότητα ενός συστήματος να ανταποκρίνεται γρήγορα σε εναλλαγές της παραγωγής.

Οι ρομποτικοί βραχίονες αναπτύχθηκαν για να αυξήσουν την παραγωγικότητα αντικαθιστώντας τους ανθρώπους σε επαναλαμβανόμενες εργασίες που πρέπει να γίνουν με ακρίβεια ή σε επικίνδυνες εργασίες που γίνονται σε μη ασφαλή περιβάλλοντα. Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από συνδέσμους και αρθρώσεις με τους συνδέσμους να αποτελούν τα άκαμπτα μέρη της δομής του ρομπότ και τις αρθρώσεις τα μέρη που επιτρέπουν την κίνηση των συνδέσμων. Τα περισσότερα βιομηχανικά ρομπότ χρησιμοποιούν μόνο περιστροφικές αρθρώσεις ωστόσο υπάρχουν και διάφορες άλλες διατάξεις που εξυπηρετούν την επίλυση επιμέρους προβλημάτων. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των ρομποτικών βραχιόνων είναι ο end effector. Ως end effector ορίζεται το ύστατο σημείο ενός ρομποτικού βραχίονα, στο οποίο αναρτάται το κατά περίπτωση απαιτούμενο

εργαλείο για την διεκπεραίωση συγκεκριμένων διεργασιών. Συνήθως, η ανάρτηση του εργαλείου στον end effector γίνεται μέσω κοχλιωτής σύνδεσης, μια μη αυτοματοποιημένη διαδικασία, η οποία πραγματοποιείται από τον χειριστή και απαιτεί πολύ χρόνο. Αν το εργαλείο πρέπει να εγκατασταθεί με ακρίβεια τότε κρίνεται απαραίτητη η ευθυγράμμιση του εργαλείου με την φλάντζα του end effector που απαιτεί επιπλέον χρόνο. Ως εκ τούτου, για να επιτραπεί στους ρομποτικούς βραχίονες να εκτελούν πολλές εργασίες ή να προσαρμόζονται εύκολα σε μεταβολές στην παραγωγή ώστε να αυξηθεί η ευελιξία (flexibility) τους είναι αναγκαία η συχνή αλλαγή των εργαλείων τους πράγμα που είναι χρονοβόρο. Αυτό είναι ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα για τα συνεργατικά ρομπότ, τα οποία είναι σχεδιασμένα για να δουλεύουν μαζί με ή κοντά σε ανθρώπους (συνεργατικά ρομποτικά κελιά), διότι η ευελιξία που προσφέρουν λόγω του εύκολου προγραμματισμού τους και της ευκολίας μετακίνησης τους περιορίζεται από την ανάγκη αλλαγής εργαλείων. Η λύση που προτείνεται σε αυτό το πρόβλημα είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας αυτόματης συσκευής εναλλαγής εργαλείων για συνεργατικά ρομπότ. Η αλλαγή των εργαλείων θα μπορεί να πραγματοποιείται αυτόματα από το ρομπότ και θα γίνεται με μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα σε ελάχιστο χρόνο. Με αυτό το τρόπο το συνεργατικό ρομπότ θα μπορεί να αξιοποιείται σε διαφορετικές διεργασίες με κατάλληλες αλλαγές εργαλείων άρα η ευελιξία του θα αυξηθεί σημαντικά. Πρώτα, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας πάνω σε συστήματα αλλαγής εργαλείων που έχουν ερευνηθεί και βρίσκονται στην αγορά. Στην συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός των προδιαγραφών και η ανάπτυξη της συσκευής αλλαγής εργαλείων που ακολουθείται από την αναλυτική και αριθμητική ανάλυση των εξαρτημάτων της.

Τα συστήματα αυτόματης αλλαγής εργαλείων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στον Αριθμητικό Έλεγχο Εργαλειομηχανών (Computer Numerical Control – CNC) για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα για να μειώσουν την διάρκεια της παραγωγής επιτρέποντας την χρήση πολλών εργαλείων χωρίς την παρέμβαση ανθρώπου. Οι ρομποτικοί βραχίονες αναπτύχθηκαν για να προσφέρουν λύσεις για την αυτοματοποίηση διεργασιών ώστε να

αυξήσουν την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα. Συνεπώς, τα συστήματα αυτόματης αλλαγής εργαλείων που επεκτείνουν τις δυνατότητες των ρομπότ ευνοούν ένα αποδοτικό σύστημα παραγωγής. Για να γίνει κατανοητό αυτό είναι σημαντικό να αναφερθούν οι σημαντικές αλλαγές που έχει υποστεί η βιομηχανία και είναι γνωστές ως Βιομηχανικές Επαναστάσεις. Η 1^η Βιομηχανική Επανάσταση χαρακτηρίζεται από την μηχανοποίηση της παραγωγής με την χρήση του ατμού. Αντιστοίχως, κατά την 2^η Βιομηχανική Επανάσταση εισήχθη η έννοια της μαζικής παραγωγής βασισμένη στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, κατά την 3^η Βιομηχανική Επανάσταση βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό η παραγωγή μέσω της ραγδαίας ανάπτυξης των ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων και της πληροφορικής. Η 4^η Βιομηχανική Επανάσταση αναπτύσσεται με βάση την τρίτη αυξάνοντας περαιτέρω τις πρακτικές βιομηχανικού αυτοματισμού μέσω σύγχρονων έξυπνων τεχνολογιών.

