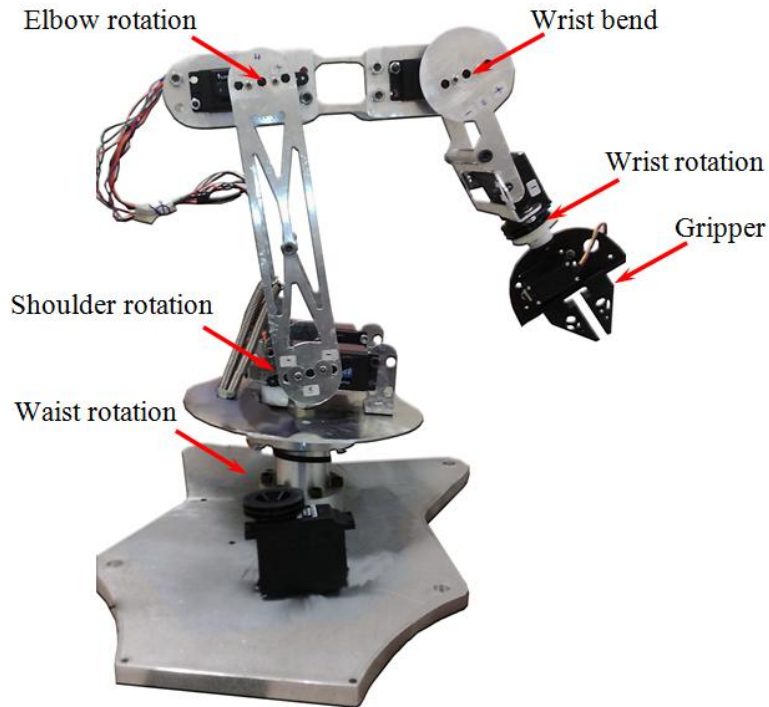


## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΟΜΠΟΤΙΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΕΞΑΡΧΟΣ ΣΠΗΛΙΟΣ

Α.Μ.: 4867

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΡΚΑΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014



## Πρόλογος

Η εργασία αυτή ασχολείται με τον σχεδιασμό, τη μελέτη και την κατασκευή ενός ρομποτικού βραχίονα.

Οι ρομποτικοί βραχίονες βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία (συναρμολόγηση, βαφή), στην έρευνα (μελέτη δυσπρόσιτων σημείων και σε ακραίες συνθήκες) αλλά και σε καθημερινές εφαρμογές (καθαρισμοί).

Στόχος της εργασίας είναι η παράθεση των κυρίων χαρακτηριστικών της δομής ενός ρομποτικού βραχίονα, καθώς επίσης και η δομική και οικονομική μελέτη κατασκευής του.

Έτσι, η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται ως εξής:

Στο Πρώτο Κεφάλαιο (Εισαγωγή), παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ρομποτικού βραχίονα, και τα πιο κοινά είδη των ρομποτικών βραχιόνων.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται ορισμένες από τις χρήσεις των ρομποτικών βραχιόνων.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός των τμημάτων εν ός ρομποτικού βραχίονα, με το πρόγραμμα SOLIDWORKS.

Στο Τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των κινητήρων που παρέχουν την κίνηση στα τμήματα ενός ρομποτικού βραχίονα.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο, γίνεται η οικονομική μελέτη για την κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα που απασχόλησε το παρόν εργαστήριο.

Τέλος, στο Έκτο Κεφάλαιο, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ., τον επιβλέποντα Ακαδημαϊκό της διπλωματικής μου εργασίας, για το συνεχές ενδιαφέρον του, την πολύπλευρη συμπαράστασή του, και τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσής.

Ο σπουδαστής  
(Ονοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)

# Περιεχόμενα

<u>Θέμα</u>	<u>Σελ.</u>
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1. Ρομποτική.....	7
1.1.1. Γενικά.....	7
1.1.2. Ιστορική Αναδρομή.....	8
1.2. Μέρη ρομποτικού βραχίονα.....	10
1.2.1. Γενικά.....	10
1.2.2. Σύνδεσμος.....	10
1.2.3. Άρθρωση.....	11
1.2.4. Βραχίονας.....	13
1.2.5. Καρπός.....	14
1.2.6. Άκρο.....	15
1.2.7. Ενεργοποιητής.....	15
1.2.8. Αισθητήρας.....	15
1.2.9. Ελεγκτής.....	16
1.3. Είδη ρομποτικών.....	16
1.3.1. Γενικά.....	16
1.3.2. Γεωμετρία.....	17
1.3.3. Χώρος εργασίας.....	22
1.3.4. Ενεργοποίηση.....	22
1.3.5. Έλεγχος.....	23
1.3.6. Εφαρμογή.....	24
1.4. Σκοπός της Εργασίας.....	25
2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ.....	26
2.1. Γενικές Εφαρμογές.....	26
2.1.1. Εργασίες οι οποίες είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο.....	26
2.1.2. Εργασίες οι οποίες είναι επαναλαμβανόμενες.....	27

2.1.3. Ταπεινωτικές Εργασίες.....	27
2.1.4. Άλλες Εργασίες .....	28
2.2. Συντήρηση και Επισκευή.....	29
2.2.1. Πυρηνική Βιομηχανία .....	29
2.2.1.1. Λειτουργία και συντήρηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων και εργαστηρίων πυρηνικής ενέργειας .....	30
2.2.1.2. Συντήρηση πυρηνικών αντιδραστήρων.....	32
2.2.1.3. Παροπλισμός και διάλυση πυρηνικών εγκαταστάσεων.....	33
2.2.1.4. Επείγουσα παρέμβαση .....	34
2.2.2. Αυτοκινητόδρομοι.....	35
2.2.3. Σιδηρόδρομοι.....	38
2.2.4. Συντήρηση Ηλεκτρικού Δικτύου.....	40
2.2.5. Συντήρηση Αεροσκαφών .....	42
2.2.6. Υποβρύχιες Εγκαταστάσεις.....	42
2.2.7. Εγκαταστάσεις Οπτάνθρακα (Κωκ).....	43
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ SOLIDWORKS ..	45
3.1. Γενικά.....	45
3.2. Περιγραφή ρομποτικού βραχίονα .....	47
3.3. Λεπτομέρειες σχεδιασμού .....	49
3.3.1. Σχεδιασμός .....	49
3.3.2. Απόδοση όγκου .....	54
3.3.3. Διαδικασία Συναρμολόγησης.....	57
4. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΒΡΑΧΙΟΝΑ.....	60
4.1. Γενικά.....	60
Vigor VSD-11YMB MG/HV Extra Large 360 Degree/Winch Servo 0.75sec / 40kg / 150g .	60
4.2. Ροπή και δύναμη κινητήρων.....	62
4.2.1. Χαρακτηριστικά τμημάτων του ρομποτικού βραχίονα που κατασκευάστηκε.....	62
4.2.1.1. Βάση.....	62
4.2.1.2. Άκρο (Δαγκάνα) .....	64
4.2.1.3. Σερβοκινητήρες.....	64
4.2.1.4. Φύλλο αλουμινίου .....	66
4.2.3. Υπολογισμός ροπής και δύναμης.....	67
4.2.3.1. Γενικά .....	67
4.2.3.2. Υπολογισμός ροπής για σερβοκινητήρα.....	67

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ .....	70
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	71
6.1. Ρομποτική.....	71
6.2. Σχεδιασμός ρομποτικού βραχίονα.....	72
6.3. Υπολογισμός ροπής, δύναμης και κόστους .....	72
6.4 Συμπεράσματα - Αποτελέσματα προσωπικής εργασίας.....	72
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ .....	74

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Ρομποτική

### 1.1.1. Γενικά

Ο όρος ρομπότ χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Τσέχο συγγραφέα Karel Capek στο έργο του “Rassum’s Universal Robots” το 1920. Η λέξη ρομπότ στα Τσεχικά σημαίνει «εργάτης» ή «υπηρέτης» [1].

Ο όρος ρομποτική (robotics) αναφέρεται στη μελέτη και τη χρήση των ρομπότ (robot, Πληθ. Robots). Ο όρος χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Isaac Asimov το 1941, στη σύντομη ιστορία του επιστημονικής φαντασίας, Runaround. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Ρομποτικής της Αμερικής (Robotics Institute of America, RIA), ο ορισμός για ένα ρομπότ είναι: «Ένα ρομπότ είναι ένας επαναπρογραμματιζόμενος πολυλειτουργικός χειριστής, σχεδιασμένος για να μετακινεί υλικά, εξαρτήματα, εργαλεία ή εξειδικευμένες συσκευές μέσω των μεταβλητών προγραμματισμένων κινήσεων για την απόδοση μιας ποικιλίας εργασιών» [2].

Ο Isaac Asimov πρότεινε τέσσερις εκλεπτυσμένους Νόμους της «ρομποτικής» για να μας προστατεύσει από ευφυείς γενιές ρομπότ. Αν και δεν είμαστε πολύ μακριά από την εποχή όπου πραγματικά θα χρειαστεί να εφαρμόσουμε τους Νόμους του Ασίμωφ, και παρ’ όλο που δεν υπάρχει άμεση ανάγκη, είναι καλό να έχουμε ένα σχέδιο. Οι τέσσερις αυτοί νόμοι είναι [2]:

- Νόμος Μηδέν: Ένα ρομπότ δεν μπορεί να κάνει κακό στην ανθρωπότητα, είτε, λόγω αδράνειας, να επιτρέψει στην ανθρωπότητα να προκαλέσει κακό.
- Νόμος Πρώτος: Ένα ρομπότ δεν μπορεί να προκαλέσει κακό σε ένα ανθρώπινο ον, είτε, είτε λόγω αδράνειας, να επιτρέψει σε ένα ανθρώπινο ον να προκαλέσει κακό, εκτός εάν αυτό θα παραβίαζε έναν νόμο ανώτερης τάξης.
- Νόμος Δεύτερος: Ένα ρομπότ πρέπει να υπακούει τις εντολές που δίνονται από τον

άνθρωπο, εκτός από την περίπτωση που τέτοιες εντολές θα παραβίαζαν έναν νόμο ανώτερης τάξης.

- Νόμος Τρίτος: Ένα ρομπότ πρέπει να προστατεύει την ύπαρξή του εφ' όσον η προστασία αυτή δεν θα παραβίαζε έναν νόμο ανώτερης τάξης.

### 1.1.2. Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη συσκευή ελέγχου θέσης εφευρέθηκε περίπου το 1938 για βαφή με ψεκασμό. Ωστόσο, τα πρώτα σύγχρονα βιομηχανικά ρομπότ ήταν τα Unimates, τα οποία κατασκευάστηκαν από τον J. Engelberger στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η εταιρεία Unimation ήταν η πρώτη που κατασκεύασε ρομπότ για την αγορά και, ως εκ τούτου, ο Engelberger έχει ονομασθεί ο πατέρας της ρομποτικής. Στη δεκαετία του 1980 η βιομηχανία των ρομπότ αναπτύχθηκε πολύ γρήγορα, κυρίως λόγω των τεράστιων επενδύσεων από την αυτοκινητοβιομηχανία [2].

Στην ερευνητική κοινότητα, τα πρώτα αυτόματα ήταν πιθανότατα οι μηχανές του Grey Walter (1940) και το θηρίο (beast) του John Hopkins. Το πρώτο προγραμματιζόμενο ρομπότ σχεδιάστηκε από τον George Devol το 1954. Ο Devol χρηματοδότησε τη Unimation. Το 1959 εμφανίστηκε στην αγορά το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο ρομπότ. Οι ρομποτικοί βραχίονες (robotic manipulators) χρησιμοποιήθηκαν σε βιομηχανίες μετά το 1960, και είδαν την ανάπτυξη των πυραύλων τη δεκαετία 1980 [2].

Τα ρομπότ εμφανίστηκαν ως αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο τεχνολογιών:

- Των τηλεχειριστών (teleoperators) και
- Του υπολογιστή αριθμητικού (ψηφιακού) ελέγχου (Computer Numerical Control, CNC) των μηχανημάτων άλεσης (milling machines).

Οι τηλεχειριστές αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου για να χειριστούν τα ραδιενεργά υλικά, και η CNC αναπτύχθηκε για να αυξήσει την ακρίβεια που απαιτείται στον χειρισμό των νέων τεχνολογικών τμημάτων. Ως εκ τούτου, τα πρώτα ρομπότ δεν ήταν τίποτε άλλο από τον ψηφιακό έλεγχο των μηχανικών συνδέσεων που προορίζονταν βασικά για να μεταφέρουν υλικά από το σημείο A στο σημείο B [2].

Σήμερα, περισσότερο πολύπλοκες εφαρμογές, όπως η συγκόλληση, η βαφή, και η συναρμολόγηση, απαιτούν πολύ περισσότερη ικανότητα κίνησης και αίσθησης. Ως εκ τούτου, ένα ρομπότ είναι μια πιο πολύπλοκη μηχανική συσκευή. Η Μηχανική



ασχολείται με το σχεδιασμό των μηχανικών εξαρτημάτων, τους βραχίονες, τα άκρα (end-effectors), και είναι επίσης υπεύθυνη για την κινηματική, τη δυναμική και των αναλύσεων ελέγχου των ρομπότ. Η Ηλεκτρολογική Μηχανική εργάζεται σε ενεργοποιητές ρομπότ, αισθητήρες, δύναμη, και συστήματα ελέγχου των ρομπότ. Η Μηχανική Σχεδιασμού Συστημάτων ασχολείται με την αντίληψη, την αίσθηση, και τις μεθόδους ελέγχου των ρομπότ. Ο Προγραμματισμός, ή Μηχανική λογισμικού, είναι υπεύθυνη για τη λογική, τη νοημοσύνη, την επικοινωνία και τη δικτύωση [2].

Τα ρομπότ βρίσκουν έναν τεράστιο αριθμό βιομηχανικών εφαρμογών και χρησιμοποιούνται για διάφορες τεχνολογικές λειτουργίες. Τα ρομπότ ενισχύουν την παραγωγικότητα της εργασίας στη βιομηχανία και προσφέρουν ανακούφιση από κουραστικές, μονότονες ή επικίνδυνες εργασίες. Επιπλέον, τα ρομπότ εκτελούν πολλές εργασίες καλύτερα από ό,τι οι άνθρωποι, και παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Σε πολλούς τομείς, τα υψηλά τεχνολογικά πρότυπα δύσκολα καθίστανται εφικτά χωρίς τη χρήση των ρομπότ. Εκτός από τη βιομηχανία, τα ρομπότ χρησιμοποιούνται σε ακραία περιβάλλοντα. Μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, δεν χρειάζονται φωτισμό, ανάπαυση, καθαρό αέρα, μισθό, ή προαγωγές [2].

Τα ρομπότ είναι μηχανές με προοπτικές, των οποίων τα πεδία εφαρμογής διευρύνονται και οι δομές τους γίνονται όλο και πιο περίπλοκες. Στην Εικόνα 1.1 απεικονίζεται ένας ρομποτικός βραχίονας υψηλής απόδοσης [2].



**Εικόνα 1.1:** Ρομποτικός βραχίονας υψηλής απόδοσης.

Υπάρχει ο ισχυρισμός ότι τα ρομπότ λειτουργούν σε αποδόσεις 4A για 4D ή 3D3H περιβάλλοντα. Πιο συγκεκριμένα [2]:

- **4A:** Πρόκειται για αποδόσεις αυτοματισμού, αύξησης, βοήθειας και αυτονομίας.

- **4D:** Πρόκειται για περιβάλλοντα βρώμικα, επικίνδυνα, θολά, και δύσκολα.
- **3D3H:** Πρόκειται για περιβάλλοντα θολά, βρώμικα, επικίνδυνα, ζεστά, βαριά και ριψοκίνδυνα.

## 1.2. Μέρη ρομποτικού βραχίονα

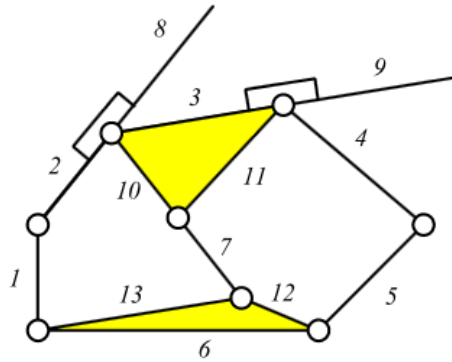
### 1.2.1. Γενικά

Οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούνται κινηματικά από συνδέσμους (links) που συνδέονται με τις αρθρώσεις (joints) για να σχηματίσουν μια κινηματική αλυσίδα. Παρ' όλ' αυτά, ένα ρομπότ ως σύστημα, αποτελείται από ένα βραχίονα ή rover, ένα καρπό (wrist), ένα άκρο, ενεργοποιητές, αισθητήρες, ελεγκτές, επεξεργαστές, και το λογισμικό [2].

### 1.2.2. Σύνδεσμος

Τα επιμέρους μέρη που απαρτίζουν ένα ρομπότ ονομάζονται σύνδεσμοι. Στη ρομποτική μερικές φορές χρησιμοποιείται ο όρος «χέρι» (arm) με τη σημασία του συνδέσμου.. Ένα ρομποτικό χέρι ή ένας ρομποτικός σύνδεσμος είναι ένα άκαμπτο μέλος το οποίο μπορεί να έχει σχετική κίνηση σε σχέση με όλους τους άλλους συνδέσμους. Από κινηματική άποψη, δύο ή περισσότερα μέλη που συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε α μη μπορεί να λάβει χώρα καμμία κίνηση μεταξύ τους, θεωρούνται ως ένα ενιαίος σύνδεσμος [2].

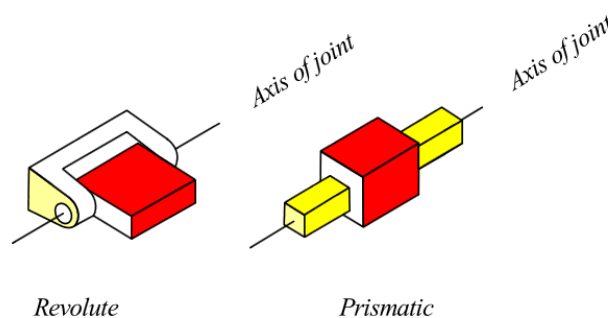
Ως παράδειγμα, παρατίθεται η δομή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.2. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται ένας μηχανισμός με 7 συνδέσεις. Δεν μπορεί να υπάρξει οποιαδήποτε σχετική κίνηση μεταξύ των ράβδων 3, 10, και 11. Ως εκ τούτου, αυτές θεωρούνται ως ένας σύνδεσμος, ας πούμε σύνδεσμος 3. Οι ράβδοι 6, 12, και 13 έχουν την ίδια κατάσταση και να υπολογίζονται ως ένας σύνδεσμος, ας πούμε σύνδεσμος 6. Οι ράβδοι 2 και 8 είναι σταθερά προσαρτημένες, δημιουργώντας ένα μόνο σύνδεσμο, ας πούμε τον σύνδεσμο 2. Οι ράβδοι 3 και 9 έχουν την ίδια σχέση όπως οι ράβδοι 2 και 8, και αποτελούν επίσης ένα σύνδεσμο, ας πούμε σύνδεσμος 3 [2].



**Εικόνα 1.2:** Επίπεδη παρουσίαση συνδεσμολογίας δύο βρόχων με 7 συνδέσεις και 8 αρθρώσεις περιστροφής.

### 1.2.3. Άρθρωση

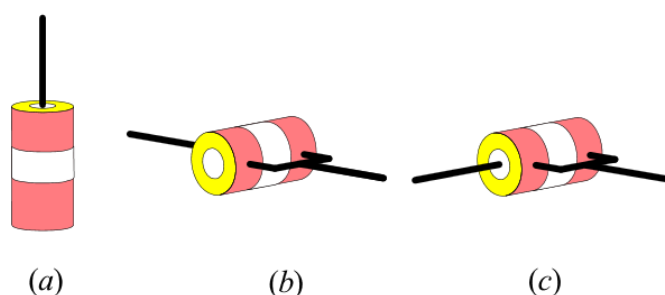
Δύο σύνδεσμοι συνδέονται με επαφή σε μια άρθρωση, όπου η σχετική κίνησή τους μπορεί να εκφραστεί από μία συντεταγμένη. Οι αρθρώσεις είναι συνήθως περιστροφικές (revolute, καμπύλες) ή πρισματικές (prismatic, μετατόπισης). Η Εικόνα 1.3 απεικονίζει τη γεωμετρική μορφή μιας περιστροφικής και μιας πρισματικής άρθρωσης. Μια καμπύλη άρθρωση (R), είναι σαν ένας αρμός και επιτρέπει τη σχετική περιστροφή μεταξύ δύο συνδέσμων. Μια πρισματική άρθρωση (P), επιτρέπει μια μετατόπιση της σχετικής κίνησης μεταξύ δύο συνδέσμων [2].