Πιο συγκεκριμένα, η 4^η Βιομηχανική Επανάσταση χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση πληροφοριακών και επικοινωνιακών τεχνολογιών (Information and Communication Technologies – ICT) στα συστήματα παραγωγής ώστε να δημιουργηθούν ψηφιακά-φυσικά συστήματα. Δύο από τις θεμελιώδεις τεχνολογίες που ώθησαν τις εξελίξεις κατά την διάρκεια της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και τα μεγάλα σύνολα δεδομένων (Big Data). Το διαδίκτυο των πραγμάτων αφορά στη διασύνδεση των φυσικών πραγμάτων-συσκευών με ενσωματωμένα πληροφοριακά συστήματα (λ.χ. αισθητήρια και λογισμικό) που συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους αλλά και με ανθρώπους. Τα δεδομένα αυτά, εξαιτίας του μεγάλου όγκου και της αυξημένης ταχύτητας που παράγονται, απαντώνται στην βιβλιογραφία ως μεγάλα σύνολα δεδομένων (Big Data) και είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επεξεργαστούν και να αναλυθούν με την υπάρχουσα τεχνολογία. Ωστόσο, η ανάλυση των μεγάλων συνόλων δεδομένων (Big Data Analytics) μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε διάφορους τεχνολογικούς τομείς και για αυτό τον λόγο έχει αποκτήσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας.

Στο πλαίσιο της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης τα βιομηχανικά ρομπότ εξελίσσονται σε ένα νέο είδος ρομπότ που ονομάζεται συνεργατικό ρομπότ και είναι σχεδιασμένο για να δουλεύει μαζί με ανθρώπους με ασφάλεια χρησιμοποιώντας προηγμένους αισθητήρες. Τα συνεργατικά ρομπότ προγραμματίζονται εύκολα χωρίς ειδική εκπαίδευση με χειροκίνητη μετακίνηση των συνδέσμων του ρομπότ ώστε να εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία. Επίσης τα συνεργατικά ρομπότ είναι συμβατά με τις τεχνολογίες της βιομηχανίας 4.0 αφού μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο των πραγμάτων και οι αισθητήρες που φέρουν παράγουν μεγάλο αριθμό δεδομένων προς ανάλυση. Ακόμα, τα συνεργατικά ρομπότ, είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε διαδικασίες παραγωγής αφού προγραμματίζονται εύκολα, μετακινούνται εύκολα λόγω του χαμηλού τους βάρους και έχουν μικρό κόστος. Συνεπώς, εργοστάσια που δεν έχουν ενσωματώσει πλήρως τα στοιχεία της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης, μπορούν με μια μικρή επένδυση να κερδίσουν μερικά από τα προνόμια που προσφέρει.

Στην συνέχεια, γίνεται περιγραφή των συσκευών αλλαγής εργαλείων για ρομπότ ως προς την δομή τους όπως παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία. Αρχικά, οι συσκευές αλλαγής εργαλείων επιτρέπουν στο ρομπότ να αλλάζει εργαλεία μέσω ενός ειδικού μηχανισμού που τις κατηγοριοποιεί σε αυτόματες ή χειροκίνητες ανάλογα με τον τρόπο που ενεργοποιείται. Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από το κύριο μέρος που είναι εγκατεστημένο στον end effector του ρομπότ και το δευτερεύον μέρος που είναι προσαρμοσμένο κατάλληλα στο κάθε εργαλείο. Για κάθε αλλαγή εργαλείου, το ρομπότ αρχικά πλησιάζει το δευτερεύον μέρος του εργαλείου και ευθυγραμμίζει κατάλληλα το κύριο μέλος ως προς το δευτερεύον. Η ευθυγράμμιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει σωστά επομένως υπάρχει μία λειτουργία καθοδήγησης των δύο μελών για ευθυγράμμιση. Αυτή η λειτουργία μπορεί να προσφέρεται από ειδικές κωνικές ράβδους στο ένα μέρος που εισέρχονται σε οπές του δεύτερου μέρους. Έρευνες σε συγκεκριμένο μηχανισμό αυτόματης αλλαγής εργαλείων σε μηχανές αριθμητικού ελέγχου έχουν δείξει ότι το 11% των αστοχιών στην αλλαγή εργαλείων προκύπτουν εξαιτίας της λανθασμένης ευθυγράμμισης κρίσιμων μελών του μηχανισμού. Αυτό είναι ένδειξη της σημαντικότητας της σωστής ευθυγράμμισης του κύριου και

δευτερεύοντος μέρους όσον αφορά την αξιοπιστία του συστήματος αλλαγής εργαλείων. Αφού γίνει η ευθυγράμμιση των μελών, ενεργοποιείται ο μηχανισμός κλειδώματος της συσκευής αλλαγής εργαλείων, χειροκίνητα η αυτόματα, ενώνοντας τα δύο μέλη ώστε να προκύψει μία άκαμπτη σύνδεση που θα επιτρέψει την χρήση του εργαλείου. Η διεπαφή μεταξύ των δύο μελών προσφέρει ηλεκτρικούς και πνευματικούς συνδέσμους ώστε να μπορεί να γίνει μεταφορά ενέργειας για την λειτουργία του εργαλείου και δεδομένων για τον έλεγχο του ή τους αισθητήρες που μπορεί να έχει.