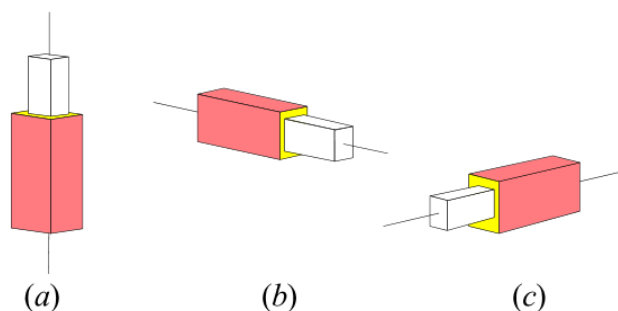
**Εικόνα 1.3:** Απεικόνιση της περιστροφικής (revolute) και πρισματικής (prismatic) άρθρωσης. Φαίνονται οι άξονες άρθρωσης.

Η σχετική περιστροφή των συνδεδεμένων συνδέσμων σε μια κοινή περιστροφική άρθρωση, λαμβάνει χώρα γύρω από μια γραμμή που ονομάζεται

άξονας της άρθρωσης. Επίσης, η μετατόπιση των δύο συνδεδεμένων συνδέσμων σε μια πρισματική άρθρωση, εμφανίζεται κατά μήκος μιας γραμμής που ονομάζεται επίσης άξονας της άρθρωσης. Η τιμή της συντεταγμένης που περιγράφει τη σχετική θέση των δύο συνδεδεμένων συνδέσμων σε μια άρθρωση, ονομάζεται συντεταγμένη της άρθρωσης ή μεταβλητή της άρθρωσης. Για μια περιστροφική άρθρωση, είναι γωνία, ενώ για μια πρισματική είναι απόσταση. Μια συμβολική απεικόνιση της περιστροφικής και της πρισματικής άρθρωσης στη ρομποτική εμφανίζονται στις Εικόνες 1.4(a)-(c) και 1.5(a)-(c) αντίστοιχα [2].



**Εικόνα 1.4:** Συμβολική απεικόνιση περιστροφικής άρθρωσης στα ρομποτικά μοντέλα.



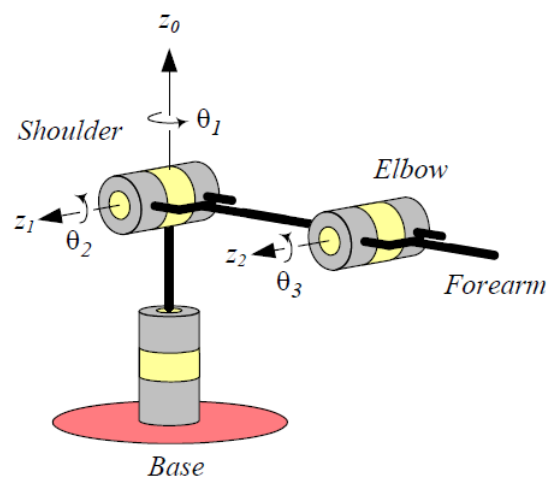
**Εικόνα 1.5:** Συμβολική απεικόνιση πρισματικής άρθρωσης στα ρομποτικά μοντέλα.

Η συντεταγμένη μιας δραστικής άρθρωσης ελέγχεται από έναν ενεργοποιητή (actuator). Μια παθητική άρθρωση δεν έχει κανέναν ενεργοποιητή. Η συντεταγμένη μιας παθητικής άρθρωσης είναι μια συνάρτηση των συντεταγμένων των ενεργών αρθρώσεων και της γεωμετρίας των ρομποτικών βραχιόνων. Οι παθητικές αρθρώσεις ονομάζονται επίσης ανενεργές ή ελεύθερες αρθρώσεις. Οι ενεργές αρθρώσεις είναι συνήθως πρισματικές ή περιστροφικές, ωστόσο, οι παθητικές αρθρώσεις μπορεί να είναι οποιεσδήποτε από τα κατώτερα ζεύγη αρθρώσεων που παρέχουν επιφάνεια

επαφής. Υπάρχουν έξι διαφορετικά κατώτερα ζευγάρια αρθρώσεων: περιστροφικές, πρισματικές, κυλινδρικές, βίδας, σφαιρικές και επίπεδες. Οι περιστροφικές και και πρισματικές αρθρώσεις είναι οι πιο κοινές αρθρώσεις που χρησιμοποιούνται στους σειριακούς ρομποτικούς βραχίονες. Οι άλλοι τύποι αρθρώσεων είναι κοινές υλοποιήσεις απλώς για να επιτευχθεί η ίδια λειτουργία ή να παρέχουν πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας (Degrees Of Freedom, DOF). Οι περιστροφικές και πρισματικές αρθρώσεις παρέχουν ένα βαθμό ελευθερίας. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των αρθρώσεων του βραχίονα είναι οι βαθμοί ελευθερίας (DOF) του βραχίονα. Συνήθως ο βραχίονας πρέπει να διαθέτει τουλάχιστον έξι βαθμούς ελευθερίας: Τρεις για την τοποθέτηση και τρεις για τον προσανατολισμό. Ένας βραχίονας που έχει πάνω από έξι DOF αναφέρεται ως ένα κινηματικά περιττός βραχίονας (manipulator, [2]).

#### 1.2.4. Βραχίονας

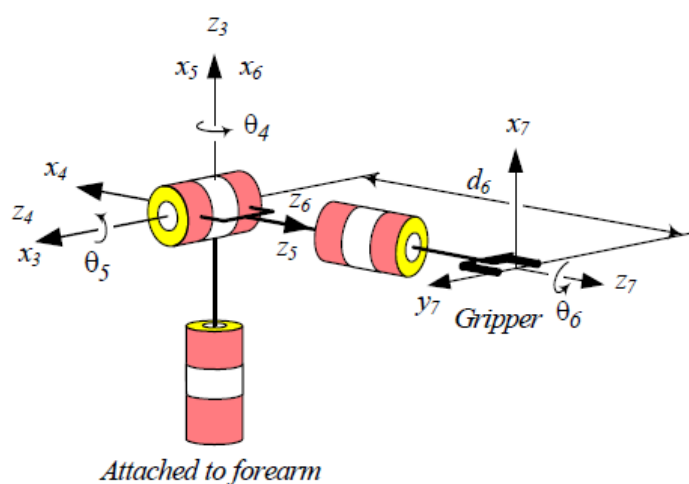
Το κύριο σώμα του ρομπότ που αποτελείται από τους συνδέσμους, τις αρθρώσεις, και άλλα δομικά στοιχεία, καλείται βραχίονας (manipulator). Ένας βραχίονας γίνεται ρομπότ, όταν συνδέονται ο καρπός και η αρπάγη, και το σύστημα ελέγχου υλοποιείται. Παρ' όλ' αυτά, στη βιβλιογραφία οι όροι ρομπότ και βραχίονας χρησιμοποιούνται ισοδύναμα και αναφέρονται και οι δύο σε ρομπότ. Στην Εικόνα 1.6 παρουσιάζεται σχηματικά ένας βραχίονας 3R [2].



**Εικόνα 1.6:** Απεικόνιση ενός βραχίονα 3R.

### 1.2.5. Καρπός

Οι αρθρώσεις στην κινηματική αλυσίδα ενός ρομπότ ανάμεσα στο αντιβράχιο (πήχης, forearm) και στο άκρο αναφέρονται ως καρπός (wrist). Είναι σύνηθες να σχεδιάζονται βραχίονες με σφαιρικό καρπό, κάτι που σημαίνει ότι τρεις περιστροφικές αρθρώσεις τέμνονται σε ένα κοινό σημείο που ονομάζεται σημείο του καρπού. Στην Εικόνα 1.7 παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση ενός σφαιρικού καρπού, η οποία είναι ένας μηχανισμός R-R-R [2].



**Εικόνα 1.7:** Απεικόνιση κινηματικής σφαιρικού καρπού.

Ο σφαιρικός καρπός απλοποιεί αποτελεσματικά και σε μεγάλο βαθμό την κινηματική ανάλυση, επιτρέποντάς μας να αποσυνδέσουμε την τοποθέτηση και τον προσανατολισμό του άκρου. Ως εκ τούτου, ο βραχίονας θα διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας για τη θέση, οι οποίοι παράγονται από τρεις αρθρώσεις του. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τον προσανατολισμό τότε θα εξαρτηθεί από τον καρπό. Μπορούμε να σχεδιάσουμε έναν καρπό ο οποίος θα έχει έναν, δύο, ή τρεις DOF ανάλογα με την εφαρμογή [2].

### **1.2.6. Άκρο**

Το άκρο τελεστής (end effector) ή, πιο απλά, άκρο, είναι το μέρος που τοποθετείται στον τελευταίο σύνδεσμο, ώστε να επιτελέσει την απαιτούμενη από το ρομπότ εργασία. Το απλούστερο άκρο είναι μία αρπάγη, η οποία συνήθως είναι ικανή για μόνο δύο: άνοιγμα και το κλείσιμο. Οι συνδεσμολογίες βραχίονα και καρπού χρησιμοποιούνται κυρίως για την τοποθέτηση του τελικού άκρου και οποιοδήποτε εργαλείου μπορεί να μεταφέρει. Είναι το άκρο ή το εργαλείο εκείνο που εκτελεί πράγματι την εργασία. Ένα μεγάλο μέρος της έρευνας είναι αφιερωμένο στο σχεδιασμό των άκρων καθώς επίσης και ειδικών εργαλείων. Υπάρχει, επίσης, εκτεταμένη έρευνα για την ανάπτυξη ανθρωπόμορφων χεριών. Αυτά τα χέρια έχουν αναπτυχθεί για την προσθετική χρήση στην κατασκευαστική. Ως εκ τούτου, ένα ρομπότ αποτελείται από ένα κύριο βραχίονα (mainframe) και ένα καρπό συν ένα εργαλείο. Η συνδεσμολογία του καρπού και του άκρου ονομάζεται επίσης χέρι (hand, [2]).

### **1.2.7. Ενεργοποιητής**

Οι ενεργοποιητές (actuators) είναι οι οδηγοί που ενεργούν ως μυς των ρομπότ ώστε να αλλάζουν τη διαμόρφωσή τους. Οι ενεργοποιητές παρέχουν ισχύ στη μηχανική δομή ώστε να δρα ενάντια στη βαρύτητα, την αδράνεια, και άλλες εξωτερικές δυνάμεις, ώστε να τροποποιηθεί η γεωμετρική θέση ρομποτικού βραχίονα. Οι ενεργοποιητές μπορεί να είναι ηλεκτρικοί, υδραυλικοί, ή πεπιεσμένου αέρα και πρέπει να είναι ελεγχόμενοι [2].

### **1.2.8. Αισθητήρας**

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό και τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την εσωτερική και περιβαλλοντική κατάσταση λέγονται αισθητήρες (sensors). Η θέση της άρθρωσης, η ταχύτητα, η επιτάχυνση, και η ισχύς (δύναμη) είναι οι πιο σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να ανιχνεύονται. Ο αισθητήρας, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στο ρομπότ, στέλνουν πληροφορίες για

κάθε σύνδεσμο και άρθρωση στη μονάδα ελέγχου, και η μονάδα ελέγχου καθορίζει τη διαμόρφωση του ρομπότ [2].

### 1.2.9. Ελεγκτής

Η μονάδα ελέγχου (Control Unit) ή ελεγκτής (controller) έχει τρεις ρόλους:

1. Πληροφορίας: Αποτελείται από τη συλλογή και την επεξεργασία των πληροφοριών που παρέχονται από τους αισθητήρες του ρομπότ.
2. Απόφασης: Αποτελείται από το σχεδιασμό της γεωμετρικής κίνησης της δομής του ρομπότ.
3. Επικοινωνίας: Αποτελείται από την οργάνωση των πληροφοριών μεταξύ του ρομπότ και του περιβάλλοντός του.

Η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει τον επεξεργαστή και το λογισμικό [2].

## 1.3. Είδη ρομποτικών

### 1.3.1. Γενικά

Το Ρομποτικό Ινστιτούτο της Αμερικής (Robotics Institute of America, RIA) θεωρεί ως ρομπότ τις Κατηγορίες 3-6 από την ταξινόμηση που ακολουθεί, και η Γαλλική Ένωση Ρομποτικής (Association Française de Robotique, AFR) συνδυάζει τις Κατηγορίες 2, 3, και 4, ως ιδίου τύπου και χωρίζει τα ρομπότ σε 4 τύπους. Ωστόσο, η Ιαπωνική Βιομηχανική Ένωση Ρομπότ (Japanese Industrial Robot Association) χωρίζει τα ρομπότ σε 6 διαφορετικές κατηγορίες [2]:

- **Κατηγορία 1-Συσκευές Χειρωνακτικού Χειρισμού (Manual Handling Devices):** Μια συσκευή με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας που ενεργοποιείται από ένα χειριστή.
- **Κατηγορία 2-Ρομπότ Σταθερής Αλληλουχίας (Fixed Sequence Robot):** Μία συσκευή η οποία εκτελεί τα διαδοχικά στάδια μιας εργασίας, σύμφωνα



με ένα προκαθορισμένο και σταθερό πρόγραμμα.

- **Κατηγορία 3-Ρομπότ Μεταβλητής αλληλουχίας (Variable Sequence Robot):** Μία συσκευή η οποία εκτελεί τα διαδοχικά στάδια μιας εργασίας σύμφωνα με μια προκαθορισμένη αλλά προγραμματιζόμενη μέθοδο.
- **Κατηγορία 4-Αναπαραγωγή ρομπότ (Playback Robot):** Ένας χειριστής (άνθρωπος) εκτελεί το έργο χειρωνακτικά οδηγώντας το ρομπότ, το οποίο καταγράφει τις κινήσεις για μετέπειτα αναπαραγωγή. Το ρομπότ επαναλαμβάνει τις ίδιες κινήσεις, σύμφωνα με την καταγεγραμμένη πληροφορία.
- **Κατηγορία 5-Ρομπότ Αριθμητικού Ελέγχου Αριθμητική (Numerical Control Robot):** Ο χειριστής τροφοδοτεί το ρομπότ με ένα πρόγραμμα κίνησης αντί να του διδάσκει την εργασία χειρωνακτικά.
- **Κατηγορία 6-Ευφυές Ρομπότ (Intelligent robot):** Ένα ρομπότ με την ικανότητα να κατανοεί το περιβάλλον του και την ικανότητα να ολοκληρώνει με επιτυχία ένα έργο παρά τις αλλαγές στις περιβάλλουσες συνθήκες υπό τις οποίες πρόκειται να πραγματοποιηθεί.

Εκτός από αυτές τις επίσημες κατηγορίες, τα ρομπότ μπορούν να ταξινομηθούν με βάση άλλα κριτήρια, όπως η γεωμετρία, ο χώρος εργασίας, η ενεργοποίηση, ο έλεγχος και η εφαρμογή. Στη συνέχεια γίνεται μια σχετική αναφορά σ' αυτές τις μεθόδους ταξινόμησης [2].

### 1.3.2. Γεωμετρία

Ένα ρομπότ ονομάζεται σειριακός (serial) βραχίονας ή βραχίονας ανοικτού βρόχου (open-loop), αν η κινηματική δομή της δεν σχηματίζει αλυσίδα βρόχου. Επιπλέον, ονομάζεται παράλληλος (parallel) βραχίονας ή βραχίονας κλειστού βρόχου (closed-loop), αν η δομή του σχηματίζει αλυσίδα βρόχου. Ένα ρομπότ ονομάζεται υβριδικός βραχίονας εάν η δομή του αποτελείται από τόσο από ανοικτές όσο και κλειστές αλυσίδες βρόχου [2].

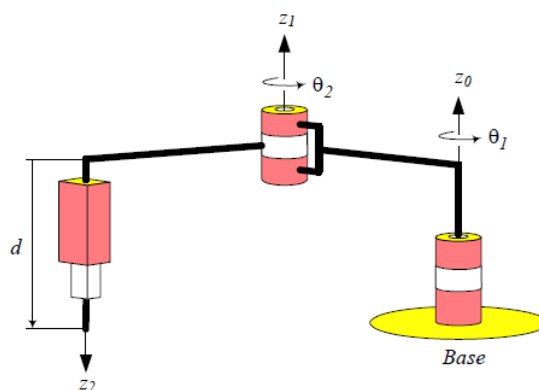
Ως ένα μηχανικό σύστημα, μπορούμε να σκεφτούμε ένα ρομπότ ως ένα σύνολο άκαμπτων σωμάτων που συνδέονται μεταξύ τους σε μερικές αρθρώσεις. Οι

αρθρώσεις μπορεί να είναι είτε περιστροφικές (revolute, R) ή πρισματικές (prismatic, P), διότι οποιοδήποτε άλλο είδος άρθρωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας συνδυασμός αυτών των δύο απλών αρθρώσεων [2].

Οι περισσότεροι βιομηχανικοί βραχίονες έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας. Οι βραχίονες ανοικτού βρόχου μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις τρεις πρώτες αρθρώσεις τους, ξεκινώντας από τη γειωμένη άρθρωση. Χρησιμοποιώντας τα δύο είδη των αρθρώσεων, υπάρχουν μαθηματικά 72 διαφορετικές διαμορφώσεις βιομηχανικού βραχίονα, απλώς και μόνο επειδή κάθε άρθρωση μπορεί να είναι P ή R, και οι άξονες των δύο παρακείμενων αρθρώσεων μπορεί να είναι παράλληλοι ( $\parallel$ ), ορθογώνιοι ( $\perp$ ) ή κάθετοι ( $\perp$ ). Δύο ορθογώνιοι άξονες αρθρώσεων τέμνονται σε ορθή γωνία, ωστόσο δύο κάθετοι άξονες αρθρώσεων είναι σε ορθή γωνία σε σχέση με το κοινό τους φυσιολογικό (κανονικό, normal). Δύο κάθετοι άξονες αρθρώσεων γίνονται παράλληλοι αν ένας άξονας στραφεί 90 μοίρες γύρω από το κοινό τους φυσιολογικό. Δύο κάθετοι άξονες αρθρώσεων γίνονται ορθογώνιοι εάν το μήκος του κοινού τους φυσιολογικού τείνει στο μηδέν [2].

Από τους 72 πιθανούς βραχίονες, οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι οι [2]:

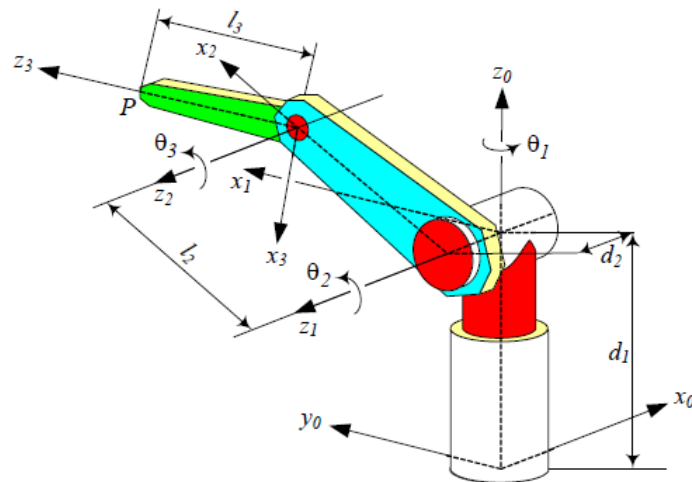
1.  $R\parallel R\parallel P$  (**SCARA**): Ο βραχίονας Αρθρωτό Ρομπότ Επιλεκτικής Συμβατότητας για Συναρμολόγηση (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly, SCARA) παρουσιάζεται στην Εικόνα φαίνεται στο Σχήμα 1.8 και είναι ένας δημοφιλής βραχίονας, ο οποίος, όπως υποδηλώνει η ονομασία του, είναι κατασκευασμένος για εργασίες συναρμολόγησης.



**Εικόνα 1.8:** Ένας βραχίονας  $R\parallel R\parallel P$ .

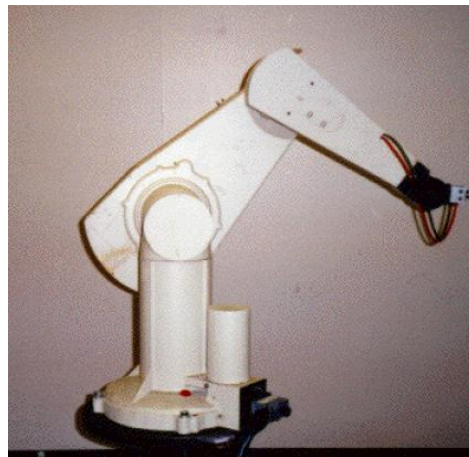
2.  $R\perp R\perp R$  (**Αρθρωτή**): Η διαμόρφωση αυτή, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6, ονομάζεται αγκώνας, περιστροφική, αρθρωτή ή ανθρωπόμορφη. Είναι μια

διαμόρφωση κατάλληλη για βιομηχανικά ρομπότ. Σχεδόν το 25% των βιομηχανικών ρομπότ, όπως για παράδειγμα τα PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly, ), είναι κατασκευές αυτού του είδους. Λόγω της σημασίας του, μια καλύτερη απεικόνιση ενός αρθρωτού ρομπότ παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.9 για να υποδείξει την ονομασία των τμημάτων που την αποτελούν.



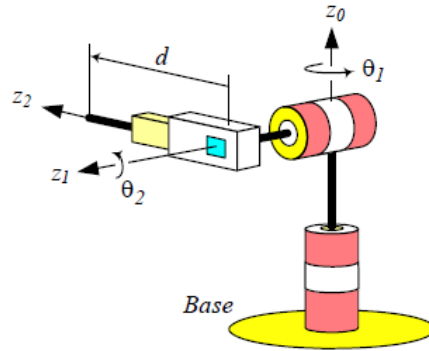
**Εικόνα 1.9:** Δομή και ορολογία ενός βραχίονα-αγκώνα  $R\text{-}R\text{-}R$ .

Στην Εικόνα 1.10 παρουσιάζεται ένας ρομποτικός βραχίονας PUMA [1]:



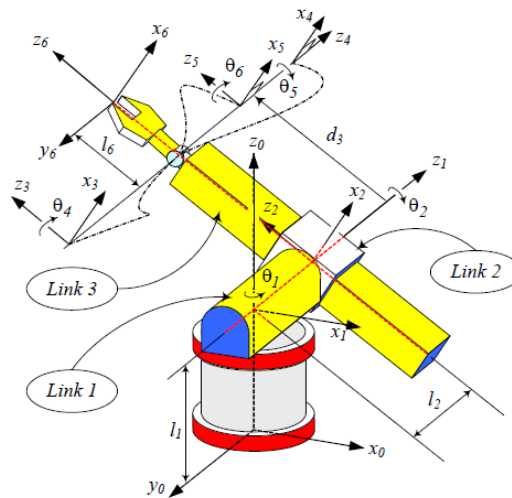
**Εικόνα 1.10:** Ρομποτικός βραχίονας PUMA 560.

3.  $R\text{-}R\text{-}P$  (Σφαιρική): Η σφαιρική διαμόρφωση είναι κατάλληλη για μικρά ρομπότ. Σχεδόν το 15% των βιομηχανικών ρομπότ, όπως για παράδειγμα ο βραχίονας Stanford, είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με αυτήν τη διαμόρφωση. Η διαμόρφωση  $R\text{-}R\text{-}P$  παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.11.



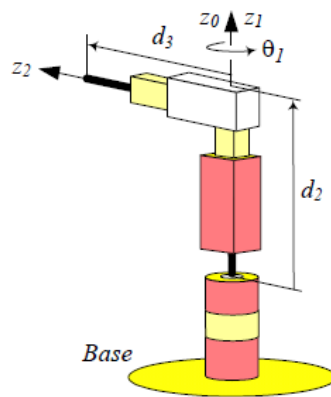
**Εικόνα 1.11:** Η  $R\text{-}R\text{-}P$  διαμόρφωση των σφαιρικών ρομποτικών βραχιόνων.

Με την αντικατάσταση της τρίτης άρθρωσης ενός αρθρωτού βραχίονα με ένα πρισματική άρθρωση, παίρνουμε τον σφαιρικό βραχίονα. Ο όρος σφαιρικός βραχίονας προέρχεται από το γεγονός ότι οι σφαιρικές συντεταγμένες ορίζουν τη θέση του τελικού άκρου σε σχέση με το πλαίσιο της βάσης. Στην Εικόνα 1.12 παρουσιάζεται ο βραχίονας Stanford, ένα από τα πιο γνωστά σφαιρικά ρομπότ.



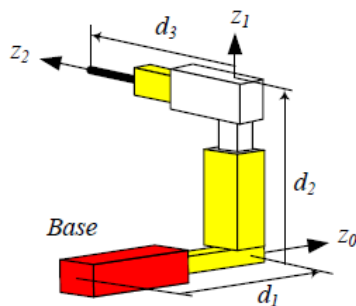
**Εικόνα 1.12:** Ο βραχίονας Stanford, ένας  $R\text{-}R\text{-}P$  σφαιρικός βραχίονας.

4.  $R\parallel P\text{-}P$  (**Κυλινδρική**): Η κυλινδρική διαμόρφωση είναι κατάλληλη για ρομπότ μεσαίου φορτίου. Σχεδόν το 45% των βιομηχανικών ρομπότ είναι αυτού του είδους. Η διαμόρφωση  $R\parallel P\text{-}P$  παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.13. Η πρώτη άρθρωση ενός κυλινδρικού βραχίονα είναι περιστροφική και παράγει μία περιστροφή γύρω από τη βάση, ενώ η δεύτερη και τρίτη αρθρώσεις είναι πρισματικές. Όπως υποδηλώνει το όνομα, οι μεταβλητές άρθρωσης είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες του τελικού άκρου σε σχέση με τη βάση.



**Εικόνα 1.13:** Η διαμόρφωση  $R||P-P$  για ρομποτικούς βραχίονες.

5.  $P-P-P$  (**Καρτεσιανή**): Η καρτεσιανή διαμόρφωση είναι κατάλληλη για χωρητικότητα βαρέος φορτίου μεγάλα ρομπότ. Σχεδόν το 15% των βιομηχανικών ρομπότ είναι αυτής της διαμόρφωσης. Η διαμόρφωση  $P-P-P$  παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.14.



**Εικόνα 1.14:** Η  $P-P-P$  διαμόρφωση για καρτεσιανούς ρομποτικούς βραχίονες.

Για ένα καρτεσιανό βραχίονα, οι μεταβλητές αρθρώσεων είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του τελικού άκρου σε σχέση με τη βάση. Όπως ήταν αναμενόμενο, η κινηματική περιγραφή αυτού του βραχίονα είναι η απλούστερη όλων των βραχιόνων. Οι καρτεσιανοί βραχίονες είναι χρήσιμοι για επιτραπέζιες εφαρμογές συναρμολόγησης και, ως ρομπότ γερανογέφυρας, για τη μεταφορά φορτίου.

### 1.3.3. Χώρος εργασίας

Ο χώρος εργασίας του ενός βραχίονα είναι ο συνολικός όγκος του χώρου τον οποίο μπορεί να φτάσει το άκρο. Ο χώρος εργασίας περιορίζεται από τη γεωμετρία του βραχίονα καθώς και τις μηχανικούς περιορισμούς στις αρθρώσεις. Ο χώρος εργασίας διαιρείται στον προσβάσιμο (reachable) χώρο εργασίας και στον επιδέξιο (dexterous) χώρο εργασίας [2]:

- **Προσβάσιμος χώρος εργασίας:** Είναι ο όγκος του χώρου εντός του οποίου κάθε σημείο είναι προσβάσιμο από το άκρο σε τουλάχιστον μία κατεύθυνση.
- **Επιδέξιος χώρος εργασίας:** Είναι ο όγκος του χώρου εντός του οποίου κάθε σημείο είναι προσβάσιμο σε όλες τις πιθανές κατευθύνσεις. Ο επιδέξιος χώρος εργασίας είναι ένα υποσύνολο του προσβάσιμου χώρου εργασίας.

Οι περισσότεροι από τους βραχίονες αλυσίδας ανοικτού βρόχου είναι σχεδιασμένοι με μία συναρμολόγηση καρπού συνδεδεμένη με την κύρια δομή τριών συνδέσμων. Ως εκ τούτου, οι τρεις πρώτοι σύνδεσμοι είναι μακρείς και χρησιμοποιούνται για τοποθέτηση, ενώ ο καρπός χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τον προσανατολισμό του τελικού άκρου. Γι' αυτόν τον λόγο το υποσυγκρότημα που αποτελείται από τους τρεις πρώτους συνδέσμους ονομάζεται βραχίονας (μπράτσο, arm), και το υποσυγκρότημα που αποτελείται από τους άλλους συνδέσμους ονομάζεται καρπός (wrist, [2]).

### 1.3.4. Ενεργοποίηση

Οι ενεργοποιητές μετατρέπουν την ενέργεια σε κίνηση. Τα ρομπότ συνήθως ενεργοποιούνται ηλεκτρικά, υδραυλικά ή με πεπιεσμένο αέρα. Άλλοι τύποι ενεργοποίησης είναι πιεζοηλεκτρικοί, μαγνητοσυστολής, κράμα μνήμης σχήματος, και πολυμερείς. Τα ρομπότ που ενεργοποιούνται ηλεκτρικά τροφοδοτούνται με κινητήρες εναλλασσόμενου (AC) ή συνεχούς (DC) ρεύματος και θεωρούνται ως τα πλέον αποδεκτά ρομπότ. Είναι καθαρότερα, πιο ήσυχα και πιο ακριβή σε σύγκριση με αυτά που ενεργοποιούνται υδραυλικά ή με πεπιεσμένο αέρα [2].

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι αποτελεσματικοί σε υψηλές ταχύτητες, κι έτσι απαιτείται ένα κιβώτιο ταχυτήτων υψηλή αναλογίας για να μειώσει την υψηλή ταχύτητα. Η μη ανάστροφη οδηγισιμότητα (Non-backdriveability) και ένα σύστημα αυτόματης πέδησης (self-breaking) αποτελούν πλεονεκτήματα των κιβωτίων ταχυτήτων υψηλής αναλογίας σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Εν τούτοις, όταν απαιτείται υψηλή ταχύτητα ή δυνατότητα μεταφοράς μεγάλου φορτίου, οι ηλεκτρικοί οδηγοί δεν είναι σε θέση να ανταγωνιστούν με τους υδραυλικούς οδηγούς [2].

Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές είναι ικανοποιητικοί λόγω της υψηλής ταχύτητας και λόγω υψηλών αναλογιών ροπής/μάζα ή ισχύος/μάζα. Ως εκ τούτου, τα υδραυλικά καθοδηγούμενα ρομπότ χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανύψωση βαρέων φορτίων. Αρνητικές πτυχές των υδραυλικών, εκτός από τον θόρυβο και την τάση για διαρροή, είναι περιλαμβάνουν μια απαραίτητη αντλία και διαφορετικό hardware [2].

Τα ρομπότ που ενεργοποιούνται με πεπιεσμένο αέρα φθηνά και απλά, αλλά δεν μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια. Εκτός από το κατώτερη ακρίβεια κίνησης, έχουν σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όπως και τα υδραυλικά ενεργοποιούμενα ρομπότ [2].

### 1.3.5. Έλεγχος

Τα ρομπότ μπορούν να ταξινομηθούν με τη μέθοδο ελέγχου σε σερβο (servo, έλεγχος κλειστού βρόχου) και μη-σερβο (non-servo, έλεγχος ανοικτού βρόχου) ρομπότ. Τα servo ρομπότ χρησιμοποιούν έλεγχο κλειστού βρόχου με τη χρήση υπολογιστή για να καθορίσει την κίνησή τους και έτσι είναι ικανά να είναι πραγματικά πολυλειτουργικά επαναπρογραμματιζόμενες συσκευές. Τα servo ελεγχόμενα ρομπότ ταξινομούνται ταξινομούνται σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής για να καθοδηγήσει το άκρο [2].

Ο απλούστερος τύπος ενός servo ρομπότ είναι το ρομπότ σημείο-προς-σημείο (point-to-point). Ένα ρομπότ σημείο-προς-σημείο μπορεί να διδαχθεί ένα διακριτό σύνολο σημείων, τα οποία ονομάζονται σημεία ελέγχου, αλλά δεν υπάρχει κανένας έλεγχος επί της διαδρομής του άκρου τελικού ενεργοποιητού ανάμεσα στα σημεία. Από την άλλη πλευρά, στα ρομπότ συνεχούς διαδρομής (continuous path), ολόκληρη η διαδρομή του άκρου μπορεί να ελεγχθεί. Για παράδειγμα, το άκρο του ρομπότ μπορεί να διδαχθεί να ακολουθήσει μια ευθεία γραμμή μεταξύ δύο σημείων ή ακόμη

και να ακολουθήσει ένα περίγραμμα όπως μία ραφή συγκόλλησης. Επιπλέον, η ταχύτητα ή/και η επιτάχυνση του άκρου ενεργοποιητού μπορούν να ελεγχθούν. Αυτά είναι τα πιο προηγμένα ρομπότ και απαιτούν τους πιο εξελιγμένους υπολογιστικούς ελεγκτές ανάπτυξη λογισμικού [2].

Τα non-servo ρομπότ είναι ουσιαστικά συσκευές ανοικτού βρόχου των οποίων η κίνηση περιορίζεται σε προκαθορισμένα μηχανικά στοπ, και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά υλικών [2].

### 1.3.6. Εφαρμογή

Ανεξάρτητα από το μέγεθος, τα ρομπότ μπορούν κυρίως να ταξινομηθούν ανάλογα με την εφαρμογή τους σε ρομπότ συναρμολόγησης (assembly) και μη-συναρμολόγησης (non-assembly). Ωστόσο, στη βιομηχανία ταξινομούνται σύμφωνα με την κατηγορία εφαρμογής όπως φόρτωσης μηχανήματος (machine loading), μεταφοράς (pick and place), συγκόλλησης (welding), βαφής (painting), συναρμολόγησης (assembly), επιθεώρησης (inspecting), δειγματοληψίας (sampling), κατασκευής (manufacturing), βιοϊατρικής (biomedical), παροχής βοήθειας (assisting), κινητά με τηλεχειρισμό (remote controlled mobile), και τηλερομπότ (telerobot, [2]).

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού, οι περισσότεροι βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες ρομπότ είναι ανθρωπομορφικοί, με την έννοια ότι έχουν έναν «ώμο» (shoulder, οι δύο πρώτες αρθρώσεις) έναν «αγκώνα» (elbow, τρίτη άρθρωση) και έναν «καρπό» (wrist, οι τρεις τελευταίες αρθρώσεις). Ως εκ τούτου, συνολικά, έχουν συνήθως τους έξι βαθμούς ελευθερίας που χρειάζονται για να τοποθετηθεί ένα αντικείμενο σε κάθε θέση και προσανατολισμό [2].

Οι περισσότεροι εμπορικοί σειριακοί ρομποτικοί βραχίονες έχουν μόνο περιστροφικές αρθρώσεις. Σε σύγκριση με τις πρισματικές αρθρώσεις, οι περιστροφικές κοστίζουν λιγότερο και παρέχουν μεγαλύτερο επιδέξιο χώρο εργασίας για τον ίδιο όγκο ρομπότ. Τα σειριακά ρομπότ είναι πολύ βαριά, σε σύγκριση με το μέγιστο φορτίο που μπορούν να μετακινήσουν να χαλαρώσει η ακρίβειά τους. Ο χρήσιμος λόγος τους φορτίο-προς-βάρος είναι μικρότερος από 1/10. Τα ρομπότ είναι τόσο βαριά, επειδή οι αρθρώσεις πρέπει να είναι σκληρές, ώστε να λειτουργούν άκαμπτα. Η απλότητα της κινηματικής των προς τα εμπρός και αντίστροφα θέσης και ταχύτητας ήταν ανέκαθεν ένα από τα κύρια κριτήρια σχεδιασμού για τους



βιομηχανικούς βραχίονες. Ως εκ τούτου, σχεδόν όλοι τους έχουν μια ειδική κινηματική δομή [2].

#### **1.4. Σκοπός της Εργασίας**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η θεωρητική προσέγγιση της μελέτης και κατασκευής ενός ρομποτικού βραχίονα.

Έχοντας ήδη περιγράψει τα βασικά στοιχεία ενός ρομποτικού βραχίονα στην Εισαγωγή, τα υπόλοιπα Κεφάλαια δομούνται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2, περιγράφονται κάποιες χρήσεις ρομπότ τόσο στη βιομηχανία, όσο και στην καθημερινή ζωή.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται η σχεδίαση των τμημάτων ενός ρομποτικού βραχίονα, με τη χρήση του προγράμματος SOLIDWORKS.

Στο Κεφάλαιο 4, περιγράφονται οι εξισώσεις των κινητήρων που παρέχουν την κίνηση στα τμήματα ενός ρομποτικού βραχίονα.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η οικονομική μελέτη για την κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα που απασχόλησε το παρόν εργαστήριο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα.

## **2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ**

Τα ρομπότ βρίσκουν ένα πλήθος εφαρμογών τόσο στη βιομηχανία, όσο και στην καθημερινότητα. Στο παρόν Κεφάλαιο επιχειρείται η παράθεση ορισμένων από τις κύριες εφαρμογές τους

### **2.1. Γενικές Εφαρμογές**

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκαν ορισμένες εφαρμογές των ρομπότ [2]:

- Φόρτωση
- Μεταφορά
- Συγκόλληση
- Βαφή
- Συναρμολόγηση
- Δειγματοληψία
- Κατασκευή
- Βιοϊατρικές εφαρμογές
- Παροχή βοήθειας

Πέραν αυτών, και όπως είναι αναμενόμενο, τα ρομπότ χρησιμοποιούνται συνήθως σε περιβάλλοντα ή εργασίες στις οποίες ο άνθρωπος δεν μπορεί να επιτελέσει έργο ή απλά δεν δέχεται. Ορισμένες από αυτές παρατίθενται κατωτέρω.

#### **2.1.1. Εργασίες οι οποίες είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο**

Τέτοιες θα μπορούσαν να είναι εργασίες σε ραδιενεργά περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα η απολύμανση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ένα ρομπότ σε μια τέτοια εργασία [1].



**Εικόνα 2.1:** Ρομπότ καθαρίζει το περίβλημα της κύριας αντλίας κυκλοφορίας ενός πυρηνικού σταθμού.

Στην Παράγραφο 2.2.1., γίνεται μια πιο λεπτομερής αναφορά σε αυτές τις εφαρμογές.

### **2.1.2. Εργασίες οι οποίες είναι επαναλαμβανόμενες**

Τέτοιες εργασίες μπορούν να είναι βαρετές, στρεσογόνες ή έντονα κουραστικές. Τέτοια παραδείγματα είναι οι εργασίες φόρτωσης, συγκόλλησης, και βαφής. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται ένα ρομπότ συγκόλλησης [1].



**Εικόνα 2.2:** Ρομπότ που επιτελεί εργασία συγκόλλησης.

### **2.1.3. Ταπεινωτικές Εργασίες**

Είναι εργασίες τις οποίες ένας άνθρωπος ενδεχομένως θα αρνούταν να εκτελέσει. Τέτοιες εργασίες θα μπορούσαν να είναι για παράδειγμα ο καθαρισμός κοινόχρηστων χώρων. Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται ένα ρομπότ να επιτελεί μια τέτοια εργασία [1].



**Εικόνα 2.3:** Το ρομπότ SCRUBMATE.

#### **2.1.4. Άλλες Εργασίες**

Υπάρχει ένα πλήθος εργασιών, βιομηχανικών και μη, στις οποίες βρίσκουν χρήση τα ρομπότ. Ενδεικτικά [1]:

- Γεωργία
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Κατασκευές
- Διασκέδαση
- Υγειονομική περίθαλψη: Νοσοκομεία, φροντίδα ασθενών, χειρουργική επέμβαση, έρευνα κ.λπ.
- Εργαστήρια: Επιστημών, Μηχανικής κ.λπ.
- Επιβολή του νόμου: Επιτήρηση, περιπολία κ.λπ.
- Παραγωγή
- Στρατός: Αποναρκοθέτηση, επιτήρηση, την επίθεση κ.λπ.
- Εξόρυξη ανασκαφή και εξερεύνηση
- Μεταφορές: Αέρος, εδάφους, σιδηροδρομικές, διαστήματος κ.λπ.
- Υπηρεσίες κοινής ωφέλειας: φυσικό αέριο, νερό και ηλεκτρικό
- Αποθήκες

## 2.2. Συντήρηση και Επισκευή

Τα ρομπότ, είτε τηλεχειριζόμενα (υπό εποπτικό έλεγχο), είτε αυτόνομα, έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών στη συντήρηση και την επισκευή. Οι επόμενες υποπαράγραφοι περιγράφουν πολλά από αυτά τα συστήματα, εστιάζοντας κυρίως στις εφαρμογές για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές πρωτότυπων ρομπότ [3].

### 2.2.1. Πυρηνική Βιομηχανία

Στην πυρηνική βιομηχανία, οι τηλεχειριστές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ρόλο συντήρησης για περισσότερο από τέσσερις δεκαετίες. Αρκετά χαρακτηριστικά της συντήρησης αποτελούν καλά πεδία εφαρμογής για τους τηλεχειριστές. Πρώτον, είναι η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας, η οποία απαιτεί καλεί για ένα σύστημα γενικής χρήσης ικανό να επιτελέσει μια σειρά από εργασίες συντήρησης. Δεύτερον, η συντήρηση και η επισκευή απαιτούν υψηλά επίπεδα επιδεξιότητας. Τρίτον, η πολυπλοκότητα των εργασιών αυτών μπορεί να είναι απρόβλεπτη, λόγω της αβεβαιότητας των επιπτώσεων από μια αποτυχία. Για τους λόγους αυτούς, η επιλογή για το ρόλο αυτό είναι συχνά μεταξύ ενός ανθρώπου και ενός τηλεχειριστή [3].