Οι μηχανισμοί χειροκίνητης αλλαγής εργαλείων απαιτούν την παρέμβαση ανθρώπων στην διεργασία παραγωγής επομένως προκαλούν καθυστέρηση στον κύκλο εργασίας του ρομπότ όταν μία αλλαγή εργαλείου είναι απαραίτητη. Ωστόσο οι χειροκίνητες συσκευές αλλαγής εργαλείων δεν χρειάζονται παροχή ενέργειας για την λειτουργία τους και προσδίδουν ταχύτητα και επαναληψιμότητα που τις κάνει ιδανικές για χρήση σε διεργασίες που χρειάζονται λίγες αλλαγές εργαλείων. Επίσης, τα συνεργατικά ρομπότ είναι σχεδιασμένα για να δουλεύουν με ανθρώπους, οπότε μία χειροκίνητη συσκευή προσφέρει μία εύκολη λύση για γρήγορες αλλαγές εργαλείων σε διεργασίες που το ρομπότ δουλεύει συνεργατικά με τον άνθρωπο.

Οι συσκευές αυτόματης αλλαγής εργαλείων δεν χρειάζονται ανθρώπινη παρέμβαση για την λειτουργία τους οπότε μειώνεται ο χρόνος περάτωσης των διεργασιών του ρομπότ. Χωρίζονται σε παθητικές συσκευές και ενεργητικές. Οι ενεργητικές συσκευές χρησιμοποιούν ενέργεια που μπορεί να είναι ηλεκτρική ή να παρέχεται μέσω συστημάτων αέρα για να ενεργοποιήσουν τον μηχανισμό κλειδώματος ενώ οι παθητικές συσκευές κλειδώνουν το κύριο και δευτερεύον μέρος χρησιμοποιώντας την κίνηση του ρομπότ. Οι ρομποτικοί βραχίονες σε έξυπνα εργοστάσια αναμένεται να είναι πλήρως αυτόνομοι και οι αυτόματες συσκευές αλλαγής εργαλείων ενισχύουν αυτή την ανεξαρτησία των ρομπότ.

Ένας μεγάλος αριθμός μηχανισμών που συναντάται σε διπλώματα ευρεσιτεχνίας για αυτόματες και χειροκίνητες συσκευές αλλαγής εργαλείων χρησιμοποιούν συστοιχίες μεταλλικών σφαιρών οι οποίες οδηγούνται από ειδικές γεωμετρίες σε ειδικά διαμορφωμένα

τοιχώματα ώστε να σφηνώνουν. Η μετακίνηση των σφαιρών ώστε να σφηνώσουν μπορεί να γίνεται με διάφορους τρόπους όπως με την χρήση σπειρώματος για χειροκίνητα συστήματα ή την σύνδεση με ηλεκτρο-πνευματικό πιστόνι για αυτόματα ενεργητικά συστήματα. Οι παθητικοί μηχανισμοί δεν χρειάζονται επιπλέον ενέργεια οπότε χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ενέργεια είναι περιορισμένη. Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να είναι σε ρομπότ που μετακινούνται αυτόματα σε μεγάλο χώρο ή σε ρομπότ που δουλεύουν σε απαιτητικό περιβάλλον όπου οι επιπλέον πνευματικές ή ηλεκτρικές συνδέσεις είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν.

Στην αγορά, τα συνεργατικά ρομπότ είναι σε μεγάλη ζήτηση αφού προσφέρουν σημαντικά οφέλη και σαν αποτέλεσμα έχουν δημιουργηθεί πολλά είδη εργαλείων για προσαρμογή στον end effector. Όσον αφορά συσκευές αλλαγής εργαλείων στην αγορά, υπάρχουν πολλά συστήματα χειροκίνητα και αυτόματα που χρησιμοποιούν διάφορους μηχανισμούς για να κλειδώσουν το κύριο και δευτερεύον μέρος. Παρατηρείται ότι στις χειροκίνητες συσκευές αλλαγής εργαλείων που είναι σχεδιασμένες για συνεργατικά ρομπότ δίνεται έμφαση στην ύπαρξη εργονομικών μηχανισμών που επιτρέπουν γρήγορη ενεργοποίηση του συστήματος κλειδώματος.

Αφού έγινε ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, ξεκινάει η ανάπτυξη της συσκευής αυτόματης αλλαγής εργαλείων η οποία σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε ευέλικτα ρομποτικά κελιά για να προσφέρει επιπλέον ευελιξία και παραγωγικότητα. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευέλικτο ρομποτικό κελί το οποίο περιέχει ένα συνεργατικό ρομπότ με μία αρπάγη σαν εργαλείο, έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή και μια φρέζα. Στο ρομπότ ανατίθεται η εργασία να μετακινεί το κομμάτι από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή στην φρέζα για τυχών διορθωτικές αφαιρέσεις υλικού. Με την χρήση της συσκευής αυτόματης αλλαγής εργαλείων, το ρομπότ θα μπορούσε, μέσω της ανάπτυξης ενός εργαλείου φρεζαρίσματος, να αντικαταστήσει την φρέζα και να πραγματοποιήσει το ίδιο το φρεζάρισμα στο κομμάτι επιλέγοντας το κατάλληλο εργαλείο για κάθε εργασία. Για τις περισσότερες λειτουργίες του συνεργατικού ρομπότ σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι ροπές

και τα φορτία στην συσκευή θα είναι σε χαμηλά επίπεδα και οι τιμές που επιλέγονται για τις προδιαγραφές προκύπτουν με βάση τα χαρακτηριστικά άλλων συσκευών στην αγορά. Επίσης, το ρομπότ για το οποίο σχεδιάζεται η συσκευή έχει 6 ηλεκτρικές εισόδους-εξόδους για μεταφορά δεδομένων και ενέργειας οπότε θα πρέπει να περιέχονται τουλάχιστον 6 ηλεκτρικοί σύνδεσμοι. Τέλος, η συσκευή προορίζεται για συνεργατικά ρομπότ τα οποία έχουν σημαντικά μικρότερο κόστος από τα βιομηχανικά ρομπότ, επομένως το κόστος παραγωγής της συσκευής πρέπει να είναι μικρό. Η συσκευή αποτελείται από το κύριο και δευτερεύον μέρος όπως οι περισσότερες συσκευές που έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία και διατίθενται στην αγορά. Το κύριο μέρος αποτελείται από δύο κυκλικές πλάκες με την μία να είναι συνδεδεμένη στον end effector του ρομπότ και την άλλη να συνδέεται με την πρώτη μέσω ενός άξονα με σπείρωμα. Η πρώτη κυκλική πλάκα ονομάζεται κύρια φλάντζα και η δεύτερη δευτερεύουσα φλάντζα ενώ οι δύο μαζί συντάσσουν το κύριο μέρος της συσκευής. Ο άξονας φέρει εξωτερικό σπείρωμα ενώ η δευτερεύουσα φλάντζα εσωτερικό έτσι η σύνδεση μεταξύ κύριας φλάντζας και δευτερεύουσας δημιουργεί μία κινηματική κοχλιωτής σύνδεσης μεταξύ των δύο εξαρτημάτων. Στην άκρη του άξονα υπάρχει εγκάρσια οπή στην οποία είναι συνδεδεμένος ένας ειδικός πείρος που χρησιμοποιείται για την διαδικασία κλειδώματος του κύριου και δευτερεύοντος μέρους της συσκευής. Το δευτερεύον μέρος φέρει ειδική οπή σε σχήμα κλειδαριάς ώστε να περνάει ο πείρος του άξονα του κύριου μέρους. Για να υπάρχει σωστή και ακριβής ευθυγράμμιση μεταξύ του κύριου και δευτερεύοντος μέρους, εισάγεται στην συσκευή ένα κινηματικό σύστημα ζεύξης το οποίο αποτελείται από 3 σφαίρες που κάθονται πάνω σε 3 ειδικές εσοχές προσφέροντας 6 σημεία επαφής που περιορίζουν τους 6 βαθμούς ελευθερίας που έχει ένα στερεό. Η κάθε εσοχή δημιουργείται από την παράλληλη διάταξη δύο πείρων που εγκαθίστανται στην δευτερεύουσα φλάντζα του κύριου μέρους σε ειδικά διαμορφωμένη κοιλότητα. Οι 3 σφαίρες εισέρχονται κατάλληλα στο δευτερεύον μέρος σε ειδικές οπές όπου σφηνώνουν. Οι σφαίρες και οι πείροι έχουν πολύ στενή ανοχή ως προς την κυκλικότητα, επομένως η

ευθυγράμμιση του κύριου και δευτερεύοντος μέρους πραγματοποιείται με πολύ μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα.