Έτσι, όταν το περιβάλλον είναι επικίνδυνο, η καλύτερη επιλογή είναι συνήθως ένας τηλεχειριστής. Αν άνθρωποι σε προστατευτική ενδυμασία, μπορούν να εκτελέσουν την ίδια δουλειά, τα οφέλη από τηλεχειριστές συνεχώς παρόντες στον τόπο εργασίας, πρέπει να σταθμίζονται έναντι του κόστους της ενδυμασίας και μεταφοράς ανθρώπινου δυναμικού από και προς τον τόπο εργασίας. Ενώ οι άνθρωποι είναι πιθανό να είναι σε θέση να ολοκληρώσουν τις εργασίες πιο γρήγορα από ό,τι οι τηλεχειριστές, η χρήση των τηλεχειριστών πλεονεκτεί στο ότι μπορεί [3]:

1. Να συντομεύσει τον μέσο χρόνο για την επισκευή, με τη μείωση του χρόνου απόκρισης σε αποτυχίες.
2. Να μειώσει τους κινδύνους για την υγεία.
3. Να βελτιώσει την ασφάλεια.
4. Να βελτιώσει τη διαθεσιμότητα, επιτρέποντας τη συντήρηση να λάβει χώρα κατά τη διάρκεια άλλων λειτουργιών, αντί να τις διακόπτει.

Ως παράδειγμα για τη σημασία της χρήσης της ρομποτικής στη συντήρηση στην πυρηνική βιομηχανία, τα Πρακτικά της Τοπικής Συνάντησης για τη ρομποτική και τον τηλεχειρισμό της Αμερικανικής Πυρηνικής Εταιρείας (American Nuclear Society) το 1995, περιελάμβαναν 124 δημοσιεύσεις, σχεδόν το ένα τέταρτο των οποίων ήταν αφιερωμένες σε κάποια πτυχή της συντήρησης. Η Συνάντηση του 1997 περιελάμβανε 150 δημοσιεύσεις, όπου περισσότερο από το 40% σχετιζόταν με κάποια πτυχή της συντήρησης. Επιπλέον, εάν οι εργασίες περιβαλλοντικής αποκατάστασης θεωρηθούν ως μια μορφή συντήρησης, τότε η αναλογία των δημοσιεύσεων στις δύο ανωτέρω Συναντήσεις που σχετιζόνταν με τη συντήρηση, ήταν πολύ μεγαλύτερη [3].

Οι Vertut & Coiffet, κατέταξαν τις παρακάτω εφαρμογές των τηλεχειριζόμενων ρομπότ στον τομέα της πυρηνικής συντήρησης [3]:

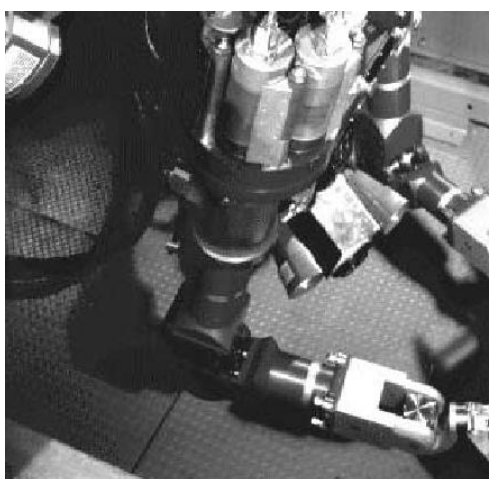
1. Λειτουργία και συντήρηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων και εργαστηρίων πυρηνικής ενέργειας.
2. Συντήρηση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.
3. Παροπλισμό και διάλυση πυρηνικών εγκαταστάσεων.
4. Επείγουσα παρέμβαση.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια πιο λεπτομερής εξέταση των εφαρμογών της ρομποτικής στη συντήρηση πυρηνικών εγκαταστάσεων, σύμφωνα με αυτή την ταξινόμηση [3].

#### *2.2.1.1. Λειτουργία και συντήρηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων και εργαστηρίων πυρηνικής ενέργειας*

Υπάρχουν οδηγίες για την εφαρμογή των τηλεχειριστών σε ρόλους απομακρυσμένης συντήρησης. Δυστυχώς, υπάρχει μια ιστορική τάση να αγνοείται τη σημασία του σχεδιασμού για τη ρομποτική στη συντήρηση, καθώς και τα διδάγματα από τις εμπειρίες του παρελθόντος στην απομακρυσμένη συντήρηση. Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις δεν χρειάζεται απαραίτητα να είναι σχεδιασμένες για ρομποτικές λειτουργίες, ώστε τα ρομπότ να λειτουργήσουν με επιτυχία σε αυτές. Ωστόσο, σχεδιάζοντας μια εγκατάσταση ικανή να φιλοξενήσει ρομποτική συντήρηση βελτιώνει σημαντικά την απόδοση. Ο Chesser, αναφέρει μια εκτεταμένη επίδειξη

συντήρησης επίδειξης που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός τηλεχειριστή, για τη διάλυση και την εκ νέου συναρμολόγηση εξαρτημάτων που κατασκευάζονται για τη ρομποτική συντήρηση. Η επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένων πυρηνικών καυσίμων απαιτεί μια σύνθετη εγκατάσταση εργοστασιακής χημικής επεξεργασίας. Για να δειχθεί ενός τελευταίας τεχνολογίας τηλεχειριστή για την αντικατάσταση των μονάδων εξοπλισμού σε μια τέτοια εγκατάσταση, ο Chesser πραγματοποίησε μια επίδειξη αποσυναρμολόγησης και επανασυναρμολόγησης ενός πρωτότυπου πλαισίου μιας χημικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας τον Προηγμένο Υπερχειριστή του Εργαστηρίου Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge National Laboratory's Advanced Servomanipulator, ASM). Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ο ASM, ο οποίος είναι επίσης εξ αποστάσεως συντηρήσιμος εξ αιτίας του σχεδιασμού του [3].



**Εικόνα 2.4:** Ο Προηγμένος Υπερχειριστής (ASM), σχεδιασμένος για τη συντήρηση πλαισίων χημικής επεξεργασίας, ο οποίος είναι εξ αποστάσεως συντηρήσιμος.

Χρησιμοποιώντας πρότυπα εργαλεία (αερόκλειδα, κασάνια, και ένα γαλλικό κλειδί ροπής), οι χειριστές του ASM ήταν σε θέση να αποσυναρμολογήσουν το πλαίσιο, συμπεριλαμβανομένων των καλυμμάτων των σωληνώσεων, των οργάνων, των κινητήρων, των δεξαμενών κ.λπ. Ως συμπλήρωμα σε αυτή την επίδειξη, χρησιμοποιήθηκε ένας άλλος τηλεχειριστής για την αποσυναρμολόγηση και την εκ νέου συναρμολόγηση του ASM να δείξει τη δυνατότητα της απομακρυσμένης συντήρησής του [3].

Οι επιταχυντές σωματιδίων είναι ένας άλλος τύπος πυρηνικής εγκατάστασης, φαίνεται να έχει παράσχει το μεγαλύτερο μέρος της εμπειρίας στην απομακρυσμένη

συντήρηση. Αυτό το πρόγραμμα παρέχει ολοκληρωμένη χρήση μιας ποικιλίας από απομακρυσμένες συσκευές, συμπεριλαμβανομένης της επιθεώρησης και των συστημάτων επιτήρησης, επιδέξιους χειριστές, και κινητά ρομπότ. Η εφαρμογή του CERN έχει κάποια κοινά χαρακτηριστικά με τις πυρηνικές εφαρμογές [3]:

1. Διαφορετική σειρά των εργασιών συντήρησης.
2. Απρόβλεπτο των εργασιών και γεγονότα.
3. Περιβάλλον επικίνδυνο για τον άνθρωπο.
4. Μεγάλο μέγεθος εγκατάστασης και, ως εκ τούτου, ανάγκη για κινητικότητα.

Η εξελισσόμενη απόκριση σε αυτούς τους παράγοντες εξαρτάται από την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα των ρομποτικών συστημάτων και των χρηστών τους. Υπάρχει επίσης μία τάση προς την παροχή βοήθειας από υπολογιστή κατά τη διάρκεια του τηλεχειρισμού για να βελτιώσει τη συνολική απόδοση [3].

#### *2.2.1.2. Συντήρηση πυρηνικών αντιδραστήρων*

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι ακόμη λιγότερο πιθανό να είναι σχεδιασμένοι για ρομποτική συντήρηση σε σχέση με τις βιομηχανικές πυρηνικές εγκαταστάσεις, οδηγώντας έτσι στη συχνή ανάγκη για καινοτόμες προσεγγίσεις ώστε να επιτευχθεί πρόσβαση σε προβληματικά σημεία. Αυτό, μαζί με περιορισμούς που τίθενται λόγω του μεγέθους που επιβάλλονται από τα σχέδια του αντιδραστήρα, και τα προκύπτοντα μακρά χρονικά διαστήματα που είναι απαραίτητα για την κατασκευή ρομπότ με συγκεκριμένο σκοπό, έχουν περιορίσει στο παρελθόν τη χρήση των ρομπότ σε αυτό το πεδίο. Παρ' όλ' αυτά, τα όλο και αυστηρότερα όρια που θεσπίζονται για την έκθεση των εργαζομένων σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες και οι μειώσεις έκθεσης στην ακτινοβολία που μπορούν να επιτευχθούν με τη ρομποτική συντήρηση, μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση της χρήσης των ρομπότ στο μέλλον. Για τους πειραματικούς αντιδραστήρες σύντηξης, το σκεπτικό της απομακρυσμένης συντήρησης φαίνεται να είναι μια σημαντική πλευρά του σχεδιασμού [3].

Υπάρχουν αρκετά προγράμματα που απευθύνονται στις δυσκολίες της συντήρησης των πυρηνικών αντιδραστήρων. Για παράδειγμα, μια προκαταρκτική ανάλυση των εργασιών που απαιτούνται για τη συντήρηση εργοστασίων πυρηνικής



ενέργειας, καθώς επίσης και των απαιτήσεων που πρέπει να έχουν τα ρομπότ για να επιτελέσουν αυτές τις εργασίες, έχει ολοκληρωθεί από τους Tsukune *et al.* [3]. Επίσης, έχει προταθεί μια σπονδυλωτή προσέγγιση για τη μείωση του κόστους που έχει ο σχεδιασμός προσαρμοσμένων ρομπότ, και τα προβλήματα στο χειρισμό των εργαλείων και εξαρτημάτων που προορίζονται αποκλειστικά για χρήση από τον άνθρωπο, έχουν αντιμετωπιστεί με την ανάπτυξη πιο επιδέξιων ρομποτικών αρπάγων [3].

### 2.2.1.3. Παροπλισμός και διάλυση πυρηνικών εγκαταστάσεων

Στις ΗΠΑ, το θέμα αυτό λαμβάνει σήμερα πολλή προσοχή στην κοινότητα του Υπουργείου Ενέργειας (Department of Energy community, [3]). Το 1998, χρονιά συγγραφής της εργασίας των Parker and Draper, η πρώτη πλήρως ρομποτική προσπάθεια παροπλισμού διεξαγόταν Argonne National Laboratory. Δύο συστήματα -ένα ζευγάρι επιδέξιων χειρών βραχίονα και ένα όχημα με ένα βραχίονα-, χρησιμοποιούνταν για να διαλύσουν τον CP-5 (Chicago Pile number 5) του αντιδραστήρα. Εργασίες ανάπτυξης για την υποστήριξη της προσπάθειας αυτής περιγράφονται από τους Noakes *et al.* [3]. Η αποκατάσταση επικίνδυνων αποβλήτων είναι ένα σχετικό θέμα που είναι επίσης ο στόχος εργασιών ανάπτυξης του Υπουργείου Ενέργειας (DOE) των ΗΠΑ. Η αποκατάσταση των υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης με τη χρήση ρομποτικής, γίνεται σήμερα από το Oak Ridge National Laboratory, και το Pacific Northwest Laboratories. Η Εικόνα 2.5 απεικονίζει μία ρομποτική συσκευή που έχει αναπτυχθεί για την ανάκτηση των αποβλήτων από το Oak Ridge National Laboratory [3].



**Εικόνα 2.5:** Ρομποτική συσκευή για την ανάκτηση αποβλήτων (Oak Ridge National Laboratory).

Αναλύσεις λεπτομερών έργων αποκατάστασης υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης καταδεικνύουν την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος. Σε αυτή την εφαρμογή, το απρόβλεπτο που είναι συνυφασμένο με την αποστολή, την καθιστά αξιόλογη υπονήφια για την εφαρμογή τηλεχειριζόμενων ρομπότ, με την αυτοματοποίηση να περιορίζεται στην παροχή βοήθειας προς τον χειριστή υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Σαν παράδειγμα του απρόβλεπτου σε αυτό το πεδίο, η αποκατάσταση ενός λατομείου στο Oak Ridge, ξεκίνησε με την εκτίμηση ότι θα ανακτηθούν περίπου 2500 αντικείμενα. Στην πραγματικότητα, πάνω από 17000 αντικείμενα απομακρύνθηκαν από το λατομείο, χρησιμοποιώντας ρομποτικά συστήματα [3].

#### *2.2.1.4. Επείγουσα παρέμβαση*

Η πιο διάσημη περίπτωση επείγουσας παρέμβασης στον τομέα της πυρηνικής στις Ηνωμένες Πολιτείες, ήταν το ατύχημα στο Three Mile Island (TMI-2). Οι Merchant & Tarpinian, και Bengal, παρέχουν μια επισκόπηση των ρομποτικών προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν για τις εργασίες ανάκτησης στο TMI-2. Το ατύχημα είναι ενδεικτικό των αρχών που διέπουν την επείγουσα παρέμβαση από ρομπότ [3]:

- Πρώτον, η εκδήλωση ήταν απρόβλεπτη: Τα ρομποτικά συστήματα δεν ήταν

διαθέσιμα να εκτελέσουν αναγνώριση ή έλεγχο για κάποιο χρόνο αργότερα. Η ύπαρξη ρομπότ στο σημείο θα μπορούσε να είχε μειώσει σημαντικά την έκθεση του προσωπικού μετά από ατύχημα.

- Δεύτερον, το ατύχημα δημιούργησε ένα περιβάλλον πολύ εχθρικό για τους ανθρώπους και, ταυτόχρονα, εχθρικό προς τα αυτόνομων ρομπότ. Εμπόδια τα οποία είναι συνήθως παρόντα σε κτίρια σχεδιασμένα για ανθρώπινη πρόσβαση, είναι ήδη δύσκολο για τα ρομπότ να τα υπερπηδήσουν. Οι συνέπειες του ατυχήματος ήταν να καταστήσουν την πρόσβαση πιο δύσκολη, εξ αιτίας ακόμη λιγότερο δομημένην και άγνωστων εμποδίων.

Λιγότερο γνωστές παρεμβάσεις έχουν επίσης πραγματοποιηθεί, και ο Chester περιγράφει εν συντομία μερικές από αυτές [3].

### **2.2.2. Αυτοκινητόδρομοι**

Στον ανεπτυγμένο κόσμο, οι αυτοκινητόδρομοι είναι ένα σημαντικό τμήμα του δικτύου μεταφορών. Ο όγκος της κυκλοφορίας στα οδοστρώματα αυξάνεται σταθερά για πολλά χρόνια, καθώς η κοινωνία γίνεται όλο και περισσότερα κινητή. Ωστόσο, η χρηματοδότηση για τη συντήρηση αυτών των δρόμων δεν έχει τον ίδιο ρυθμό με τον όγκο της κυκλοφορίας. Το αποτέλεσμα είναι η επιδείνωση των οδοστρωμάτων, τα οποία δεν μπορούν να συντηρηθούν επαρκώς. Οι συμβατικές τεχνικές για την αποκατάσταση του οδικού δικτύου οδηγούν σε κυκλοφοριακή συμφόρηση, καθυστερήσεις και κινδύνους για τους εργαζόμενους και τους αυτοκινητιστές. Η εφαρμογή της ρομποτικής σε εφαρμογές συντήρησης αυτοκινητοδρόμων είναι ελκυστική λόγω των δυνατοτήτων τους για την αύξηση της ασφάλειας των εργαζομένων στους αυτοκινητόδρομους, τη μείωση των καθυστερήσεων στη ροή της κυκλοφορίας, την αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση του κόστους εργασίας και τη βελτίωση της ποιότητας των επισκευών. Τομείς εφαρμογής της ρομποτικής σ' αυτό το πεδίο περιλαμβάνουν [3]:

- Διαχείριση της ακεραιότητας των αυτοκινητοδρόμων (σφράγιση ρωγμών, επισκευή λακκούβων).
- Διαχείριση της σήμανσης των αυτοκινητοδρόμων (αντικατάσταση δεικτών

πεζοδρομίου, επαναδιαγράμμιση με χρώμα, πλύσιμο σημάτων και δεικτών, συμβουλευτική δρόμων).

- Διαχείριση απορριμάτων αυτοκινητοδρόμων διαχείρισης (συλλογή σακκούλων σκουπιδιών, αποκομιδή απορριμμάτων επί της οδού, καθαρισμός επικίνδυνων διαρροών, απομάκρυνση χιονιού).
- Διαχείριση εξωραϊσμού αυτοκινητοδρόμων (έλεγχος της βλάστησης, έλεγχος άρδευσης).
- Διαχείριση ζωνών εργασίας αυτοκινητοδρόμων (συστήματα αυτόματης προειδοποίησης, ελαφρά κινητά εμπόδια, αυτόματη τοποθέτηση και ανάκτηση κώνων).

Αν και έχουν επιχειρηθεί σχετικά λίγες εφαρμογές στη συντήρηση και επισκευή αυτοκινητοδρόμων, εν τούτοις έχουν αναπτυχθεί κάποια επιτυχημένα πρωτότυπα. Το Υπουργείο Μεταφορών της Πολιτείας της Καλιφόρνια (Caltrans), μαζί με το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Ντέιβις (UC Davis), έχουν εργαστεί στην ανάπτυξη μιας σειράς πρωτοτύπων για τη συντήρηση των αυτοκινητοδρόμων σύμφωνα με το αυτοματοποιημένο πρόγραμμα Τεχνολογίας Συντήρησης Αυτοκινητοδρόμων (Highway Maintenance Technology, AHMT). Οι προσπάθειες αφορούσαν την ανάπτυξη συστημάτων για σφράγιση ρωγμών, την τοποθέτηση υπερυψωμένων δεικτών πεζοδρομίου, τη βαφή διαγραμμίσεων, τη συλλογή σκουπιδιών σε σακούλες, τη συλλογή δεδομένων για τα πεζοδρόμια, και τη διανομή κώνων. Ένα από τα αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας είναι ένα ρομποτικό σύστημα, ACSM, για την αυτόματη σφράγιση ρωγμών κατά μήκος των δρόμων. Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται ένα τέτοιο μηχάνημα, το οποίο αισθάνεται, προετοιμάζει και σφραγίζει ρωγμές και αρμούς κατά μήκος της εθνικής οδού [3].



**Εικόνα 2.6:** Αυτόματη μηχανή σφράγισης ρωγμών, που αναπτύχθηκε από την UC Davis.

Η αίσθηση των ρωγμών σε όλο το πλάτος μιας λωρίδας κυκλοφορίας, γίνεται με τη χρήση δύο καμερών σκαναρίσματος δύο γραμμών (two-line), στο μπροστινό μέρος του οχήματος. Οι εργασίες σφράγισης λαμβάνουν χώρα στο οπίσθιο μέρος του οχήματος, χρησιμοποιώντας ένα ανεστραμμένο, τοποθετημένο ώστε να ολισθαίνει (slide-mounted) ρομπότ SCARA. Ένας λέιζερ υπολογιστής απόστασης στο σετ εργαλείων, επαληθεύει την παρουσία των ρωγμών και παρέχει καθοδήγηση για τη λειτουργία της σφράγισης. Το όχημα είναι σε θέση να εκτελέσει αυτή τη λειτουργία κινούμενο με περίπου 1.6-3.2 km/hr (1-2 μίλια ανά ώρα). Άλλα πρωτότυπα σφράγισης ρωγμών έχουν αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon, και στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν [3].