Κατά την διάρκεια μιας αλλαγής εργαλείου, το ρομπότ αρχικά ευθυγραμμίζει το κύριο και δευτερεύον μέρος της συσκευής ώστε να δεσμεύσει το εργαλείο που χρειάζεται. Έπειτα, ενώνει τα δύο μέρη περνώντας τον άξονα του κύριου μέρους από την οπή του δευτερεύοντος μέρους. Όταν γίνει αυτό, οι σφαίρες του δευτερεύοντος μέρους κάθονται πάνω στις εσοχές του κύριου μέρους προσφέροντας την απαραίτητη ευθυγράμμιση. Στην συνέχεια, το ρομπότ περιστρέφει τον end effector ανθρωπολογικά που έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή του άξονα και την κύλιση του πείρου στην επιφάνεια του δευτερεύοντος μέρους. Η ανθρωπολογική περιστροφή του άξονα προκαλεί την κοχλιωτή σύνδεση μεταξύ του άξονα και της δευτερεύουσας φλάντζας να ξεβιδώσει ωστόσο αυτό δεν είναι δυνατό λόγω του πείρου που είναι σε επαφή με το δευτερεύον μέρος της συσκευής. Έτσι δημιουργείται μία σύνδεση μεταξύ κύριου και δευτερεύοντος μέρους ανάλογη της σύνδεσης μεταξύ μίας βίδας και ενός περικοχλίου με τον πείρο να αποτελεί την ανάλογη κεφαλή της βίδας. Για να είναι δυνατή αυτή η διαδικασία πρέπει το δευτερεύον μέρος να είναι περιορισμένο ως προς την περιστροφή του. Για αυτό το λόγο, έχει δύο ειδικές οπές από όπου περνάνε δύο πείροι και το συγκρατούν ενώ επιτρέπουν την γραμμική κίνηση προς τα επάνω μετά την ζεύξη των δύο μερών. Οι δύο πείροι αυτοί αποτελούν μέρος του εξαρτήματος συγκράτησης του δευτερεύοντος μέρους όσο αυτό δεν χρησιμοποιείται. Για την επικύρωση της ορθότητας του μηχανισμού που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε, κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο σε πραγματική κλίμακα, με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D printer). Ωστόσο, είναι αδύνατο να κατασκευαστούν όλα τα εξαρτήματα της κατασκευής με χρήση 3D printer λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών γεωμετριών που δεν μπορούν να κατασκευαστούν από πλαστικό με επάρκεια. Συνεπώς, ο άξονας που φέρει το εξωτερικό σπείρωμα αντικαθίσταται με έναν κοχλία ανάλογης διαμέτρου και το εσωτερικό σπείρωμα της δευτερεύουσας φλάντζας αντικαθίσταται με έναν περικόχλιο. Το κινηματικό σύστημα ζεύξης κατασκευάζεται εύκολα με τη χρήση μεταλλικών σφαιριδίων σε συνδυασμό με πείρους.

Επίσης, για την συγκράτηση της κύριας και δευτερεύουσας φλάντζας σε σταθερή γωνιακή θέση μεταξύ τους χρησιμοποιείται ένα ελατήριο συμπίεσης που προσφέρει αρκετή προένταση ώστε τα δύο αυτά εξαρτήματα να μην περιστρέφονται ελεύθερα. Έπειτα, το κύριο μέρος της συσκευής εγκαθίσταται σε ένα συνεργατικό ρομπότ και το δευτερεύον μέρος για δύο εργαλεία εγκαθίσταται σε μία βάση εναπόθεσης/αποθήκευσης εργαλείων κατασκευασμένη από προφίλ αλουμινίου τύπου T-slot (κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές). Έπειτα από μια σειρά δοκιμών αλλαγής εργαλείων χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτό διαπιστώθηκε η επαρκής λειτουργία του και έγινε αντιληπτή σε βάθος η δυναμική της λειτουργίας του.

Εφόσον ο μηχανισμός λειτουργίας της συσκευής επικυρώθηκε, στην συνέχεια απαιτείται ο αναλυτικός σχεδιασμός των διάφορων εξαρτημάτων ώστε η συσκευή να πληροί τις προδιαγραφές με ασφάλεια. Η ασφάλεια στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι τα συνεργατικά ρομπότ δουλεύουν μαζί με/κοντά σε ανθρώπους όπου η ξαφνική αστοχία εξαρτημάτων είναι σημαντικό να αποφεύγεται. Παρατηρώντας την δυναμική της λειτουργίας της πρωτότυπης συσκευής πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες τροποποιήσεις του αρχικού σχεδίου. Αρχικά, προσδιορίζεται η χρήση ένθετου περικοχλίου στην δευτερεύουσα φλάντζα του κύριου μέρους διότι το εσωτερικό σπείρωμα σε αυτό το εξάρτημα θα περιόριζε το εύρος των υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης, στην επιφάνεια πάνω στην οποία κυλιέται ο πείρος κλειδώματος παρατηρήθηκαν έντονα σημάδια φθοράς έπειτα από ορισμένο κύκλο φορτίσεων (κύκλους αλλαγής εργαλείων) οπότε η επιφάνεια αυτή, που περιλαμβάνει και την ειδική οπή σε σχήμα κλειδαριάς, ορίζεται ως διαφορετικό εξάρτημα. Το εξάρτημα αυτό ονομάζεται φλάντζα κλειδώματος και εισέρχεται σε ειδική διαμόρφωση στο δευτερεύον μέρος.

Πριν την ανάλυση των διάφορων εξαρτημάτων, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis – FEM), είναι σημαντικός ο προσδιορισμός του κύκλου φόρτισης της συσκευής. Ο κύκλος φόρτισης ξεκινάει με το κλείδωμα του κύριου και δευτερεύοντος μέρους, όπου εισάγεται μία αξονική δύναμη στην συσκευή λόγω της προέντασης της

κοχλιωτής σύνδεσης. Έπειτα, σε σύντομο χρονικό διάστημα από το κλείδωμα των δύο μερών, θεωρείται ότι το ρομπότ κάνει κάποια διεργασία κατά την οποία ασκείται το πλήρες φορτίο και η ροπή που προσδιορίζονται στις προδιαγραφές. Μετά το πέρας της διεργασίας αυτής, το ρομπότ αφήνει το εργαλείο με αποτέλεσμα όλα τα φορτία που ασκούνται στην συσκευή να εξασθενήσουν σταδιακά. Το ρομπότ επιλέγει το επόμενο εργαλείο και ο κύκλος φόρτισης, που περιεγράφηκε παραπάνω, επαναλαμβάνεται. Η συνεχής επανάληψη του κύκλου φόρτισης μπορεί να δημιουργήσει φαινόμενα κόπωσης στην συσκευή τα οποία δύναται να προκαλέσουν ξαφνική αστοχία εξαρτημάτων χωρίς την ύπαρξη ενδείξεων. Συνεπώς, ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων πρέπει να γίνει με χρήση κριτηρίων αστοχίας από το φαινόμενο της κόπωσης. Επιπροσθέτως, η αντίσταση σε ροπή στρέψης της συσκευής έχει ως αποτέλεσμα να προκαλείται επιπλέον προένταση ή ξεβίδωμα του μηχανισμού κλειδώματος. Έτσι, για να είναι βέβαιο ότι δεν θα είναι δυνατό το ξεκλείδωμα του μηχανισμού, η ροπή που θα ασκείται για το κλείδωμα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ροπή αντίστασης που ορίζεται στις προδιαγραφές.

Ένα σημαντικό εξάρτημα της συσκευής που απαιτεί αναλυτικό σχεδιασμό είναι ο άξονας που φέρει το σπείρωμα και τον ειδικό πείρο κλειδώματος. Τα κρίσιμα σημεία του άξονα που πρέπει να σχεδιαστούν είναι η διάμετρος του άξονα στο σημείο της οπής και το σπείρωμα του άξονα. Για την αναλυτική μοντελοποίηση, ο άξονας θεωρείται ως δοκός πακτωμένη στο άκρο όπου συνδέεται με την κύρια φλάντζα του κύριου μέρους. Έτσι, με βάση τις προδιαγραφές που ορίζονται για το φορτίο που μπορεί να φέρει η συσκευή μαζί με την μέγιστη ροπή κατασκευάζονται τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών της δοκού. Ωστόσο, για το πρώτο κρίσιμο σημείο του άξονα, που είναι η οπή στην οποία εισέρχεται ο πείρος, είναι αδύνατος ο υπολογισμός των τάσεων διότι σε αυτό το σημείο γίνεται η μεταφορά του φορτίου από το δευτερεύον μέρος της συσκευής στον άξονα. Για τον αρχικό σχεδιασμό του άξονα σε αυτό το σημείο μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις λόγω της προέντασης με την χρήση κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου για συνδέσεις πείρου και οπής. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή η οπή βρίσκεται σε κυλινδρικό φορέα οπότε υπάρχει συγκέντρωση τάσεων

στις άκρες της οπής οι οποίες είναι αδύνατο να προσδιοριστούν. Έτσι, αναπτύσσεται ένα απλό μαθηματικό μοντέλο, στο οποίο ένα κυλινδρικό εξάρτημα πακτωμένο στο ένα άκρο φορτίζεται ακτινικά στην οπή με την δύναμη της προέντασης ώστε να υπολογιστούν οι μέγιστες τάσεις στην οπή. Για την υπολογισμό του σπειρώματος, το κρίσιμο σημείο που ερευνάται βρίσκεται στην άκρη της σύνδεσης του άξονα με την δευτερεύουσα φλάντζα. Σε αυτό το σημείο θεωρείται ότι ισχύουν τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών οπότε χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης σε αυτό το σημείο λαμβάνοντας υπόψιν τον τροποποιημένο συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων εξαιτίας της ύπαρξης του εξωτερικού σπειρώματος.

Ένα εξίσου κρίσιμο εξάρτημα που χρήζει αναλυτικού σχεδιασμού είναι ο πείρος, καθώς αυτό είναι το εξάρτημα που φορτίζεται με την δύναμη της προέντασης, που καταπονεί τον πείρο σε κάμψη. Επιπλέον της προέντασης (που αναφέρθηκε προηγουμένως) ο πείρος δέχεται δυνάμεις λόγω της φόρτισης της συσκευής. Κατά την διάρκεια κλειδώματος ασκείται και μια δύναμη τριβής η οποία προκαλεί σύνθετη καταπόνηση του πείρου, σε κάμψη και σε στρέψη. Για τον αναλυτικό σχεδιασμό του πείρου, χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο. Το απλοποιημένο μοντέλο αποτελείται από μια πακτωμένη δοκό με το μισό μήκος του πείρου από το οποίο έχει αφαιρεθεί η ακτίνα του άξονα στο σημείο της οπής. Η δύναμη της προέντασης καθώς και η δύναμη της τριβής κατά την διάρκεια του κλειδώματος θεωρούνται ως ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία κατά μήκος του πείρου λόγω των δυνάμεων επαφής με την επιφάνεια του δευτερεύοντος μέρους της συσκευής.