Πρώιμα πρωτότυπα για τη συντήρηση των εθνικών οδών αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1980. Ερευνητές στο Tyndall AFB ανέπτυξαν ένα τηλερομποτικό σύστημα γρήγορης επισκευής δρόμου (Rapid Runaway Repair, RRR), για την επισκευή λακκούβων σε δρόμους. Στόχος αυτής της εργασίας ήταν η ασφαλής αποκατάσταση επιφανειών πεζοδρομίου έπειτα από εχθρικές επιθέσεις, για να εξασφαλίσουν επιτυχημένες μελλοντικές αεροπορικές επιχειρήσεις. Το σύστημα βασίζεται σε έναν εκσκαφέα πολλαπλών χρήσεων John Deere, ενισχυμένο για τηλερομποτική λειτουργία. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα σύστημα joystick με 4 DOF, χρησιμοποιώντας ελέγχους για τη θέση και τον ρυθμό, καθώς και ανάδραση ισχύος (force feedback) για ανθρώπινο τηλεχειρισμό. Το μηχάνημα μπορεί να σκάβει, να ξύνει, να συμπιέζει, να σπάει πεζοδρόμιο, και να αλλάζει τα εργαλεία με προγραμματισμό εκ των προτέρων με έλεγχο επί του οχήματος. Το Carnegie Mellon

University ανέπτυξε επίσης ένα ρομποτικό πρωτότυπο εκσκαφέα, που ονομάζεται REX, το οποίο χρησιμοποιώντας την τοπογραφία και έναν παραγόμενο από υπολογιστή ενσωματωμένο χάρτη θαμμένων αντικειμένων, για να δημιουργήσει και να εκτελέσει τις ενδεδειγμένες διαδικασίες για την αποστολή. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα βραχίονα τύπου αγκώνα, σε συνδυασμό με ένα κύριο βραχίονα, για τη ρύθμιση και την αποκατάσταση σφάλματος [3].

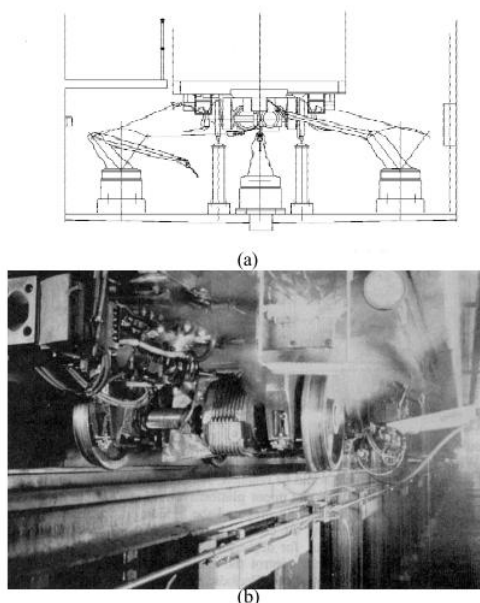
Όχημα συλλογής δεδομένων για ζημιές έχουν επίσης αναπτυχθεί. Το όχημα κατασκευάστηκε από την Komatsu Ltd της Ιαπωνίας, και χρησιμοποιεί σάρωση λέιζερ για να εξετάσει την κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος, μετρώντας τις πληροφορίες σχετικά με το σχηματισμό ρωγμών, την αυλάκωση από τους τροχούς, και τη διαμήκη ανομοιογένεια. Το όχημα μπορεί να ταξιδέψει με ταχύτητες μέχρι 60 km/hr, με ρυθμό αξιολόγησης οδοστρώματος έως 4 μέτρα πλάτος με αυλακίες και λακούβες μέχρι 0.25 μέτρα βάθος [3].

Η Γαλλική Εταιρεία Πετρελαϊκών Σπουδών (French Petroleum Studies Company), ανέπτυξε έναν αυτόματο διανομέα κώνων, που μπορεί να τοποθετήσει και να αφαιρέσει έως και δύο σειρές από προειδοποιητικούς κώνους, για ένα σύνολο 240 κώνων. Το σύστημα λειτουργεί με περίπου 15 km/hr. Η εταιρεία Technique Special de Securite, ανέπτυξε ένα κινητό διαχωριστή λωρίδας, που μπορεί να τοποθετήσει και να αφαιρέσει τιμεντένιους δείκτες δρόμου σε ταχύτητες μέχρι 30 km/hr. Συστήματα αυτόματης ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί και από τη Spectra-Physics of Dayton, Ohio, και από την Agtek Co. της Καλιφόρνια. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν οδηγούς λέιζερ για να ελέγχουν το ύψος των λεπίδων διαβάθμισης, απαλλάσσοντας έτσι τον ανθρώπινο χειριστή από την ανάγκη να εκτελέσει τη χειρωνακτική τοποθέτηση και τον έλεγχο των λεπίδων [3].

### **2.2.3. Σιδηρόδρομοι**

Η σιδηροδρομική βιομηχανία έχει αναγνωρίσει τα οικονομικά οφέλη της αυτοματοποίησης, η οποία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός αριθμού ρομποτικών λύσεων για τη συντήρηση και την επισκευή με εφαρμογές στη βιομηχανία. Τα εργαστήρια συντήρησης των σιδηροδρομικών γραμμών είναι η πιο κοινή θέση του ρομπότ, τα οποία εκτελούν εργασίες όπως συγκόλληση, λείανση, καθαρισμό, και βαφή. Ένα project της Επιτροπής Μεταφορών του Τορόντο (Toronto Transit

Commission), οδήγησε στο σχεδιασμό ενός αυτοματοποιημένου συστήματος για τον καθαρισμό του κάτω μέρους των βαγονιών του μετρό. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται το σύστημα αυτό, το οποίο περιελάμβανε τη χρήση τριών βιομηχανικών ρομπότ βαφής, τοποθετημένων σε κάθε πλευρά και κάτω από το όχημα του μετρό που καθαρίζεται [3].



**Εικόνα 2.7:** Το ρομποτικό σύστημα που αναπτύχθηκε για την Επιτροπή Μεταφορών του Τορόντο για τον καθαρισμό του κάτω μέρους των βαγονιών του. (a) Σχηματική διάταξη των ρομπότ κάτω από το βαγόνι. (b) Το ρομπότ σε λειτουργία (ένα ρομπότ χειρισμού μπορεί να φανεί στην δεξιά πλευρά της φωτογραφίας).

Ένας χειριστής ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση, αρχίζει τις εργασίες καθαρισμού μετά την προετοιμασία του οχήματος εκ των προτέρων. Ολόκληρο το σύστημα ελέγχεται από έναν κεντρικό υπολογιστή, ο οποίος εποπτεύει τους τρεις αυτόνομους ελεγκτές των επιμέρους ρομπότ. Ένα ρομποτικά τοποθετημένο σύστημα όρασης χρησιμοποιείται για να διορθώσει τις θέσεις των ρομπότ στις ράγες τους. Το σύστημα αυτό αναμένεται να δώσει σημαντικές βελτιώσεις στις συνθήκες εργασίας και την ποιότητα εργασίας σε σχέση με τις προηγούμενες εργασιακές συνθήκες [3].

Άλλο ένα ρομποτικό σύστημα που αναπτύχθηκε από τη σιδηροδρομική βιομηχανία είναι το σιδηροδρομικό σύστημα λείανσης RMS-2. Αναπτυγμένο από την Speno Rail Services Co, αυτό το σύστημα έχει αυτοματοποιημένες δυνατότητες για να ανιχνεύει την υπάρχουσα κατάσταση της επιφάνειας των σιδηροτροχιών. Μέχρι 99

σχέδια είναι αποθηκευμένα, τα οποία αντιστοιχούν στα πρότυπα των σιδηροδρομικών σχεδίων. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή επί του οχήματος, χρησιμοποιείται για να επιτελέσει ελέγχους άλεσης για την ολοκλήρωση της γραμμής σιδηροδρομικού στο κατάλληλο, προ-αποφασισμένο σιδηροδρομικό περίγραμμα. Το RMS-2 έχει 120 πέτρες για την εξάπλωση του αλέσματος κατά μήκος του κάτω μέρους για πέντε από τα δώδεκα βαγόνια που απαρτίζουν το σύστημα. Το σύστημα είναι ικανό για τη λείανση σιδηροτροχιών σε ταχύτητες μέχρι 6 μίλια ανά ώρα [3].

#### **2.2.4. Συντήρηση Ηλεκτρικού Δικτύου**

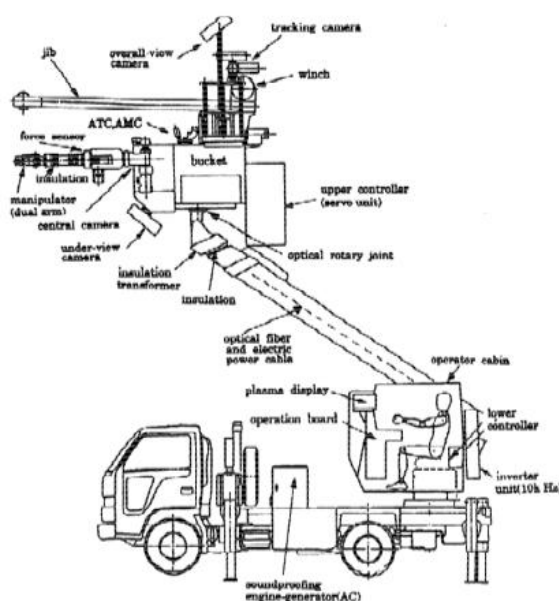
Πολλές κοινές επιχειρήσεις συντήρησης για εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, εκτελούνται από ανθρώπους σε ενεργές γραμμές. Παραδείγματα από αυτές τις εργασίες περιλαμβάνουν την αντικατάσταση των κεραμικών μονωτήρων που υποστηρίζουν το αγωγίμο σύρμα, και το άνοιγμα και την επαναφορά του κυκλώματος μεταξύ των πόλων. Οι εργασίες αυτές είναι πολύ επικίνδυνες για τους εργαζόμενους, λόγω των κινδύνων από την πτώση και τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Η απόκτηση ειδικευμένων εργαζομένων για την εκτέλεση αυτών των εργασιών είναι αρκετά δύσκολη λόγω της υψηλής κατάρτισης και τις απαιτήσεις της εργασίας. Η εκτέλεση της συντήρησης, ενώ οι γραμμές απενεργοποιούνται θα απαλείψει μερικούς από τους κινδύνους, αλλά θα δημιουργήσει και άλλα προβλήματα σε μια κοινωνία που απαιτεί μη διακοπτόμενες υπηρεσίες από τις εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας [3].

Ως εκ τούτου, οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας ερευνούν τη χρήση των ρομποτικών συστημάτων για τη συντήρηση των ενεργών γραμμών ρεύματος από τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Πιο συγκεκριμένα, οι εταιρείες ενέργειας στην Ιαπωνία, την Ισπανία, και τις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν αναπτύξει τηλεχειριζόμενες και ημι-αυτόνομες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ένα από τα πρώτα συστήματα που αναπτύχθηκαν ήταν το TOMCAT (Teleoperator for Operations, Maintenance, and Construction using Advanced Technology), που αναπτύχθηκε ως μέρος ενός project του Electric Power Research Institute (Palo Alto, California). Η βασική ιδέα για το TOMCAT παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τη Philadelphia Electric το 1979, με επακόλουθη ανάπτυξη να συνεχίζει στη δεκαετία του 1980, η οποία οδήγησε σε ένα πρωτότυπο σύστημα. Το σύστημα TOMCAT



αποτελείται από ένα μονωμένο φορτηγό κάδου, έναν βραχίονα επτά λειτουργιών Kraft, βιδωμένο στο τέλος του βραχίονα του φορτηγού, ένα σύστημα προβολής τηλεόρασης για εποπτικό έλεγχο από τον άνθρωπο, και με τα αναγκαία αναλώσιμα για τον έλεγχο και την ισχύ. Τα συστατικά για τον έλεγχο από τον χειριστή είναι τοποθετημένα στο πίσω μέρος του φορτηγού κάδου, και περιλαμβάνουν ένα master βραχίονα χωρίς ανάδραση ισχύος [3].

Ένα πιο πρόσφατο ρομποτικό σύστημα για τη συντήρηση των ενεργών γραμμών έχει αναπτυχθεί από την Kyushu Electric Power Co, Inc, στην Φουκουόκα της Ιαπωνίας. Η σχηματική διαμόρφωση του συστήματος για το σύστημα ρομπότ διπλού βραχίονα που ανέπτυξαν παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8 [3].



**Εικόνα 2.8:** Ρομπότ διπλού βραχίονα για τη συντήρηση ενεργών ηλεκτρικών γραμμών που αναπτύχθηκε από την Kyushu Electric Power Co.

Οι πρώιμες φάσεις αυτής της εργασίας αφορούσαν την ανάπτυξη ενός τηλερομποτικού συστήματος δύο βραχιόνων. Οι επόμενες φάσεις ενσωματώνουν περισσότερη αυτονομία για να εξελιχθεί από μια βασική διαμόρφωση master-slave σε ένα συνεργασιακό σύστημα άνθρωπος-ρομπότ. Αισθητήρες λέιζερ χρησιμοποιούνται πάνω στο ρομπότ για να βοηθήσουν με τον έλεγχο θέσης. Στο τρέχον σύστημα, ο άνθρωπος εργάζεται από ένα σταθμό ελέγχου επάνω στο φορτηγό υποστήριξης, και όχι στον ανελκυστήρα, γεγονός το οποίο σχεδόν εξαλείφει τον κίνδυνο τραυματισμού από πτώσεις [3].

Άλλες σχετικές εργασίες στον τομέα αυτό περιλαμβάνουν το τηλεχειριζόμενο σύστημα ROBTET, για τη συντήρηση ενεργών γραμμών, το οποίο αναπτύχθηκε από ερευνητές στην Ισπανία, και το ρομπότ για το αυτόματο πλύσιμο και βούρτσισμα των μολυσμένων ηλεκτρικών μονωτήρων, το οποίο αναπτύχθηκε στην Κίνα [3].

### **2.2.5. Συντήρηση Αεροσκαφών**

Οι εφαρμογές φροντίδας αεροσκαφών μπορούν να επωφεληθούν από την ρομποτική συντήρηση σε διάφορους τομείς. Το μέγεθος των σύγχρονων αεριωθούμενων με πολλαπλούς κινητήρες, κάνει την επιθεώρηση και την απομάκρυνση και εφαρμογή επίστρωσης, ιδιαίτερα ελκυστική όσον αφορά τη βελτίωση της ποιότητας και της αποτελεσματικότητας. Ως παραδείγματα, μπορούν να αναφερθούν έννοιες για την αυτοματοποίηση των επιφανειακών ελέγχων, και έννοιες σχετικές με τον καθαρισμό και τη βαφή. Αυτοματοποιημένα συστήματα καθαρισμού και βαφής έχουν ήδη τοποθετηθεί σε λίγες βάσεις της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ. Ένας ρομποτικός βοηθός για τον επανοπλισμό ενός τακτικού μαχητικού αεροσκάφους, έχει αναπτυχθεί από το Oak Ridge National Laboratory για την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ [3].

### **2.2.6. Υποβρύχιες Εγκαταστάσεις**

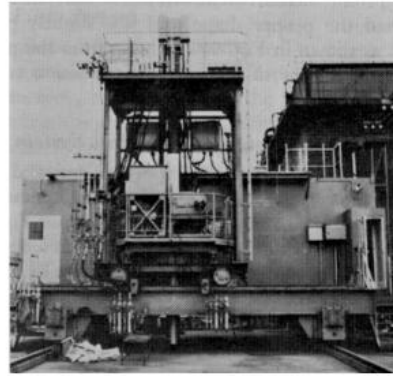
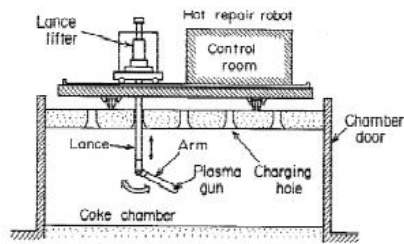
Τηλεχειριζόμενα ρομπότ χρησιμοποιούνται ευρέως για τη συντήρηση εγκαταστάσεων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, κυρίως στην υπηρεσία της υπεράκτιας βιομηχανίας πετρελαίου. Ειδικές εφαρμογές περιλαμβάνουν την επισκευή καλωδίων επικοινωνίας, αγωγών, κεφαλές πηγαδιών, και πλατφόρμες. Έχουν επίσης αναπτυχθεί τηλεχειριστές για τον καθαρισμό της θαλάσσιας ανάπτυξης από συστήματα σταθμού ψύξης, να επιθεωρούν και να καθαρίζουν γεννήτριες ατμού, να εκτελούν υποβρύχιες κατασκευές, και να επιθεωρούν και επισκευάζουν σήραγγες μεταφοράς νερού. Αν και αυτές οι προσπάθειες δεν έχουν την προβολή της ρομποτικής εργασίας σε βιομηχανικές, διαστημικές, ή πυρηνικές εφαρμογές, είναι μια περιοχή στην οποία η ρομποτική και η τεχνολογία τηλεχειρισμού. Είναι ίσως ο πιο κοινός τρόπος για καθημερινή χρήση τηλεχειριζόμενων ρομπότ. Μια δημοσίευση

απαριθμεί 63 εταιρείες που εμπλέκονται στην κατασκευή τηλεχειριζόμενων οχημάτων ή χειριστηρίων για υποθαλάσσιες εργασίες και 180 διαφορετικά, διαθέσιμα στο εμπόριο, τηλεχειριζόμενα συστήματα. Τα τηλεχειριζόμενα συστήματα κυμαίνονται από συρόμενες συστοιχίες αισθητήρων σε υποβρύχια με επιτήδειους βραχίονες, έως μεγάλα κατασκευαστικά μηχανήματα [3].

### **2.2.7. Εγκαταστάσεις Οπτάνθρακα (Κωκ)**

Ένα άλλο παράδειγμα της ρομποτικής που χρησιμοποιείται σε εργασίες συντήρησης και επισκευής, είναι ένα ρομπότ που αναπτύχθηκε από την Sumitomo Metal Industries, Ltd, στην Ιαπωνία, για την επισκευή του τοίχου του θαλάμου ενός φούρνου κωκ. Ζημιές σε φούρνους κωκ μπορούν να συμβούν έπειτα από χρόνια εργασιών λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων του θαλάμου (άνοιγμα πόρτας και σπρώξιμο κωκ), οι οποίοι επάγουν επιζήμιες αλλαγές στη θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα είναι ρωγμές, αποχωρισμοί συνδέσμων, και τη τριβή του τοιχώματος του θαλάμου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή φυσικού αερίου, ρύπανση του αέρα, και διαρθρωτικές αδυναμίες στους φούρνους. Έτσι, η αποτελεσματική επισκευή κλιβάνων κωκ απαιτείται για να παρατείνει τη ζωή τους και να εξασφαλίσει τη σταθερή λειτουργία τους [3].

Ιδιαίτερα προκλητικές εργασίες συντήρησης περιλαμβάνουν την επισκευή του κεντρικού τμήματος του φούρνου. Αυτό το είδος της επισκευής είναι πολύ δύσκολο, λόγω της μη προσβασιμότητας της περιοχής, της υψηλής θερμοκρασίας, και ο επικράτηση στενών ρωγμών. Κάθε τεχνολογία για επισκευή σε αυτόν τον τομέα πρέπει να περιλαμβάνει συνιστώσες για την ανοχή στην υψηλή θερμότητα, και τους μηχανισμούς για την εξωτερική παρατήρηση, με αποτέλεσμα επισκευές υψηλής ποιότητας και αντοχής. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα επισκευής ήταν η ανάπτυξη ενός ρομπότ ανθεκτικού στη θερμότητα, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 [3].



**Εικόνα 2.9:** Ρομπότ Θερμής Επισκευής (Hot Repair Robot), ανεπτυγμένο από την Sumitomo Metal Industries, Ltd., Ιαπωνία, για την επιδιόρθωση ρωγμών και αρθρώσεων σε τοίχους θαλάμων φούρνων κωκ, κατά τη διάρκεια θερμής λειτουργίας.

Το ρομπότ μπορεί να εκτελέσει αυτόνομα επιμέρους επισκευή ρωγμών, ενώ παρέχεται καθοδήγηση υψηλού επιπέδου μέσω μιας διεπαφής ανθρώπου-μηχανής. Η δυνατότητα να εκτελούνται αυτές οι επισκευές χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία του φούρνου ή να προκαλείται μεγάλη πτώση θερμοκρασίας των πυρότουβλων, αποτελεί ειδικό όφελος για τη βιομηχανία [3].

### 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ SOLIDWORKS

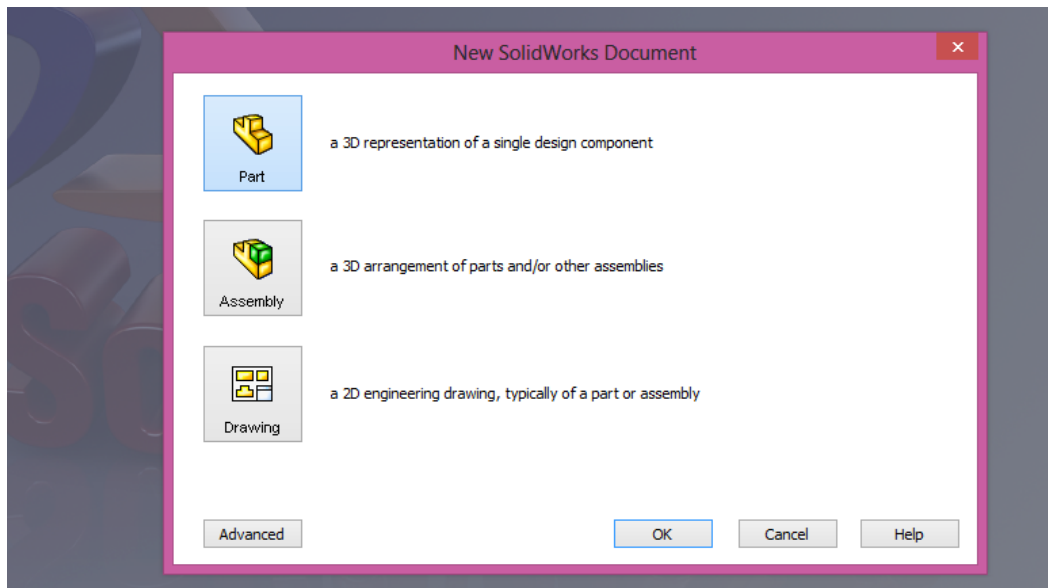
#### 3.1. Γενικά

Σημαντικό κεφάλαιο στην υλοποίηση του σχεδιασμού ενός ρομποτικού βραχίονα είναι το πρόγραμμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Στη περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα SOLIDWORKS, του πλέον ειδικού και κατάλληλου προγράμματος σχεδιασμού. Το λογότυπο του προγράμματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1:** Το λογότυπο του προγράμματος SOLIDWORKS.

Η επιλογή αυτή μας δίνει την δυνατότητα να απλουστεύσουμε το έργο μας, παρέχοντάς μας επιλογές πολύ χρήσιμες όπως και σημαντικά μέσα σχεδιασμού. Με την χρήση του προγράμματος αυτού, η σχεδίαση ενός 3D σχεδίου γίνεται με βασικά και απλά βήματα, κατανοητά ακόμα και σε μη πεπειραμένους χρήστες του προγράμματος. Απευθύνεται τόσο σε αρχάριους για εκμάθηση, όσο και σε ποιο απαιτητικούς χρηστές σχεδιαστικών προγραμμάτων. Στην Εικόνα 3.2, παρουσιάζεται η επιλογή σχεδιασμού κομματιού, στην κύρια οθόνη του προγράμματος SOLIDWORKS.



**Εικόνα 3.2:** Επιλογή σχεδιασμού κομματιού, στην κύρια οθόνη του προγράμματος SOLIDWORKS.

Αρχικά το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα να γίνει η επιλογή της όψης, κατά την οποία επιθυμεί ο χρήστης να ξεκινήσει την διαδικασία και να υλοποιήσει το σχέδιό του.

Η αρχική σχεδίαση του αντικείμενου γίνεται πάντα σε διδιάστατη μορφή. Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα επιλογής και χρησιμοποίησης γεωμετρικών σχημάτων, ευθειών γραμμών, δημιουργία καμπυλοτήτων, δημιουργία γωνιών, καθώς επίσης και την δυνατότητα διαστασιολόγησης του σχεδίου με απόλυτη ακρίβεια.

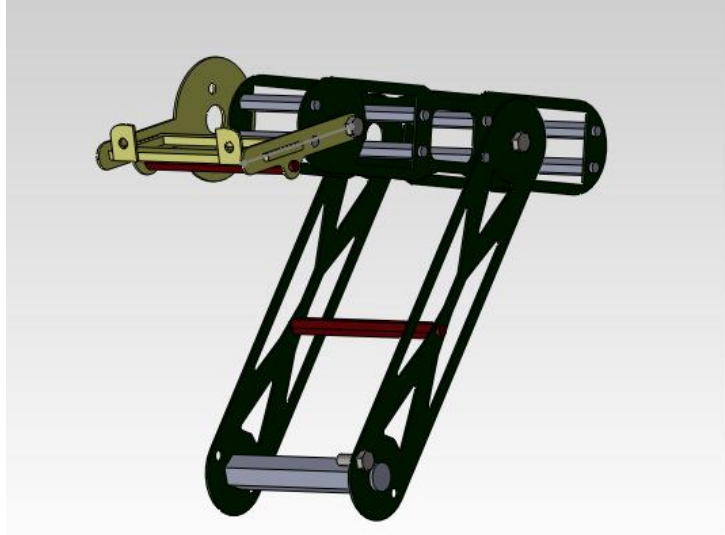
Το επόμενο βήμα της σχεδίασης, είναι η απόδοση όγκου στο σχέδιο και η μετατροπή του 2D σχεδίου σε μορφή 3D. Παρέχονται ενέργειες και εντολές που μπορούμε να δώσουμε στο πρόγραμμα ώστε να αποδώσουμε, όπως και να αφαιρέσουμε όγκο ανάλογα με τις απαιτήσεις της σχεδίασης. Επίσης παρέχεται το σπάσιμο γωνίας πλευράς, δημιουργία οπών, κοπή σπειρωμάτων, κυρτών οπών και κοίλων επιφανειών. Οι εντολές που δίνονται στην διάθεση του χρήστη, είναι σημαντικά εργαλεία δημιουργίας του κάθε απαιτούμενου σχεδίου ανεξαρτήτου δυσκολίας, με την λιγότερη δυνατή καταβολή κόπου και χρόνου, καθώς είναι εύκολες και κατανοητές. Δεν είναι τυχαίο ότι το πρόγραμμα του SOLIDWORKS ενδείκνυται για ακριβή και σύνθετα σχέδια. Στην Εικόνα 3.2, παρουσιάζεται η Έκδοση 2011 του του προγράμματος SOLIDWORKS.



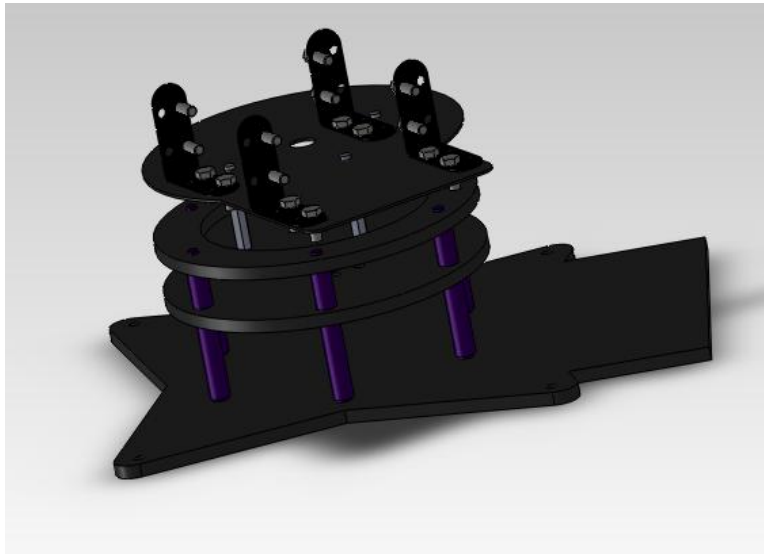
**Εικόνα 3.3:** Η έκδοση 2011 του προγράμματος SOLIDWORKS.

### 3.2. Περιγραφή ρομποτικού βραχίονα

Ο ρομποτικός βραχίονας που ζητήθηκε να σχεδιαστεί, στηρίζεται σε μια μεταλλική βάση δύο επιπέδων, και αποτελείται από δύο διπλά σκέλη παράλληλων ελασμάτων ενωμένα μεταξύ τους με σύνδεσμο συναρμολόγησης. Το εμπρός μέρος του ρομποτικού είναι μια ελασματική βάση, στηριζόμενη σε δύο παράλληλα εξαρτήματα, με το σύνολο να αποτελεί μια βάση υποδοχής μηχανικής δαγκάνας-τσιμπίδας, η οποία λειτουργικά θα είναι και το πλέον ουσιαστικό στοιχείο της κατασκευής, υλοποιώντας την κάθε ζητούμενη ενέργεια. Στις Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται τμήμα του υπό κατασκευή ρομποτικού βραχίονα, ενώ στην Εικόνα 3.5 η βάση του.



**Εικόνα 3.4:** Τμήμα του υπό κατασκευή ρομποτικού βραχίονα.



**Εικόνα 3.5:** Η βάση του υπό κατασκευή ρομποτικού βραχίονα.

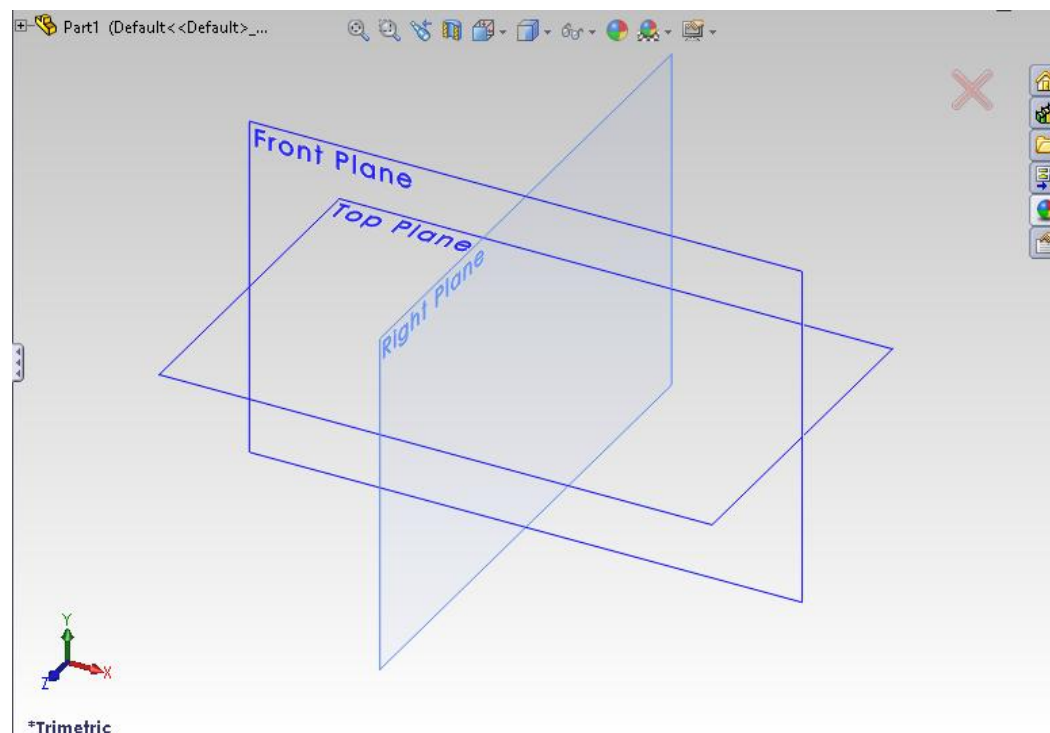


### 3.3. Λεπτομέρειες σχεδιασμού

#### 3.3.1. Σχεδιασμός

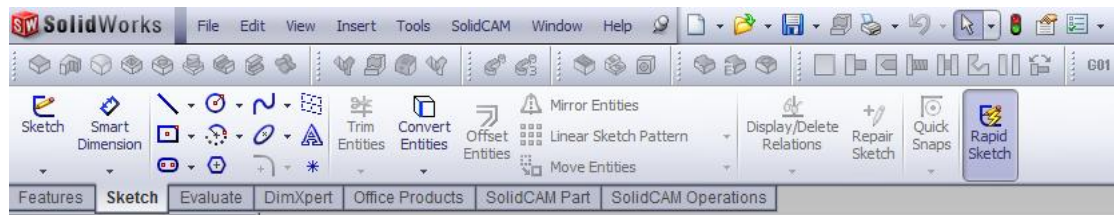
Το αντικείμενο που ζητήθηκε προς σχεδίαση, αποτελείται από δεκατρία μέρη και είναι τρισδιάστατης μορφής. Το κάθε εξάρτημα σχεδιάστηκε ξεχωριστά, και για την σχεδίασή τους χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες εντολές του προγράμματος.

Κατά την εκκίνηση της σχεδίασης, καλούμαστε να επιλέξουμε την όψη που επιθυμούμε να ξεκινήσουμε την σχεδίαση, επιλέγοντας μία εκ των επιλογών: Front Plane, Top Plane, Right Plane. Στην Εικόνα 3.6, παρουσιάζονται οι τρεις αυτές επιλογές.



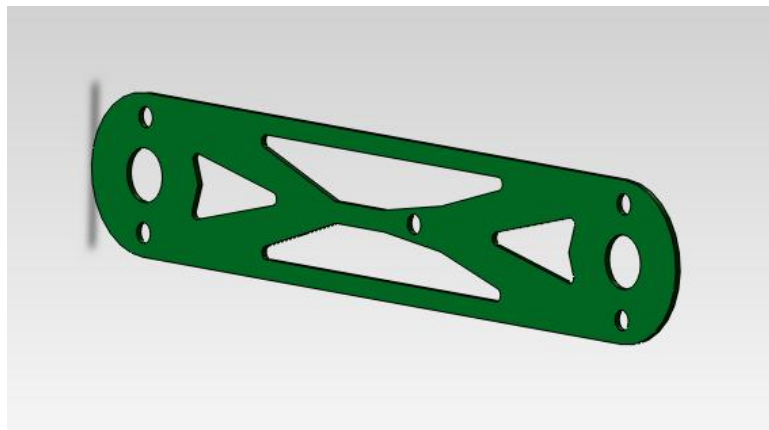
**Εικόνα 3.6:** Οι επιλογές Front Plane, Top Plane, και Right Plane, του προγράμματος SOLIDWORKS.

Στη συνέχεια, επιλεγούμε την εντολή Sketch, ώστε να ξεκινήσει η σχεδίαση. Στην Εικόνα 3.7, παρουσιάζεται αυτή η επιλογή.



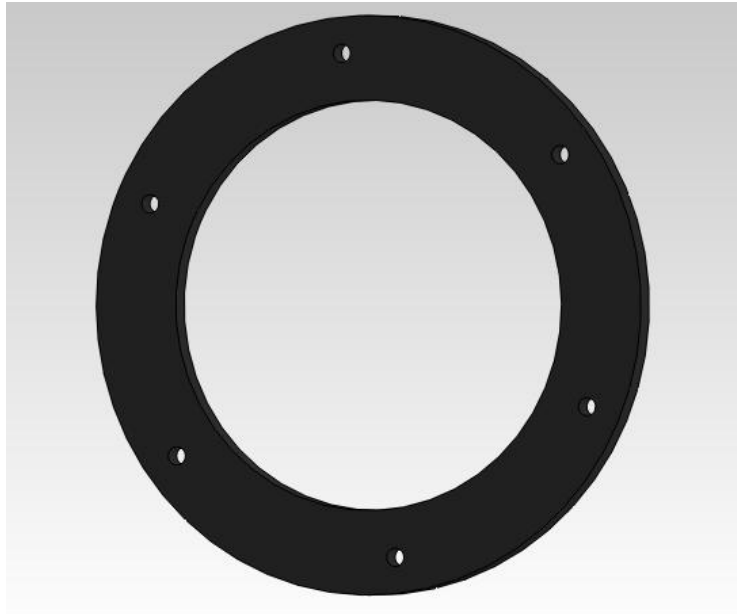
**Εικόνα 3.7:** Η εντολή Sketch του προγράμματος SOLIDWORKS.

Για την σχεδίαση ορθογώνιων τμημάτων, επιλεγούμε την κατάλληλη από μία σειρά ορθογώνιων εντολών, οι οποίες παρέχονται από την εντολή Rectangle. Στην Εικόνα 3.8, παρουσιάζεται ένα τέτοιο ορθογώνιο τμήμα.



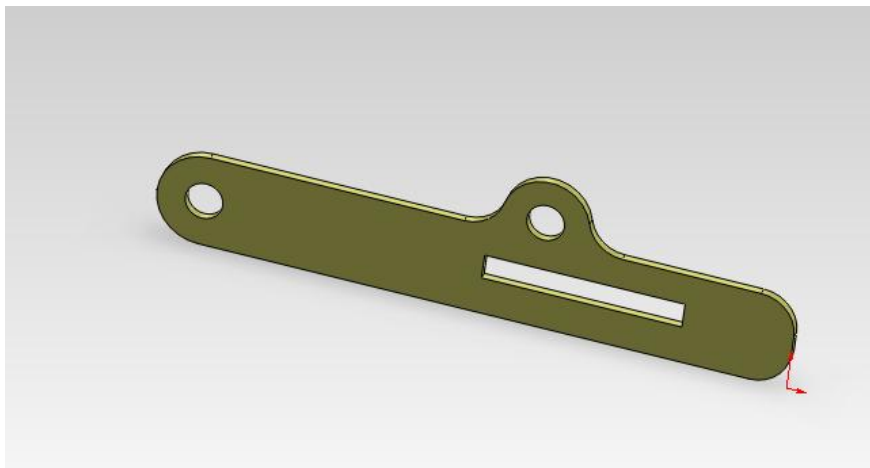
**Εικόνα 3.8:** Ορθογώνιο τμήμα σχεδιασμένο από την εντολή Rectangle του προγράμματος SOLIDWORKS.

Για την δημιουργία κύκλων, κάνουμε χρήση της εντολής Circle. Στην Εικόνα 3.9, παρουσιάζεται ένας τέτοιος κύκλος.



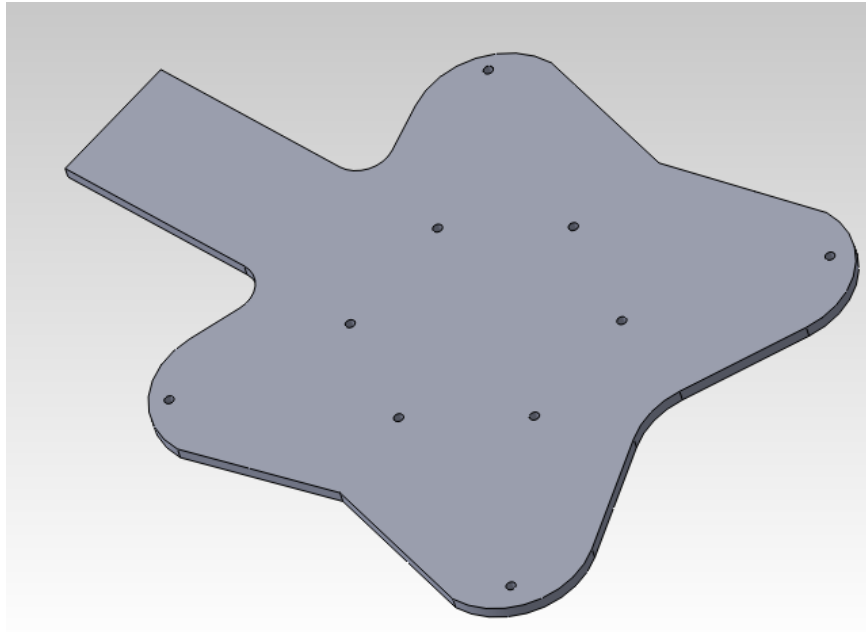
**Εικόνα 3.9:** Κύκλος σχεδιασμένος από την εντολή Circle του προγράμματος SOLIDWORKS.

Για την σχεδίαση ευθύγραμμων τμημάτων κάνουμε χρήση της εντολής Line. Στην Εικόνα 3.10, παρουσιάζεται ένα τέτοιο ευθύγραμμο τμήμα.



**Εικόνα 3.10:** Ευθύγραμμο τμήμα σχεδιασμένο από την επιλογή Line του προγράμματος SOLIDWORKS.

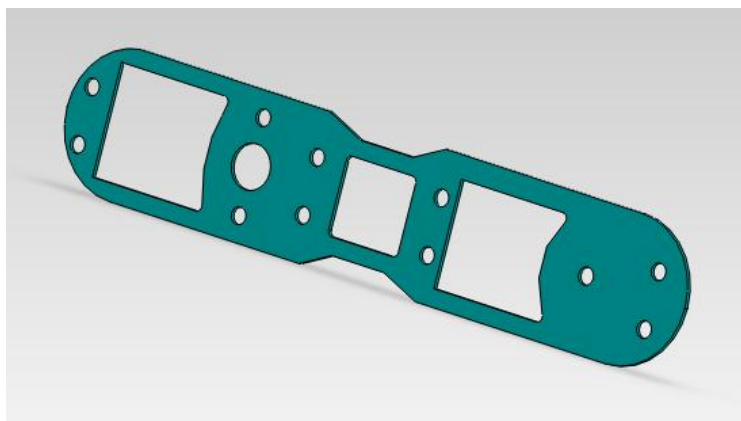
Αντίστοιχα, για τη δημιουργία πολυγώνων, χρήσιμη εντολή είναι η Polygon. Ένα τέτοιο πολύγωνο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11.