Για τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων αυτών σε κόπωση είναι αναγκαίος ο ορισμός σημαντικών παραμέτρων, όπως το όριο διαρκούς αντοχής του υλικού και ο τροποποιημένος συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων. Αρχικά, ορίζεται το όριο διαρκούς αντοχής ενός υλικού ως η μέγιστη τάση φόρτισης του εξαρτήματος για διαρκή αντοχή (αντοχή σε άπειρους κύκλους φόρτισης). Επειδή το μέγεθος αυτό προκύπτει πειραματικά για συγκεκριμένο δοκίμιο, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός συντελεστών τροποποίησης της πειραματικής τιμής ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο προς σχεδιασμό εξάρτημα. Επίσης, ορίζεται ο

τροποποιημένος συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων ο οποίος προκύπτει από τον θεωρητικό συντελεστή λαμβάνοντας υπόψιν την ευαισθησία του υλικού σε ρωγμές. Η φόρτιση ενός εξαρτήματος σε κόπωση χαρακτηρίζεται από την εναλλασσόμενη και την μέση τάση οι οποίες υπολογίζονται με βάση την μέγιστη και ελάχιστη τιμή που ασκείται στο εξάρτημα κατά την λειτουργία του. Με την χρήση των παραπάνω δεδομένων υπολογίζεται η ισοδύναμη τάση για σύνθετη φόρτιση του μηχανισμού/εξαρτήματος, εισάγοντας επίσης τους τροποποιημένους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων για κάθε τύπο φόρτισης. Η ισοδύναμη τάση χρησιμοποιείται με ένα κριτήριο αστοχίας κόπωσης ώστε να συνδυαστεί η μέση και η εναλλασσόμενη τάση και να προκύψει ένας συντελεστής ασφαλείας για κόπωση. Για να συνεχιστεί η ανάλυση είναι αναγκαίο να επιλεγεί το υλικό κατασκευής των διάφορων εξαρτημάτων. Για τον άξονα κλειδώματος θα χρησιμοποιηθεί ο επιβεβλημένος χάλυβας 42CrMo4 διότι έχει υψηλή αντοχή και χρησιμοποιείται συχνά σε εξαρτήματα που περιέχουν σπειρώματα. Ο πείρος που συνδέεται στο άκρο του άξονα κλειδώματος καθώς και οι ράβδοι και οι σφαίρες που χρησιμοποιούνται στο κινηματικό σύστημα ζεύξης είναι κατασκευασμένα από ειδικό ατσάλι υψηλής αντοχής στην τριβή. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα θα κατασκευαστούν από κράματα αλουμινίου, καθώς λόγω του μεγάλου όγκου το βάρος της κατασκευής αυξάνεται σημαντικά, μειώνοντας το ωφέλιμο φορτίο του ρομποτικού βραχίονα. Συγκεκριμένα, το αλουμίνιο λόγω του καλού λόγου αντοχής προς πυκνότητα και της καλής κατεργασιμότητας, είναι κατάλληλο υλικό για τα συγκεκριμένα εξαρτήματα.

Έπειτα, ξεκινάει η κατάστρωση της επαναληπτικής διαδικασίας σχεδιασμού του άξονα και του πείρου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που πρέπει να υπολογιστούν είναι η διάμετρος του άξονα κλειδώματος στο σημείο που βρίσκεται η οπή που εισέρχεται ο πείρος, η διάμετρος του πείρου και το σπείρωμα του άξονα κλειδώματος. Η διάμετρος του άξονα στην οπή εξαρτάται από την διάμετρο του πείρου ενώ οι δυνάμεις που ασκούνται στον πείρο και στον άξονα εξαρτώνται από το σπείρωμα που θα επιλεγεί πράγμα που κάνει την διαδικασία περίπλοκη. Για αυτό το λόγο, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος δέχεται σαν είσοδο τα μεγέθη και υπολογίζονται αυτόματα οι συντελεστές ασφαλείας για το

κάθε σημείο με βάση τα μεγέθη που επιλέχθηκαν. Η λειτουργία του αλγόριθμου επαναλαμβάνεται για αρκετούς συνδυασμούς, καταλήγοντας σε έναν συνδυασμό μεγεθών που ικανοποιούν τα κριτήρια σχετικά με τους συντελεστές ασφαλείας.

Στην συνέχεια αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στα κρίσιμα σημεία όπως στην θεωρητική πάκτωση του πείρου και στην οπή του άξονα. Ακόμα, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί αν η προένταση που εισάγεται στο σύστημα μέσω της κοχλιωτής σύνδεσης είναι αρκετή για να κρατήσει το κινηματικό σύστημα ζεύξης σε επαφή πράγμα που είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αναλυτικά. Έτσι, δημιουργείται ένα υπολογιστικό μοντέλο με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μοντελοποιώντας την επαφή του πείρου με την οπή του άξονα και την επιφάνεια της πλάκας κλειδώματος ως επαφή τριβής. Η ίδια μοντελοποίηση ακολουθείται για την επαφή των μεταλλικών σφαιρών με τις ράβδους του κινηματικού συστήματος ζεύξης διότι επιτρέπει την ανίχνευση απώλειας επαφής που είναι αναγκαία σε αυτό το σημείο. Η ανάλυση γίνεται σε δύο χρονικά βήματα του ενός δευτερολέπτου. Κατά την διάρκεια του πρώτου βήματος γίνεται η εφαρμογή της προέντασης στον άξονα κλειδώματος. Αντιστοίχως, κατά την διάρκεια του δεύτερου βήματος γίνεται η εφαρμογή της δύναμης σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Η ανάλυση επαναλαμβάνεται με τις ίδιες ρυθμίσεις αλλά με σταδιακά αυξανόμενα στοιχεία του πλέγματος ούτως ώστε οι τιμές των αποτελεσμάτων να συγκλίνουν. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν υπάρχει απώλεια επαφής του κινηματικού συστήματος ζεύξης και παράλληλα υπολογίζεται η τάση του πείρου στην πάκτωση και η μέγιστη τάση στην οπή του άξονα κλειδώματος. Με τις τάσεις αυτές υπολογίζονται οι νέοι συντελεστές ασφαλείας για κόπωση που συμπεριλαμβάνουν την φόρτιση της συσκευής. Παρατηρείται ότι οι συντελεστές που προκύπτουν είναι πιο υψηλοί από την αναμενόμενη τιμή, το οποίο συνεπάγεται ότι τα δύο αυτά εξαρτήματα είναι υπερδιαστασιολογημένα. Ως εκ τούτου, απαιτείται επανασχεδιασμός των εξαρτημάτων ώστε να μειωθούν οι διαστάσεις τους. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων γίνεται σύγκριση των τάσεων που προέκυψαν από τις αναλυτικές λύσεις και την αριθμητική λύση.

Συγκρίνονται η τάση στην πάκτωση του πείρου της αναλυτικής λύσης λόγω της προέντασης με την αντίστοιχη υπολογιστική λύση στο πρώτο χρονικό βήμα και η μέγιστη τάση στην οπή του άξονα του απλοποιημένου μοντέλου με την μέγιστη τάση στην οπή του υπολογιστικού μοντέλου στο πρώτο βήμα. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση στην οπή έχει πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων ωστόσο η τάση στην πάκτωση του πείρου είναι σημαντικά μεγαλύτερη στο αναλυτικό μοντέλο. Επίσης, συγκρίνεται η ισοδύναμη τάση μετά την κοχλιωτή σύνδεση στον άξονα με την αναλυτική λύση ώστε να εξακριβωθεί ότι τα διαγράμματα καμπτικών και στρεπτικών ροπών ισχύουν διότι αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τάσεων στο σπείρωμα. Η σύγκριση των δύο λύσεων δείχνει πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης. Εκτός από τον άξονα κλειδώματος και τον πείρο, η συσκευή έχει πολλά άλλα εξαρτήματα στα οποία περιέχονται κρίσιμα σημεία που δεν ήταν δυνατό να αναλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Τέτοια σημεία είναι οι διάφορες ακτίνες καμπυλότητας που βρίσκονται σε κοιλότητες όπως για παράδειγμα στην κοιλότητα που εισέρχεται η φλάντζα κλειδώματος στο δευτερεύον μέρος. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκε και δεύτερη ανάλυση εστιάζοντας στην περαιτέρω αύξηση των στοιχείων του πλέγματος γύρω από τα προαναφερθέντα σημεία, καταλήγοντας σε υψηλούς συντελεστές ασφαλείας. Συνεπώς εξάγεται το συμπέρασμα ότι απαιτείται επανασχεδιασμός των σημείων αυτών. Επομένως, για να μειωθούν οι συντελεστές ασφαλείας σε όλα τα εξαρτήματα της συσκευής, γίνεται αύξηση της ασκούμενης ροπής με χρήση του αναλυτικού μοντέλου για το σπείρωμα. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η ροπή ώστε ο συντελεστής ασφαλείας κοπώσεως του σπειρώματος να είναι ικανοποιητικός. Με βάση την ροπή που προκύπτει, γίνονται επιπλέον αναλύσεις και προκύπτουν οι καινούργιοι συντελεστές ασφαλείας στα κρίσιμα σημεία. Οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν έχουν ακόμα αρκετά μεγάλες τιμές στα περισσότερα σημεία.

Συμπερασματικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η βελτίωση ενός μηχανισμού αυτόματης εναλλαγής εργαλείων για συνεργατικά ρομπότ. Ένας πρωτότυπος μηχανισμός ευθυγράμμισης χρησιμοποιήθηκε με

την εισαγωγή ενός κινηματικού συστήματος ζεύξης και μία κοχλιωτή σύνδεση για να το συγκρατεί. Η λειτουργία του μηχανισμού εξακριβώθηκε με την κατασκευή πρωτοτύπου πραγματικής κλίμακας, ενώ ακολούθησαν αριθμητικές και αναλυτικές αναλύσεις. Η κατασκευή του μηχανισμού θα επιτρέψει την διεξαγωγή επιπρόσθετων πειραμάτων με σκοπό την βελτίωση των επιμέρους εξαρτημάτων. Τέλος, μια σημαντική προσθήκη που πρέπει να γίνει είναι η ανάπτυξη των ηλεκτρικών και πνευματικών συνδέσμων ώστε η συσκευή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές εφαρμογές.