**Εικόνα 3.11:** Πολύγωνο σχεδιασμένο από την επιλογή Polygon του προγράμματος SOLIDWORKS.

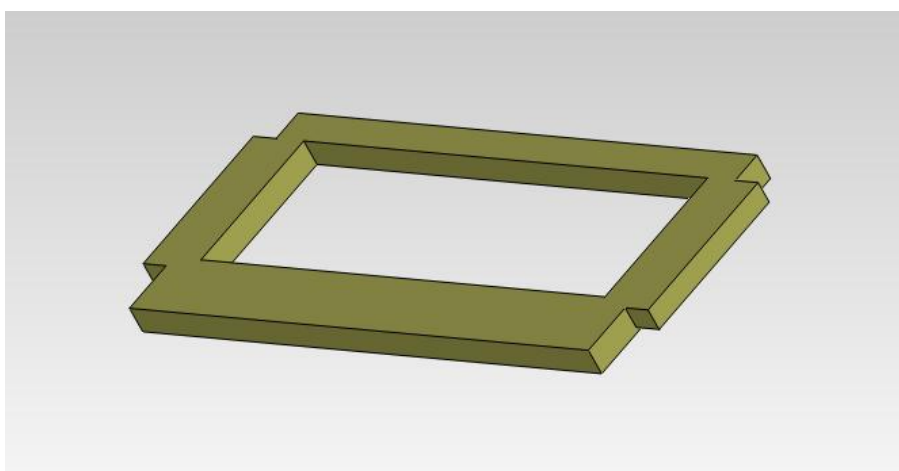
Πολύ χρήσιμη είναι και η εντολή είναι η Sketchfillet, η οποία μετατρέπει μια γωνία σε καμπύλη.

Χρήσιμες εντολές είναι επίσης οι Trim/Extendities, οι οποίες είναι διορθωτικές, καθώς μας δίνουν την δυνατότητα να αφαιρέσουμε μέρος γραμμής ή καμπύλης που διακόπτεται από άλλη, όπως και αντίστροφα να προσθέσουμε κομμάτι ευθύγραμμου τμήματος ώστε να ενώνουν δύο στοιχεία. Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτών των εντολών.



**Εικόνα 3.12:** Αποτέλεσμα της χρήσης των εντολών Trim/Extendities του προγράμματος SOLIDWORKS.

Αξιόλογη και πολύ λειτουργική εντολή, είναι η Offsetentities, η οποία μας δίνει την δυνατότητα της συμμετρίας, σύμφωνα με τις παραμέτρους και τα αντικείμενα που θα επιλέξουμε, δημιουργώντας παράλληλα τμήματα και γλιτώνοντάς μας από επιπλέον κόπο, δίνοντάς μας ταυτόχρονα τη μέγιστη ακρίβεια. Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτής της εντολής.

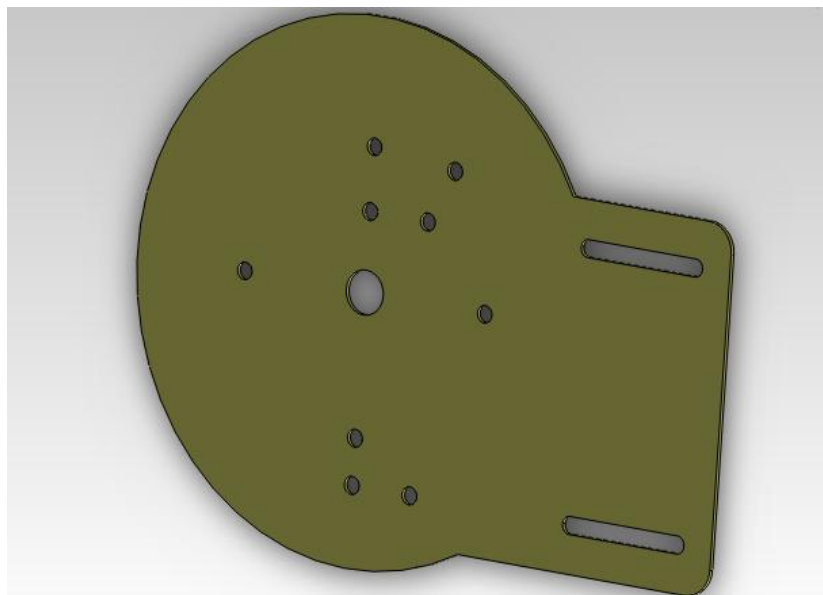


**Εικόνα 3.13:** Αποτέλεσμα της χρήσης της εντολής Offsetentities του προγράμματος SOLIDWORKS.

Η πλέον χρήσιμη εντολή η οποία μας παρέχεται, είναι η Smartdimension. Χρησιμοποιώντας τη, έχουμε τη δυνατότητα επιλέγοντας ένα τμήμα, μία γωνία ή έναν κύκλο, να μας δείχνει την διάστασή του, δίνοντάς μας την ευχέρεια να την τροποποιήσουμε σύμφωνα με τα σχέδιά μας. Στις Εικόνες 3.14 και 3.15, παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο τέτοια μέρη ενός βραχίονα (δίχως να παρουσιάζονται οι διαστάσεις).



**Εικόνα 3.14:** Τμήμα ρομποτικού βραχίονα, σχεδιασμένο με το πρόγραμμα SOLIDWORKS.



**Εικόνα 3.15:** Τμήμα ρομποτικού βραχίονα, σχεδιασμένο με το πρόγραμμα SOLIDWORKS.

### **3.3.2. Απόδοση όγκου**

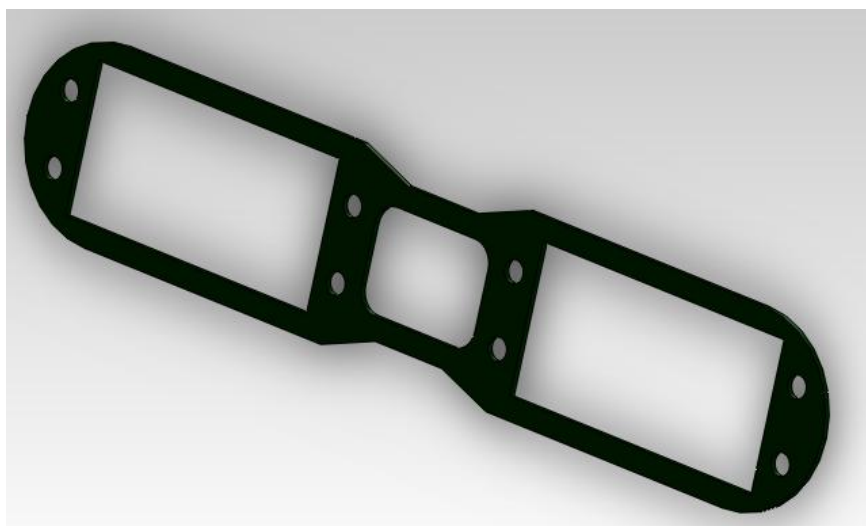
Το επόμενο βήμα έπειτα από την διδιάστατη σχεδίαση, είναι η απόδοση όγκου και η μετατροπή του σε τρισδιάστατη μορφή. Κάνουμε επιλογή της εντολής Features, η οποία μας οδηγεί σε ένα μενού τρισδιάστατων επιλογών, και μια σειρά ενεργειών οι

οποίες προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της σχεδίασης. Στην Εικόνα 3.16 παρουσιάζεται αυτή η επιλογή.



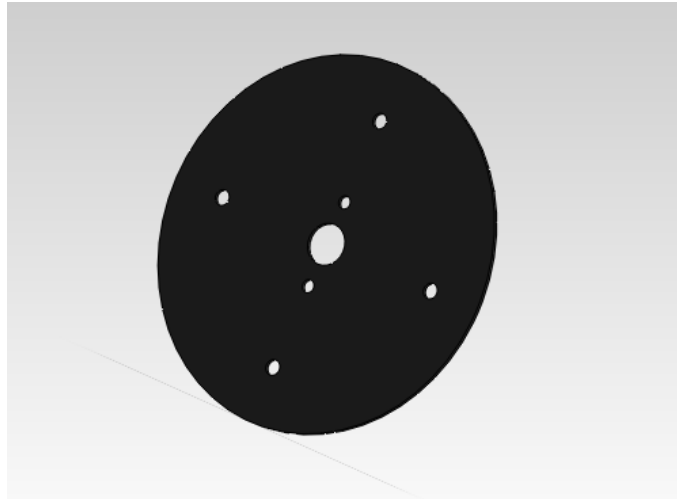
**Εικόνα 3.16:** Η εντολή Features του προγράμματος SOLIDWORKS.

Η κύρια, πλέον χρήσιμη και εναρκτήρια εντολή, είναι η Extrudedboss/Base, η οποία, επιλέγοντας το τμήμα του σχεδίου που επιθυμούμε, του δίνει τον ζητούμενο όγκο που θα επιλέξουμε. Στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτής της εντολής.



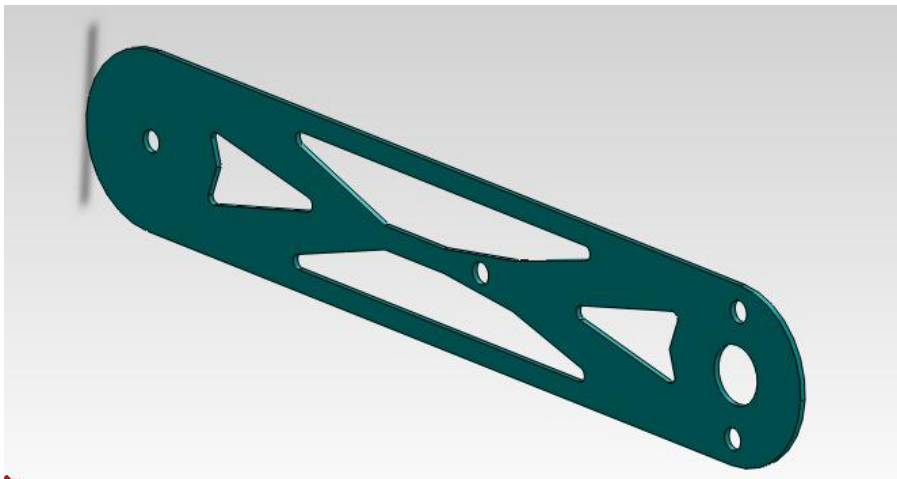
**Εικόνα 3.17:** Αποτέλεσμα της χρήσης της εντολής Extrudedboss/Base του προγράμματος SOLIDWORKS.

Στην περίπτωση που ζητείται σχεδίαση κυκλικού τμήματος τύπου «ντόνατς», ή «σαμπρέλας», όπως αποκαλούνται, παρέχεται η εντολή Revolvedboss/Base, η οποία δημιουργεί τέτοια σχήματα. Στην Εικόνα 3.18 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτής της εντολής.



**Εικόνα 3.18:** Αποτέλεσμα της χρήσης της εντολής Revolvedboss/Base του προγράμματος SOLIDWORKS.

Παρέχεται επίσης μία εντολή αφαίρεσης υλικού από συμπαγές σχέδιο, δημιουργώντας κούφωμα ή θόλο. Πρόκειται για την εντολή Extrudedcut, η οποία ουσιαστικά αφαιρεί υλικό από ένα μέρος δημιουργώντας θόλο. Στην Εικόνα 3.19 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτής της εντολής.

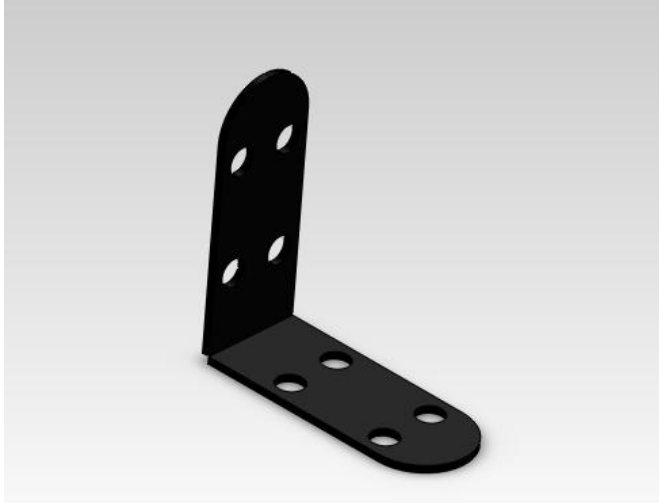


**Εικόνα 3.19:** Αποτέλεσμα της χρήσης της εντολής Extrudedcut του προγράμματος SOLIDWORKS.

Αξιόλογες είναι επίσης οι εντολές Revolvedcut, η οποία είναι αντίστροφη της revolvedboss/Base, η Fillet, η οποία δημιουργεί σπάσιμο γωνίας, καθώς επίσης και η Draft, η οποία δημιουργεί κωνικότητα σε ένα ορθογώνιο σχέδιο.



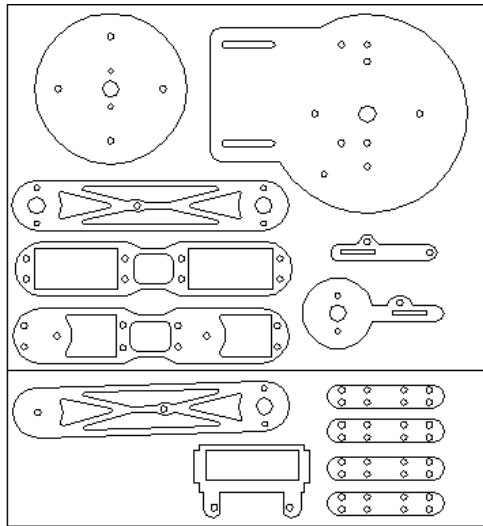
Τέλος, στη σχεδιάσή μας χρησιμοποιήσαμε αρκετά την επιλογή HoleWizard, η οποία δημιουργεί οπές σε σημεία που εμείς επιλέγουμε, ορίζοντας την ακριβή διάσταση. Στην Εικόνα 3.20 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα αυτής της εντολής.



**Εικόνα 3.20:** Αποτέλεσμα της χρήσης της εντολής HoleWizard του προγράμματος SOLIDWORKS.

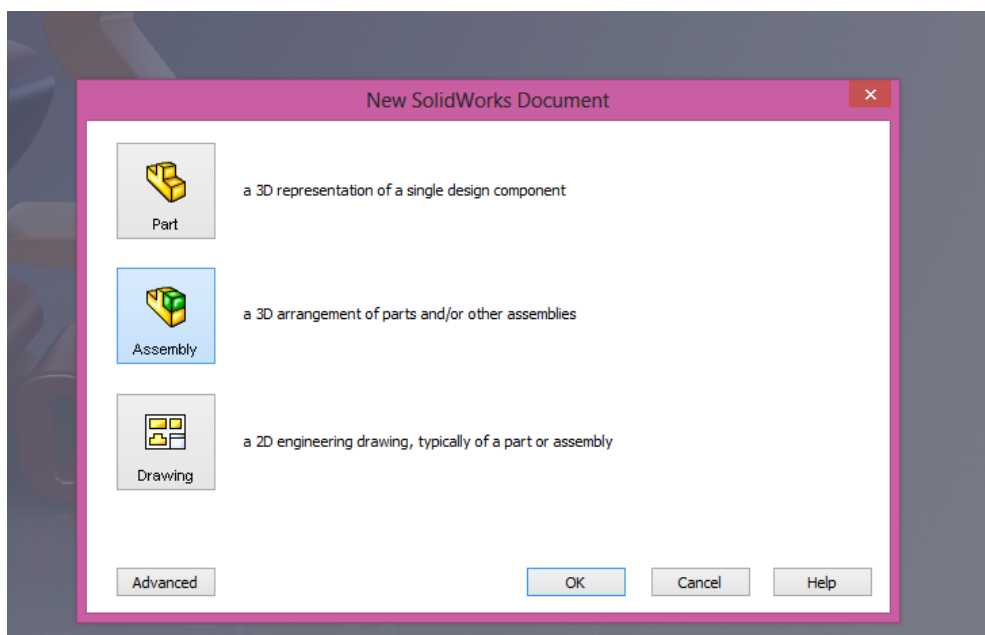
### **3.3.3. Διαδικασία Συναρμολόγησης**

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του κάθε επιμέρους κομματιού ξεχωριστά, προχωράμε στην συναρμολόγηση αυτών. Στην Εικόνα 3.22, παρουσιάζονται τμήματα ρομποτικού βραχίονα προς συναρμολόγηση.



**Εικόνα 3.22:** Τμήματα ρομποτικού βραχίονα προς συναρμολόγηση.

Στην Εικόνα 3.23, παρουσιάζεται η επιλογή συναρμολόγησης, στην κύρια οθόνη του προγράμματος SOLIDWORKS.



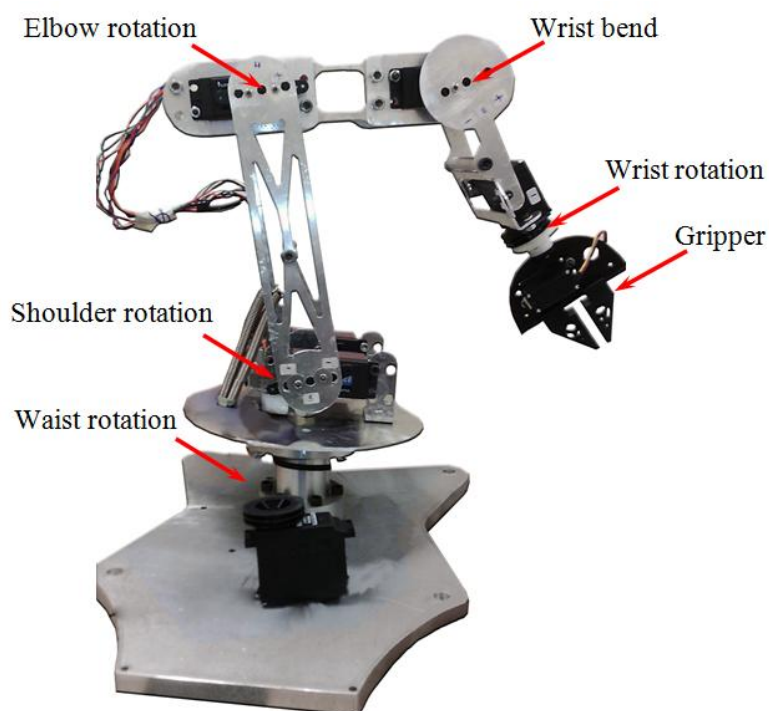
**Εικόνα 3.23:** Η επιλογή συναρμολόγησης, στην κύρια οθόνη του προγράμματος SOLIDWORKS.

Η διαδικασία της συναρμολόγησης ονομάζεται Assembly. Με βάση το προσχέδιο που υπάρχει, ξεκινάμε την συναρμολόγηση καθώς επιχειρούμε να

ταιριάξουμε ιδανικά τα κομμάτια τα οποία έχουμε σχεδιάσει, ώστε να δημιουργήσουμε την τελική εικόνα του σχεδίου μας.

Κάτι τελευταίο που μας προσφέρει το πρόγραμμα σχεδιασμού, είναι η προσομοίωση κίνησης του σχεδίου μας μέσα από τις ενέργειες Motionstudy που μας παρέχει.

## 4. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΒΡΑΧΙΟΝΑ



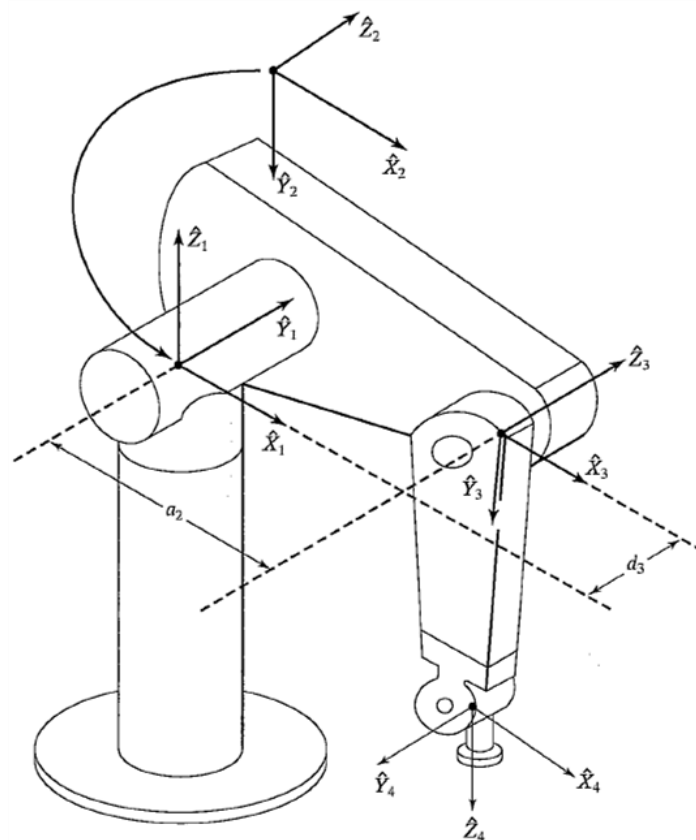
### 4.1. Γενικά

Ο ρομποτικός βραχίονας που μας απασχολεί εδώ, αποτελείται από τα εξής στοιχεία, όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.4.1:

Πίνακας Π.4.1: Τμήματα ρομποτικού βραχίονα.		
Τμήμα	Τύπος	Ποσότητα
Βάση	Vigor VSD-11YMB MG/HV Extra Large 360 Degree/Winch Servo 0.75sec / 40kg / 150g	1

Άκρο (Δαγκάνα)	DELUXE HiTEC HS-422	1
Σερβοκινητήρες	TURNIGY TGY- 1270HV Metal gear Digital Servo	6
Ενδιάμεσα τμήματα	Φύλλο αλουμινίου τύπου 6061	1

Στην Εικόνα 4.1, παρουσιάζεται σε σχηματική απεικόνιση ένας ρομποτικός βραχίονας, παρόμοιος με εκείνον που κατασκευάστηκε στο παρόν εργαστήριο [4].



**Εικόνα 4.1:** Σχηματική απεικόνιση ρομποτικού βραχίονα, πρόμοιου με αυτόν που κατασκευάστηκε στο παρόν εργαστήριο.

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε, με τη χρήση βασικών εξισώσεων της Μηχανικής, το βάρος που μπορεί να σηκώσει ο συγκεκριμένος ρομποτικός βραχίονας.

## 4.2. Ροπή και δύναμη κινητήρων

### 4.2.1. Χαρακτηριστικά τμημάτων του ρομποτικού βραχίονα που κατασκευάστηκε

Στην παρούσα παράγραφο, θα παραστούν με τη μορφή Πινάκων τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τμημάτων του ρομποτικού βραχίονα που κατασκευάστηκε στο παρόν εργαστήριο.

#### 4.2.1.1. Βάση

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Βάσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.4.2 [5].

Πίνακας Π.4.2: Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Βάσης του ρομποτικού βραχίονα.	
Χαρακτηριστικό	Τιμή
Operating Voltage STD	6.0V~7.2V
Direction	Counter Clockwise / Pulse Traveling 1500 to 1900uSec
Stall Torque	â%§30 kgf.cm at 6.0V, â%§40 kgf.cm at 7.2V
Operating Speed	0.92 sec/ 60 at no load at 6.0V, 0.75 sec/ 60 at no load at 7.2V
Weight	150g
Running Current	0.35A~0.40A
Motor	3 Pole Heavy Duty
Output Angle	2160 Degrees (6 Circles)

Bearing	2BB																			
Gear	Metal Gear																			
Size	60.0 x 29.1 x 54.3 mm																			
Lead	250mm 22AWG, Univeral Plug																			
Special Feature	Water Resistance																			
	<table border="1"> <tr> <td>Weight (g)</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Torque (kg)</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Speed(Sec/60deg)</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>A(mm)</td> <td>58</td> </tr> <tr> <td>B(mm)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>C(mm)</td> <td>54</td> </tr> <tr> <td>D(mm)</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>E(mm)</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>F(mm)</td> <td>41</td> </tr> </table>	Weight (g)	150	Torque (kg)	40	Speed(Sec/60deg)	0.75	A(mm)	58	B(mm)	60	C(mm)	54	D(mm)	29	E(mm)	74	F(mm)	41	
Weight (g)	150																			
Torque (kg)	40																			
Speed(Sec/60deg)	0.75																			
A(mm)	58																			
B(mm)	60																			
C(mm)	54																			
D(mm)	29																			
E(mm)	74																			
F(mm)	41																			

Στην Εικόνα 4.2, παρουσιάζεται η Βάση που χρησιμοποιήθηκε.



**Εικόνα 4.2:** Η Βάση που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα στο παρόν εργαστήριο.

#### 4.2.1.2. Άκρο (Δαγκάνα)

Το άκρο (δαγκάνα), που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3 [6].



**Εικόνα 4.3:** Το άκρο (δαγκάνα) που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα στο παρόν εργαστήριο.

#### 4.2.1.3. Σερβοκινητήρες

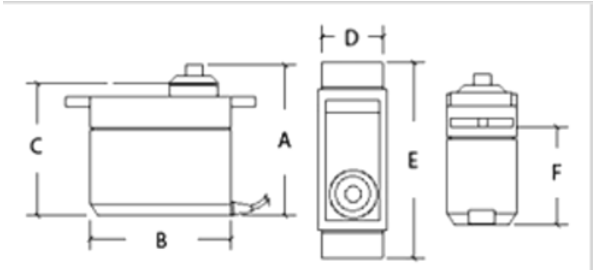
Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων, που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.4.3 [7].



<b>Πίνακας Π.4.3:</b> Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων του ρομποτικού βραχίονα.	
<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Τιμή</b>
Operating Voltage	6V ~ 7.2V
Weight	170 grams 188 grams (παρούσα εργασία)
Dimensions	59.5 x 29.5 x 54.3 mm
Torque	@ 6.0V: 35 kg/cm @ 7.2V: 40 kg/cm
Speed	@ 6.0V: 0.20 sec / 60° at no load @ 7.2V: 0.18 sec / 60° at no load
Gear	Metal gear / Dual ball bearing

Weight (g)	170
Torque (kg)	40
Speed(Sec/60deg)	0.18
A(mm)	61
B(mm)	59
C(mm)	55
D(mm)	30
E(mm)	75
F(mm)	40

Στην Εικόνα 4.4, παρουσιάζεται ένας από τους σερβοκινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν.



**Εικόνα 4.4:** Σερβοκινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του ρομποτικού βραχίονα στο παρόν εργαστήριο.

#### 4.2.1.4. Φύλλο αλουμινίου

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φύλλου αλουμινίου, της Βάσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.4.4 [8].

<b>Πίνακας Π.4.2:</b> Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φύλλου αλουμινίου του ρομποτικού βραχίονα.	
<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Τιμή</b>
Chemical composition	<p>Silicon minimum 0.4%, maximum 0.8% by weight</p> <p>Iron no minimum, maximum 0.7%</p> <p>Copper minimum 0.15%, maximum 0.40%</p> <p>Manganese no minimum, maximum 0.15%</p> <p>Magnesium minimum 0.8%, maximum 1.2%</p> <p>Chromium minimum 0.04%, maximum 0.35%</p> <p>Zinc no minimum, maximum 0.25%</p> <p>Titanium no minimum, maximum 0.15%</p>

	Other elements no more than 0.05% each, 0.15% total Remainder Aluminium (95.85%–98.56%)
Dimensions	50 cm x 50 cm x 2 mm
Density	2.70 g/cm <sup>3</sup>
Volume	250 cm <sup>3</sup>
Weight	675 grams (υπολογισμένο)

### 4.2.3. Υπολογισμός ροπής και δύναμης

#### 4.2.3.1. Γενικά

Η ροπή είναι το γινόμενο της δύναμης επί την απόσταση. Η ροπή συμβολίζεται συχνά με το σύμβολο «τ». Αν έχουμε μια άκαμπτη ράβδο μήκους  $r$ , η οποία συνδέεται με ένα σημείο ή άξονα περιστροφής στο ένα άκρο, και στο άλλο άκρο εφαρμοστεί δύναμη  $F$  κάθετα στη ράβδο, η ροπή θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau = F \cdot r \quad (4.1)$$

Μονάδες της ροπής στο SI είναι οι N·m, συχνά όμως χρησιμοποιούνται και μονάδες όπως kg·cm, oz·in (συμβολιζόμενες αντίστοιχα ως kg/cm και oz/in) κλπ.

#### 4.2.3.2. Υπολογισμός ροπής για σερβοκινητήρα

Οι υπολογισμοί είναι βασικά οι ίδιοι για κάθε άρθρωση. Στην παρούσα εργασία, θα επιχειρήσουμε έναν στοιχειώδη υπολογισμό για τη δεύτερη κατά σειρά άρθρωση από το άκρο του βραχίονα. Ακριβώς όπως είναι πιο δύσκολο για μας να σηκώσουμε ένα βάρος όταν έχουμε το χέρι τεντωμένο από ότι όταν το έχουμε λυγισμένο κοντά στο σώμα μας, το ίδιο ισχύει και για τον ρομποτικό βραχίονα. Για να προσδιοριστεί η ικανότητα ανύψωσης στη χειρότερη περίπτωση, θα πρέπει να καθοριστεί η μεγαλύτερη απόσταση από την άρθρωση στο άκρο του βραχίονα.

Ας υποθέσουμε ότι η μέγιστη απόσταση είναι 50 cm (2 τμήματα των 25 cm), και δεδομένου ότι η ροπή του σερβοκινητήρα (στη μέγιστη απόδοση) είναι 40 kg/cm, τότε διαιρώντας τη ροπή με την απόσταση έχουμε:

$$\begin{aligned}\tau &= F \cdot r \\ \Rightarrow F &= \frac{\tau}{r} \\ \Rightarrow F &= \frac{40kg/cm}{50cm} \quad (4.2) \\ \Rightarrow F &= 0,8kg \\ \Rightarrow F &= 800g\end{aligned}$$

Δηλαδή ο βραχίονας που κατασκευάσαμε μπορεί να σηκώσει -θεωρητικά-, μέχρι 800 γραμμάρια βάρους.

Ωστόσο, αυτή η απλουστευμένη θεώρηση δεν λαμβάνει υπόψιν το βάρος του βραχίονα, και τη ροπή που απαιτείται για να τον κρατήσει ψηλά.

Για να βρούμε τη ροπή που ο ρομποτικός βραχίονας ασκεί στις αρθρώσεις, θα πρέπει να προσθέσουμε τη ροπή κάθε κομματιού του βραχίονα. Αντ' αυτού, μπορούμε να ζυγίσουμε το όλο συγκρότημα και να βρούμε το σημείο στο οποίο θα μπορούσαμε να έχουμε το κέντρο μάζας. Στη συνέχεια μπορούμε να απλοποιήσουμε εννοιολογικά τον βραχίονα σε μια αβαρή ράβδο με μάζα που αντιστοιχεί στο βάρος ολόκληρου του βραχίονα σε απόσταση από την άρθρωση στο κέντρο μάζας.

Ας υποθέσουμε ότι ο βραχίονας στο παράδειγμα μας, ο βραχίονάς μας στη θέση κάθε σερβομηχανισμού ζυγίζει (βάρος γφύλλου αλουμινίου +βάρος σερβομηχανισμού):

$$\begin{aligned}W_{total} &= W_{alloy} + W_{servomechanism} \\ \Rightarrow W_{total} &= 0.675kg + 0.188kg \quad (4.3) \\ \Rightarrow W_{total} &= 0.863kg\end{aligned}$$

Θεωρώντας ότι κέντρο μάζας, στην τεντωμένη διαμόρφωση, είναι 20 cm από την άρθρωσή μας:

$$\begin{aligned}
\tau &= F \cdot r \\
\Rightarrow \tau &= 0.863kg \cdot 20cm & (4.4) \\
\Rightarrow \tau &= 17.26kg \cdot cm
\end{aligned}$$

Έτσι, ο σερβομηχανισμός θα δεχόταν ροπή 17.26 kg·cm, αφήνοντας καθαρή ροπή:

$$\begin{aligned}
\tau_f &= \tau_0 - \tau \\
\Rightarrow \tau_f &= 40kg \cdot cm - 17.26kg \cdot cm & (4.5) \\
\Rightarrow \tau_f &= 22.74kg \cdot cm
\end{aligned}$$

Αν διαρέσουμε την τελευταία τιμή με την απόσταση των 50 cm, έχουμε:

$$\begin{aligned}
\tau_f &= F_f \cdot r \\
\Rightarrow F_f &= \frac{\tau_f}{r} \\
\Rightarrow F_f &= \frac{22.74kg \cdot cm}{50cm} & (4.5) \\
\Rightarrow F &= 0.4548kg \\
\Rightarrow F &= 454.8g
\end{aligned}$$

Κάτι που σημαίνει απώλεια:

$$\begin{aligned}
\%loss &= \frac{actual\ weight}{theoretical\ weight} \cdot 100\% \\
\Rightarrow \%loss &= \frac{454.8g}{800g} \cdot 100\% & (4.6) \\
\Rightarrow \%loss &= 0.5685 \cdot 100\% \\
\Rightarrow \%loss &= 56.85 \cdot 100\%
\end{aligned}$$

από τη θεωρητική τιμή.

## 5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Για τον υπολογισμό του κόστους του ρομποτικού βραχίονα που κατασκευάστηκε στο παρόν εργαστήριο, πρέπει να προσθέσουμε το κόστος των επί μέρους τμημάτων, συν το εργατικό κόστος.

Στον Πίνακα Π.5.1 παρουσιάζονται τα κόστη των επί μέρους τμημάτων, οι διαδικτυακοί τόποι αγοράς και το εργατικό κόστος.

<b>Πίνακας Π.5.1:</b> Τμήματα ρομποτικού βραχίονα.					
<b>Τμήμα</b>	<b>Τύπος</b>	<b>Τόπος αγοράς</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>Κόστος τεμαχίου</b>	<b>Συνολικό κόστος</b>
Βάση	Vigor VSD-11YMB MG/HV Extra Large 360 Degree/Winch Servo 0.75sec / 40kg / 150g	[5]	1	14.55€	14.55€
Άκρο (Δαγκάνα)	DELUXE HiTEC HS-422	[6]	1	\$17.95 (14.5036€)	14.5036€

Σερβοκινητήρες	TURNIGY TGY-1270HV Metal gear Digital Servo	[7]	6	27.28€	163.68€
Ενδιάμεσα τμήματα	Φύλλο αλουμινίου τύπου 6061	-	1	600€ (2x2m <sup>2</sup> )	75€
Εργατικό κόστος	Χειρωνακτικοί εργάτες	-	1 (2 ημέρες)	50€	100€
Συνολικό όστος					367.86€

Άρα, το συνολικό κόστος του ρομποτικού βραχίονα που κατασκευάστηκε στο παρόν εργαστήριο, είναι χοντρικά 370€.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1. Ρομποτική

Αναμφίβολα, τα ρομπότ αποτελούν ήδη ένα χρήσιμο εργαλείο τόσο στη βιομηχανία, όσο και στην καθημερινή ζωή. Πλήθος εργασιών σε σημεία όπου η ανθρώπινη πρόσβαση είναι δύσκολη ή και αδύνατη, επιτελούνται ήδη από ρομπότ. Καθώς η πρόοδος της τεχνολογίας θα αυξάνει, το πλήθος αυτών των εργασιών που θα επιτελούνται από ρομπότ θα αυξάνει επίσης. Επιπλέον, τέτοιες εργασίες δεν σχετίζονται μόνο με πρακτικά θέματα (βιομηχανία, γεωργία, αεροναυπηγική, οδοποιία, ναυπηγική κλπ.), αλλά και με αυτή καθαυτή την έρευνα (διαστημική, υποβρύχια εξερεύνηση, δοκιμές σε χημικούς και βιολογικούς αντιδραστήρες με επικίνδυνα υλικά κλπ.).

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως, η μελέτη και η κατασκευή ρομποτικών βραχιόνων, οι οποίοι θα επιτελούν ολοένα και πιο εξειδικευμένες και δύσκολες εργασίες, είναι ένα πεδίο έρευνας το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

## **6.2. Σχεδιασμός ρομποτικού βραχίονα**

Για τον σχεδιασμό του ρομποτικού βραχίονα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SOLIDWORKS. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει την ευκολία του σχεδιασμού κάθε τμήματος του ρομποτικού βραχίονα χωριστά, και κατόπιν τη συνένωσή τους. Οι εντολές που παρέχονται από το πρόγραμμα καθιστούν εύκολο τον σχεδιασμό των τμημάτων, καθώς επίσης και την τροποποίησή τους. Στη συνέχεια, η συνένωσή τους αποτελεί εύκολη διαδικασία, με την ευχέρεια συνδυασμού κομματιών και την όσο κατά το δυνατόν βέλτιστη θεωρητική προσέγγιση της κατασκευής.

## **6.3. Υπολογισμός ροπής, δύναμης και κόστους**

Σε πραγματικό επίπεδο, τα εξαρτήματα που αποκτώνται από το εμπόριο, μπορούν να δώσουν μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να υπολογιστούν οι ροπές και δυνάμεις των επί μέρους τμημάτων, και κατά συνέπεια οι δυνατότητες του ρομποτικού βραχίονα. Με κατάλληλες δοκιμές και με τη βοήθεια απλών εξισώσεων της Μηχανικής, μπορεί κάποιος να προσεγγίσει το βέλτιστο της λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα σε πραγματικές συνθήκες. Μπορεί να υπολογιστεί δηλαδή το βάρος που μπορεί να σηκώσει ο ρομποτικός βραχίονας.

Τέλος, η αγορά και απόκτηση των επί μέρους τμημάτων δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ακριβή, τουλάχιστον όσον αφορά έναν ρομποτικό βραχίονα για εργαστηριακή μελέτη και χρήση.

## **6.4 Συμπεράσματα - Αποτελέσματα προσωπικής εργασίας**

Η εργασία που ανέλαβα να υλοποιήσω και να φέρω εις πέρας μου έδωσε σημαντικά εφόδια ως προς τον τρόπο σκέψης που χρειάζεται ένας μηχανολόγος μηχανικός να λειτουργεί και τις παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν του. Στην συγκεκριμένη εργασία χρειάστηκε αρχικά να σχεδιάσω το ζητούμενο αντικείμενο, ρομποτικό βραχίονα, με την βοήθεια ενός πολύ εξελιγμένου προγράμματος σχεδίασης, το SOLIDWORKS. Ο χειρισμός του προγράμματος



απαιτούσε τις γνώσεις που μας έχουν δοθεί από τις εκπαιδευτικές ώρες στο χώρο του εργαστηρίου όπως και από την παράλληλη προσωπική εξάσκηση στο σπίτι.

Επιπλέον μέρος της εργασίας μου ήταν να πραγματοποιήσω τους απαιτούμενους υπολογισμούς ροπών, βάση των προδιαγραφών της κατασκευής και των χαρακτηριστικών των επιμέρους κινητήρων, όπως επίσης μου ζητήθηκε ο υπολογισμός του κόστους της κατασκευής κάτι που πραγματικά σου δίνει την δυνατότητα να αντιλαμβάνεσαι πλέον στην πράξη το ύψος του κόστους που απαιτείται.

Πλέον επικοδομητική ήταν και η παρουσία μου στον χώρο του εργαστηρίου κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης της κατασκευής καθώς μου δόθηκε η δυνατότητα να δω τις διαφορές του θεωρητικού από την πράξη όπου και έγιναν κάποιες διορθώσεις.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΔΙΚΤΥΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kapila V., Introduction to robotics (Πρόσβαση 15/09/2014):  
<http://mechatronics.poly.edu/smart/pdf/intro2robotics.pdf>
2. Jazar R.N., *Theory of Applied Robotics Kinematics, Dynamics, and Control*, Springer, 2010, Chapter 1, pp.: 1-14.
3. Parker L.E., Draper J.V., Robotics Applications in Maintenance and Repair, Chapter to appear in Handbook of Industrial Robotics, 2nd Edition, edited by Shimon Nof, 1998 (Πρόσβαση 15/09/2014):  
<http://web.eecs.utk.edu/~leparker/publications/Handbook99.pdf>
4. Craig J.J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Third Edition, Pearson Education, Inc., 2005, Chapter 3.
5. HobbyKing:  
[https://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_18743\\_Vigor\\_VSD\\_11YMB\\_MG\\_HV\\_Extra\\_Large\\_360\\_Degree\\_Winch\\_Servo\\_0\\_75sec\\_40kg\\_150g.html](https://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_18743_Vigor_VSD_11YMB_MG_HV_Extra_Large_360_Degree_Winch_Servo_0_75sec_40kg_150g.html)
6. Imagesco:  
<http://www.imagesco.com/servo/servo-accessories-p.html>
7. HobbyKing:  
[http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_51890\\_TGY\\_1270HV\\_Metal\\_gear\\_Digital\\_Servo\\_w\\_Heat\\_Sink\\_40kg\\_18sec\\_170g\\_EU\\_Warehouse\\_.html?strSearch=1270](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_51890_TGY_1270HV_Metal_gear_Digital_Servo_w_Heat_Sink_40kg_18sec_170g_EU_Warehouse_.html?strSearch=1270)
8. Wikipedia:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/6061\\_aluminium\\_alloy](http://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy)