



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

"ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ
ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΠΟΛΥΠΛΟΚΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ"

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Παπαδόπουλος

A.M. 46145763

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαρρής Ιωάννης

Αθήνα, 14 Μαρτίου 2023

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΙΣΗΓΗΤΗ

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	
ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	
ΣΟΦΙΑΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παπαδόπουλος Γεώργιος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 46145763 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Γεώργιος Παπαδόπουλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται παρουσίαση των τεχνολογιών του ρομποτικού βραχίονα, των στοιχείων που τον απαρτίζουν καθώς και ιστορική αναφορά στην εξέλιξή τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η μελέτη ενός ρομποτικού βραχίονα, αποκλειστικά με τη χρήση λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης σε υπολογιστή (3D Computer Aided Design - 3D CAD). Ακολουθεί σειρά σχεδίων που καταλήγουν στην παρουσίαση ενός θεωρητικά, απλού στην κατασκευή και λειτουργία, αλλά εξαιρετικά στιβαρού και ακριβή ρομποτικού βραχίονα ο οποίος στο άκρο του φέρει αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας του αέρα (hot-wire probe). Ο συγκεκριμένος ρομποτικός βραχίονας δύο περιστροφικών αρθρώσεων με δύο βαθμούς ελευθερίας (2 DOF), θα προσαρμοστεί στο πλαίσιο που ήδη βρίσκεται στο εργαστήριο αεροδυναμικής. Το πλαίσιο αυτό έχει τη δυνατότητα πρισματικής κίνησης και στις τρεις κατευθύνσεις (καρτεσιανός βραχίονας 3 DOF). Με τον τρόπο αυτό, το άκρο του αισθητήρα είναι ικανό να παρακολουθεί με ακρίβεια τη γεωμετρία ενός αντικειμένου με πολύπλοκη επιφάνεια που βρίσκεται για αεροδυναμική μελέτη στο χώρο εργασίας της αεροσήραγγας, που είναι άλλωστε και ο σκοπός αυτής της εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά: <<Ρομποτικός Βραχίονας, Hot wire>>

DIGITAL DESIGN AND DEVELOPMENT OF A ROBOTIC ARM FOR AERODYNAMIC POINT MEASUREMENTS AROUND COMPLEX GEOMETRIES

ABSTRACT

In this thesis, there is a presentation of the technologies of a robotic arm, the elements that make it up, as well as, a historical description of their evolution. Also, the design and analysis of a specific robotic arm, using exclusively 3D Computer Aided Design (3D CAD) software. A series of alternative designs were examined in order to result into a robotic arm which is theoretically simple in construction and operation, but extremely robust and accurate, that carries a sensor to measure the speed of the air (hot-wire probe). This specific robotic arm with two rotary joints and two degrees of freedom (2 DOF), will be adapted to the wind-tunnel traversing mechanism of the Aerodynamics Lab of the Mechanical Engineering Department in the University of West Attica. The combined system allows movement in all the three directions (3 DOF Cartesian arm) with the sensor tip capable to accurately track the complex surface geometry of an aerodynamic model submerged into the flow, under investigation.

Keywords: << Robotic Arm, Hot wire >>

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Ιωάννη Σαρρή και κ. Ιωάννη Λεκάκη που αφυπηρέτησε τελευταία, καθώς και τον Εργαστηριακό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής κ. Θεόδωρο Παπαδόπουλο για την εξαιρετική συνεργασία που είχα μαζί τους ως μέλος της αεροδυναμικής ομάδας. Επίσης, τους γονείς μου και φίλους που με στήριξαν με όποιον τρόπο μπορούσαν για να ολοκληρώσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	13
1.1 Ετυμολογία – Προέλευση της λέξης ρομπότ.....	13
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ	20
2.1 Γενικές εφαρμογές της ρομποτικής	20
2.2 Σκοπός της Ρομποτικής και Ορισμός.....	22
2.3 Βασικές κατηγορίες των ρομπότ	23
2.4 Γενικά Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	23
2.5 Βασικά υποσυστήματα του ρομπότ	23
2.6 Εφαρμογές Βιομηχανικού Ρομπότ	24
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	25
3.1 Δομή και Λειτουργία του Ρομποτικού Βραχίονα	25
3.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη του ρομποτικού βραχίονα	26
3.3 Είδη αρθρώσεων	28
3.4 Είδη ρομποτικών βραχιόνων.....	29
3.5 Μετατροπείς ενέργειας-ενεργοποιητές.....	32
3.6 Αισθητήρες	37
3.7 Ευθεία κινηματική ανάλυση	39
3.8 Ρομποτικός χώρος εργασίας	40
3.9 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση.....	41
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	45
4.1 Η αεροσφήρα του εργαστηρίου.....	45
4.2 Διαστάσεις φορέα αεροσφήρας	46
4.3 Το πρώτο βήμα της εργασίας.....	47
4.4 Τρισδιάστατη Σχεδίαση σε Υπολογιστή (3D Computer aided Design).....	48
4.5 Ιστορία του SolidWorks.....	49
4.6 Σταδιακή εξέλιξη σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα.....	50
4.6.1 Σχέδιο 1	50
4.6.2 Σχέδιο 2	53
4.6.3 Σχέδιο 3	55
4.6.4 Σχέδιο 4	57
4.7 Τελικός σχεδιασμός.....	655
Συμπέρασμα.....	66
Βιβλιογραφία.....	67
Ιστοσελίδες.....	68

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το βιβλίο και φωτογραφία από το θεατρικό έργο του Capek Karel (1890-1938) (R.U.R.) Rossum's Universal Robots.....	13
Εικόνα 2: Μινωικά νομίσματα με τον Τάλω που βρέθηκαν στο ανάκτορο της Φαιστού.....	14
Εικόνα 3: Ο κρατήρας του Ζωγράφου του Τάλω. Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, Νάπολη, Ιταλία.....	14
Εικόνα 4 Αφίσα Μουσείο Αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας "Κώστας Κοτσανάς"	15
Εικόνα 5 Η κούπα του δικαίου του Πυθαγόρα	15
Εικόνα 6 Ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων.....	15
Εικόνα 7 "Ο περιστρεφόμενος Φθεγγόμενος Μελαγκόρυφος"	16
Εικόνα 8 Το «ρομπότ-υπηρέτρια» του Φίλωνα.....	16
Εικόνα 9 Ένα ρομπότ τοποθετημένο σε μια μεσαιωνική πανοπλία.....	17
Εικόνα 10 Μηχανική πάπια	17
Εικόνα 11 Αυτόματα που σερβίρουν τσάι.....	17
Εικόνα 12 Droids R2-D2 και C3PO (ταινία "Πόλεμο των Άστρων", 1977)	18
Εικόνα 13 Το πρώτο Unimation ρομπότ που λειτούργησε στο εργοστάσιο της General Motors το 1961 (First Industrial Robot Ever Installed on an Assembly Line)	19
Εικόνα 14 Gizelis Robotics-Motoman σε συγκόλληση	20
Εικόνα 15 Ο ρομποτικός βραχίονας-CANADARM2 του διαστημικού σταθμού ISS.....	21
Εικόνα 16 Λαπαροσκοπική χειρουργική με τη βοήθεια του ρομπότ Versius της CMR surgical	21
Εικόνα 17 Έξυπνη ρομποτική ανάλυση φύλλων και φυλλώματος λίπανση και επικονίαση φρούτων λαχανικών.....	21
Εικόνα 18 Το kiwi Bot παραδίδει φαγητό στην περιοχή Westwood.....	22
Εικόνα 19 Κινήσεις ώμου, αγκώνα, καρπού	25
Εικόνα 20 Πνευματικοί ενεργοποιητές.....	32
Εικόνα 21 Υδραυλικοί κινητήρες.....	33
Εικόνα 22 Σωληνοειδής ηλεκτρομαγνήτης.....	34
Εικόνα 23 Ηλεκτρικοί ενεργοποιητές εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.....	34
Εικόνα 24 Βηματικός κινητήρας.....	35
Εικόνα 25 Σερβοκινητήρας	36
Εικόνα 26 Περιστροφικό ποτενσιόμετρο	37
Εικόνα 27 Σύστημα μέτρηση CTA	38
Εικόνα 28 Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του ΠΑ.Δ.Α.....	45
Εικόνα 29 Πλαίσιο καρτεσιανής κίνησης	46
Εικόνα 30 Διαστάσεις κίνησης φορέα μήκος 140cm, πλάτος 180cm και ύψος 80cm	46
Εικόνα 31 διαστάσεις ελλειπτικής διατομής εξόδου 1.0 m x 0.69m και τραπέζι πειραμάτων.....	47
Εικόνα 32 «Σχέδιο 1» ολοκληρωμένο	50
Εικόνα 33 «Σχέδιο 1» Πίσω όψη	51

Εικόνα 34 «Σχέδιο 1» Περιστρεφόμενη άρθρωση βάσης.....	51
Εικόνα 35 «Σχέδιο 1» Τομή περιστρεφόμενης άρθρωσης βάσης.....	51
Εικόνα 36 «Σχέδιο 1» Πάνω όψη του δεύτερου μέλους.....	52
Εικόνα 37 Μετατόπιση αισθητήρα βάσει υπολογισμών (Solidworks Simulation).....	52
Εικόνα 38 «Σχέδιο 2» ολοκληρωμένο.....	53
Εικόνα 39 «Σχέδιο 2» Λεπτομέρεια περιστρεφόμενης άρθρωσης βάσης αριστερά.....	53
Εικόνα 40 «Σχέδιο 2» Πάνω όψη.....	54
Εικόνα 41 «Σχέδιο 2» πάνω όψη του δεύτερου μέλους.....	54
Εικόνα 42 «Σχέδιο 3» ολοκληρωμένο.....	55
Εικόνα 43 «Σχέδιο 3» » Το δεύτερο μέλος κάθετα (-90°).....	56
Εικόνα 44 «Σχέδιο 3» Μπροστινή όψη.....	56
Εικόνα 45 «Σχέδιο 3» Πίσω όψη.....	56
Εικόνα 46 «Σχέδιο 4» ολοκληρωμένο.....	57
Εικόνα 47 «Σχέδιο 4» Το δεύτερο μέλος.....	58
Εικόνα 48 Στήριξη αισθητήρα Hot wire.....	58
Εικόνα 49 Αεροδυναμική ροή, απεικόνιση του Solidworks flow simulation.....	59
Εικόνα 50 Υπόμνημα ενδείξεων ταχυτήτων ανέμου.....	59
Εικόνα 51 Ασκούμενες πιέσεις από την ταχύτητα του ανέμου.....	60
Εικόνα 52 Ροπές δύναμης του βραχίονα.....	60
Εικόνα 53 Μετατόπιση αισθητήρα βάσει υπολογισμών (Solidworks Simulation).....	61
Εικόνα 54 Διαστάσεις βραχίονα.....	62
Εικόνα 55 Χώρος εργασίας του ρομποτικού βραχίονα.....	62
Εικόνα 56 Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα με αρίθμηση των στοιχείων που αποτελείται.....	63
Εικόνα 57 Τελικό σχέδιο.....	65
Εικόνα 58 Παρουσίαση χώρου εργασίας, σε οποιαδήποτε θέση του οποίου δυνητικά μπορεί να βρεθεί το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα μπροστά απ' την αεροσήραγγα.....	65

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Μηχανική για όλους.....	25
Σχήμα 2 Σχηματική αναπαράσταση άκαμπτου αντικειμένου 6 βαθμών ελευθερίας.....	26
Σχήμα 3 Πρισματική	28
Σχήμα 4 Περιστροφική	28
Σχήμα 5 Σφαιρική	28
Σχήμα 6 Καρτεσιανός βραχίονας.....	29
Σχήμα 7 Gantry βραχίονας τύπου γερανού οροφής προσεγγίζει το αντικείμενο από την οροφής.....	29
Σχήμα 8 Κυλινδρικός βραχίονας	30
Σχήμα 9 Σφαιρικός βραχίονας	30
Σχήμα 10 Scara βραχίονας	31
Σχήμα 11 Ανθρωπομορφικός βραχίονας	31
Σχήμα 12 Σχηματική παράσταση λειτουργίας πνευματικού ενεργοποιητή.....	32
Σχήμα 13 Επίπεδος χειριστής δύο βαθμών ελευθερίας (2-DOF)	39
Σχήμα 14 Χώρος εργασίας επίπεδου χειριστή δύο βαθμών ελευθερίας.....	41
Σχήμα 15 Αντίστροφη κινηματική λύση	44
Σχήμα 16 Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα σε σκίτσο πάνω στο φορέα.....	47
Σχήμα 17 Εμφάνιση των αντιδράσεων στις αρθρώσεις λόγω του βάρους του βραχίονα μαζί με το βάρος του αισθητήρα και της πίεσης που ασκείται επάνω του λόγω της ταχύτητας του ανέμου που περνάει από την αεροσήραγγα.....	61

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ετυμολογία και την προέλευση της λέξης ρομπότ καθώς και μία ιστορική αναδρομή για την εξέλιξή τους στο πέρασμα του χρόνου.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στη χρησιμότητα των ρομπότ και δίνεται ο ορισμός τους. Στη συνέχεια καταγράφουμε τις βασικές κατηγορίες των ρομπότ, με τη βασική τους δομή, εκθέτοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους σε σχέση με τη χρήση τους

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στις εφαρμογές και τον ορισμό του βιομηχανικού ρομπότ. Παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία τους με όλα τα μεγέθη που τα χαρακτηρίζουν. Γίνεται επίσης, ο διαχωρισμός των ρομποτικών βραχιόνων βάσει των αρθρώσεων που τους αποτελούν και επιμέρους αναφορά στον τρόπο λειτουργίας τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εξελικτική διαδικασία του σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου για αεροδυναμικές μετρήσεις, σε σχέση με τα σώματα που βρίσκονται στον ερευνητικό χώρο εργασίας της.

Ακολουθούν σχετικές παρατηρήσεις, συμπεράσματα που εξάγονται από αυτές και προτάσεις βελτίωσης.

Τέλος, παρουσιάζονται οι πηγές της εργασίας με όλη τη σχετική βιβλιογραφία.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΑ ΡΟΜΠΟΤ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ

1.1 Ετυμολογία – Προέλευση της λέξης ρομπότ

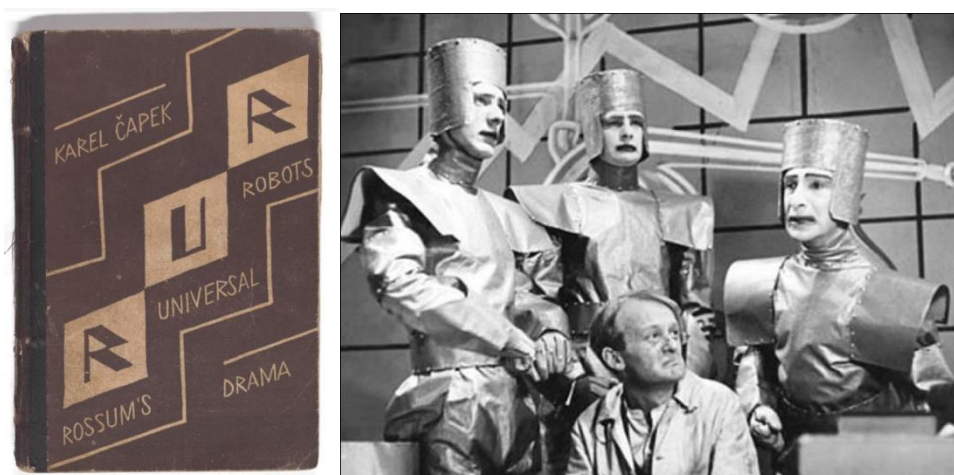
>Ρομπότ:

1. Ανθρωπόμορφο μηχανικό κατασκεύασμα που μπορεί να αντικαταστήσει τον άνθρωπο σε κάποια εργασία.

2. (μεταφορικά) Πρόσωπο χωρίς πρωτοβουλία
(Νέον Ορθογραφικόν Λεξικόν Δ. Δημητράτος 1964)[10]

>Ρομπότ [ετυμολογία <Τσέχια robot (<robota «εργασία, έργο»)]
(Λεξικό Νέας Ελληνικής Γλώσσας Γ. Μπαμπινιώτη έκδοση 2008)[11]

Πράγματι, στη “Μηχανή του Χρόνου” διαβάζουμε ότι, η τσέχικη λέξη “ρομπότ” προέκυψε από τους σκλάβους (robotics) που δούλευαν καταναγκαστικά στα χωράφια των αφεντικών τους. Ο Τσέχος συγγραφέας Κάρελ Τσάπεκ τη χρησιμοποίησε στο έργο του “Rossum’s Universal Robots” πού πρωτοπαίχτηκε στο Εθνικό Θέατρο της Πράγας το 1921. Ο ήρωας του έργου είναι ο Rossum, ένας επιστήμονας που, θέλοντας να απαλλάξει τον άνθρωπο από κουραστική και επίπονη εργασία, κατασκευάζει (από συνθετική, οργανική ύλη!!) άψυχα και χωρίς πάθη ανθρωποειδή τα οποία όμως, όντας πιο δυνατά και ευφυή από τον άνθρωπο, επαναστατούν και εξολοθρεύουν ολόκληρη την ανθρωπότητα, πλην ενός. [12] [13] [15]



Εικόνα 1: Το βιβλίο και φωτογραφία από το θεατρικό έργο του Čapek Karel (1890-1938) (R.U.R.)
Rossum's Universal Robots

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το προφητικό αυτό θεατρικό έργο του Τσάπεκ, της βιομηχανοποιημένης κοινωνίας εκφράζει τους προβληματισμούς και το φόβο των ανθρώπων για την ενδεχόμενη αντικατάστασή τους από τις μηχανές. Επιβεβαιώνει όμως και την από αρχαίων χρόνων ανάγκη τους να εφευρίσκουν τρόπους και συστήματα που θα διευκολύνουν την επιβίωσή τους.

- Ο Προμηθέας έφτιαξε την ανθρωπότητα από πηλό και ο Τσάπεκ αναφέρει ότι εμπνεύστηκε από τα Γκόλεμ του εβραϊκού μύθου που ήταν πήλινοι στρατιώτες.
- Στην ελληνική μυθολογία, ο Δίας κάνει δώρο στην αγαπημένη του Ευρώπη έναν χρυσό σκύλο που δεν του ξεφεύγει κανείς, μία φαρέτρα με βέλη που δεν χάνουν ποτέ το στόχο τους και τον Τάλω τον ακοίμητο, γιγάντιο, ανθρωπόμορφο φρουρό της Μινωϊκής Κρήτης, φτιαγμένο από το θεό Ήφαιστο από χαλκό, ικανό να την διατρέχει, τρεις φορές την ημέρα προκειμένου να την προστατέψει από εχθρικές επιδρομές. [14]



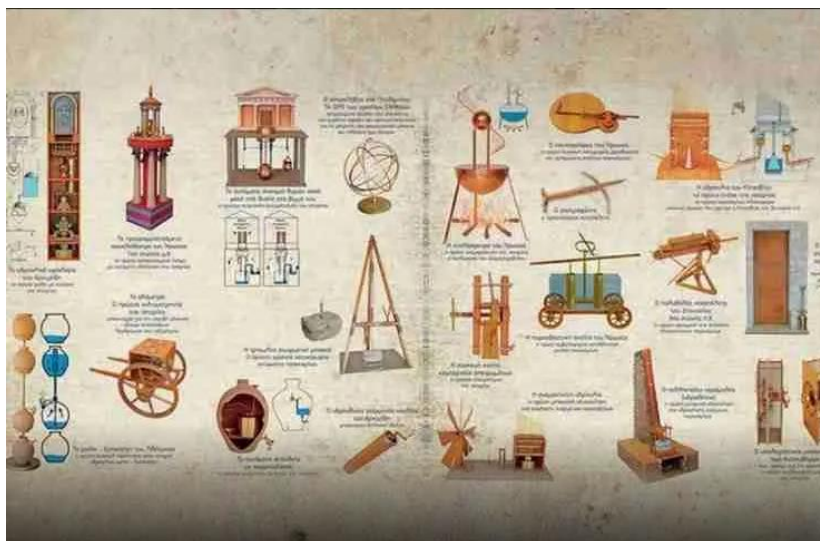
Εικόνα 2: Μινωϊκά νομίσματα με τον Τάλω που βρέθηκαν στο ανάκτορο της Φαιστού



“Η Μήδεια ανοίγει τη μία και μοναδική φλέβα του Ταντάλου ο οποίος πίστεψε ότι θα μπορούσε να μεταλλαχθεί από μηχανή σε έμβιον πάντα αυτού όμως αδειάζει από ενέργεια και πεθαίνει” [16]

Εικόνα 3: Ο κρατήρας του Ζωγράφου του Τάλω. Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, Νάπολη, Ιταλία.

Πέρα όμως από το μύθο, ένα ταξίδι σε πραγματικό παρελθόντα χρόνο, μας κάνει σήμερα γνωστές, περισσότερες από 300 εφευρέσεις των Αρχαίων Ελλήνων και Αλεξανδρινών, οι οποίοι χρησιμοποίησαν τις επιστήμες των Μαθηματικών, της Γεωγραφίας, της Φυσικής και της Αστρονομίας για να εφεύρουν αυτόματες μηχανές που αποτέλεσαν τους προδρόμους όλων των σημερινών αυτόματων μηχανών και της τεχνολογίας. Τα τεχνολογικά αυτά ευρήματα μπορούμε να τα θαυμάσουμε στο Μουσείο Αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας “Κώστας Κοτσανάς” στο Κατάκολο της Ηλείας.[17]



Εικόνα 4 Αφίσα Μουσείο Αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας "Κώστας Κοτσανάς"

Ενδεικτικά αναφέρω:

- την κούπα του δικαίου του Πυθαγόρα που όταν ξεπερνούσε το μετρό στο κρασί, άδειαζε αυτόματα (Εικόνα 5)
- τον υδραυλικό τηλέγραφο του Αινεία
- τον κινηματογράφο του Ήρωνα
- το ξυπνητήρι του Πλάτωνα και του Αριστοτέλη
- τον αστρολάβο του Πτολεμαίου και
- τον αναλογικό υπολογιστή των Αντικυθήρων (Εικόνα 6)[18]



Εικόνα 5 Η κούπα του δικαίου του Πυθαγόρα



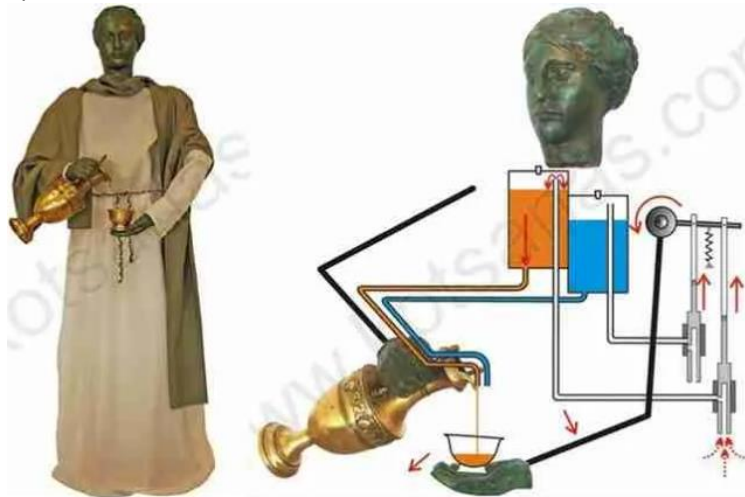
Εικόνα 6 Ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων

Ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς στο βιβλίο του “Πνευματικά” περιγράφει 80 περίπου αυτοματισμούς(Εικόνα 7).



Εικόνα 7 “Ο περιστρεφόμενος Φθεγγόμενος Μελαγκόρυφος” γνωστός ως “Το πουλί που κελαηδά”

Το πρώτο λειτουργικό, ανθρωποειδές ρομπότ σε φυσικό μέγεθος που εκτέλεσε χρέη οινόχης (Εικόνα 8).[19]



Εικόνα 8 Το «ρομπότ-υπηρέτρια» του Φίλωνα

- Την ίδια εποχή, αυτοί οι αλεξανδρινοί μηχανικοί του 1^ο αιώνα μ.Χ. (Φίλωνας και Ήρωνας) ανακατασκευάζουν τους προγραμματιζόμενους αυτοκινούμενους σε χρυσές ρόδες τρίποδες, πού, σύμφωνα με τον Όμηρο, ήταν έργο του Ηφαίστου και πηγαινοερχότανε ως ρομπότ-υπηρέτες από το Οίκημα στην Σύναξη των Θεών.
- Τα επιτεύγματά του Ελληνικού κόσμου πέρασαν στη διάθεση των Ρωμαίων, των Βυζαντινών, καθώς και των Αράβων που επιδίδονταν πολύ συχνά στην κατασκευή Αυτόματων. Το 1^ο ανθρωποειδές αυτόματο του Μεσαίωνα είναι ένας τυμπανιστής, κατασκευασμένος από του Αλ. Γκαζάρι.

- Το 1495, ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι κατασκευάζει ένα αυτόματο ανθρωποειδές για μάχη. Είναι ένας πολεμιστής σε μεσαιωνική πανοπλία που μπορεί να κάθεται, να σηκώνεται, να κινεί χέρια και κεφάλι και να ανασηκώνει το κλείστρο του κράνους του. [20]



Εικόνα 9 Ένα ρομπότ τοποθετημένο σε μια μεσαιωνική πανοπλία

- Το 1709 ο Γάλλος Ζακ Ντε Βωκανσάν κατασκευάζει μία “πάπια” που κουνάει τα φτερά της, τρώει σπόρους σίτου και μετά τους “χωνεύει”.



Εικόνα 10 Μηχανική πάπια

- Τον 19^ο αιώνα ο Ιάπωνας Τανάκα δημιουργεί ρομποτάκια που ζωγραφίζουν ιδεογράμματα και σερβίρουν τσάι.[21]



Εικόνα 11 Αυτόματα που σερβίρουν τσάι

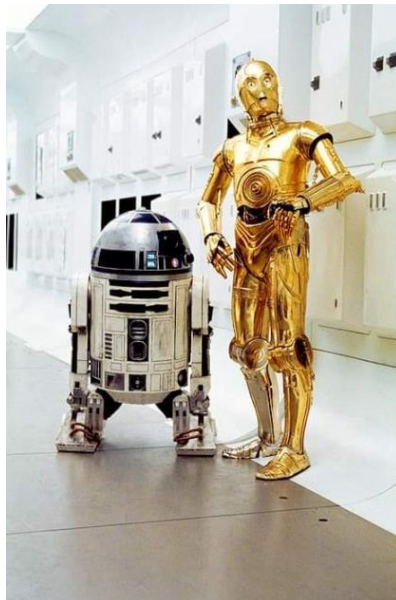
- Στα τέλη (1898) του 19^{ου} αιώνα ο Ελληνικής καταγωγής Σέρβος Nikola Tesla, (Νικόλαος ο Θεσσαλός) παρουσιάζει το πρώτο τηλεχειριζόμενο πλοίο που αποτελεί σημαντική πρόοδο για τα σημερινά ρομπότ.

Βρισκόμαστε στην αρχή μιας Νέας Εποχής. Η Βιομηχανοποιημένη κοινωνία (που προφήτεψε ο Τσάπεκ) είναι πραγματικότητα και τα συμπτώματα της, θετικά ή αρνητικά, είναι πλέον εμφανή.

“Ζούμε σε μία προνομιούχο, επειδή σήμερα, όπως ποτέ πριν, μπορούμε να επιλέξουμε οποιοδήποτε είδος καταστροφής επιθυμούμε «ανάλογα με τα γούστα μας»”. Θα πει ο Ισαάκ Ασίμωφ, Ρώσος χημικός και συγγραφέας βιβλίων επιστημονικής φαντασίας. Απόσπασμα από αφιέρωμα στον ίδιο 100 χρόνια μετά τη γέννηση του στην εφημερίδα “Βήμα της Κυριακής 5-1-2020”. Στο ίδιο απόσπασμα διαβάζουμε ότι, εν αγνοία του, επινόησε τον όρο “Ρομποτική” το 1941, πιστεύοντας ότι η λέξη προϋπήρχε στα Αγγλικά και έθεσε τρεις κανόνες ηθικής που οφείλουν να διέπουν τη σχέση ενός ανθρωπόμορφου ρομπότ με τον άνθρωπο.

Ένα καλό ρομπότ (droid) (Εικόνα 12)[22] με ποζιτρονικό εγκέφαλο χωρίς αισθήματα:

- 1) Δεν επιτρέπεται, ούτε να βλάπτει τον άνθρωπο, ούτε με την αδράνεια, να αφήσει να πάθει κακό.
- 2) Πρέπει να υπακούει στις εντολές του ανθρώπου, εκτός αν αυτές είναι αντίθετες με τον πρώτο κανόνα.
- 3) Να προστατεύει την ύπαρξη του, εκτός αν αυτές είναι αντίθετο με τον 1^ο και 2^ο νόμο.



Εικόνα 12 Droids R2-D2 και C3PO (ταινία “Πόλεμο των Άστρων”, 1977)

- Το 1954 δίνεται στον George C. Devol το 1^ο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αυτό που σήμερα θεωρούμε ρομπότ. Το 1956 ιδρύεται από τον ίδιο και τον Joseph Engelberger η πρώτη εταιρεία Ρομποτικής η Unimation και δημιουργείται το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε στον τομέα της συγκόλλησης σε μία γραμμή παραγωγής της General Motors το 1961 (Εικόνα 13)[23].



Εικόνα 13 Το πρώτο Unimation ρομπότ που λειτούργησε στο εργοστάσιο της General Motors το 1961 (First Industrial Robot Ever Installed on an Assembly Line)

ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 Γενικές εφαρμογές της ρομποτικής

Στο Βιβλίο "Ρομποτική για Μηχανικούς" αναφέρεται ότι:

- Τα ρομπότ 1^{ης} γενιάς χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία με μειωμένο βαθμό αυτονομίας και χωρίς ικανότητα υπολογισμού και αίσθησης.
- Τα ρομπότ 2^{ης} γενιάς διαθέτουν περιορισμένη ικανότητα υπολογισμού, γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και αισθητήρες ανατροφοδότησης, ενώ
- τα ρομπότ 3^{ης} γενιάς είναι εφοδιασμένα με εξελιγμένες μορφές αισθητήρων και νοημοσύνη τέτοια που τα καθιστά ικανά να παίρνουν αποφάσεις.

Οι **ικανότητες** των ρομπότ είναι

- η μεταφορά
- η μεταχείριση
- η αίσθηση

Οι **εφαρμογές** τους αφορούν:

- 1) Στη βιομηχανία ως ρομπότ κατασκευών, ευελιξίας και ταχύτητας (ρομποτικοί βραχίονες)[24]



Εικόνα 14 Gizelis Robotics-Motoman σε συγκόλληση

- 2) Σε απομακρυσμένες εξερευνήσεις π.χ. διαστήματος ή βυθού [25]



Εικόνα 15 Ο ρομποτικός βραχίονας-CANADARM2 του διαστημικού σταθμού ISS

- 3) Στην Ιατρική π.χ. χειρουργικές επεμβάσεις ή προσθετική ανθρώπινων μελών [26]



Εικόνα 16 Λαπαροσκοπική χειρουργική με τη βοήθεια του ρομπότ Versius της CMR surgical

- 4) Στην Ανίχνευση-Ανάλυση εδαφών και Διαχείριση επικίνδυνων υλικών [27]



Εικόνα 17 Έξυπνη ρομποτική ανάλυση φύλλων και φυλλώματος λίπανση και επικονίαση φρούτων λαχανικών

- 5) Σε Υπηρεσίες π.χ. ασφάλειας, πυρασφάλειας, επίβλεψης, διανομής, νοσοκομείων, παροχής βοήθειας, διασκέδασης και άλλα [28]



Εικόνα 18 Το kiwi Bot παραδίδει φαγητό στην περιοχή Westwood

2.2 Σκοπός της Ρομποτικής και Ορισμός

Παρατηρούμε ότι ο **σκοπός** της δημιουργίας και χρήσης μηχανών, αυτόματων ή ρομποτικών ήταν, από πάντα, η εξυπηρέτηση του ανθρώπου σε αντίξοες συνθήκες. Η γρήγορη ανάπτυξη όλων των Επιστημών ήταν φυσικό να οδηγήσει στην εξέλιξη των ρομποτικών μηχανών. Ο Brady [Bra89] ορίζει τη ρομποτική ως “...την ευφυή σύνδεση της αντίληψης με τη δράση”.

Θα λέγαμε επομένως ότι **Ρομποτική** είναι η Επιστήμη που στηρίζεται στις επιστήμες των Μαθηματικών, των Υπολογιστών, της Μηχανολογίας, της Ηλεκτρολογίας και της Ψυχολογίας για να σχεδιάζει, να κατασκευάζει και να προγραμματίζει, κατόπιν μελέτης, ρομποτικές μηχανές ικανές να αντικαθιστούν τον άνθρωπο για την επίλυση προβλημάτων, καθώς επίσης και να μελετά τους μηχανισμούς ελέγχου, αίσθησης και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στον άνθρωπο, τα ζώα και τις μηχανές, προκειμένου να εφαρμοστούν στα Ρομπότ.

Σύμφωνα με τον ορισμό του Ινστιτούτου Ρομποτικής των ΗΠΑ, “Ρομπότ είναι μία επαναπρογραμματιζόμενη, πολυλειτουργική διάταξη, σχεδιασμένη για την μετακίνηση υλικών, εξαρτημάτων, εργαλείων και εξειδικευμένων διατάξεων, μέσω μεταβλητών, προγραμματισμένων κινήσεων για την εκτέλεση μιας σειράς εργασιών”.

Θα μπορούσαμε όμως να ορίσουμε ως **Ρομπότ** μία μηχανή ικανή να αισθάνεται το περιβάλλον και να χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που λαμβάνει από αυτό, με στόχο, να σχεδιάσει μία δράση δύσκολη ή επικίνδυνη την οποία ο άνθρωπος θα δυσκολευόταν, ή θα ήταν ανίκανος να εκτελέσει.

2.3 Βασικές κατηγορίες των ρομπότ

Τα ρομπότ χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- 1) **σταθερής βάσης** (ρομποτικοί βραχίονες)
- 2) **κινούμενα**:
 - α) αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα (Automatic Guided Vehicles)
 - β) αυτόνομα έντροχα δηλαδή με τροχούς
 - γ) υποβρύχια συνδεδεμένα με το μητρικό πλοίο
 - δ) αυτόνομα υποβρύχια
 - ε) βαδίζοντα και σε ανώμαλα εδάφη, μιμούμενα τις κινήσεις ανθρώπων και ζώων
 - στ) εναέρια drones αυτόνομα ή καθοδηγούμενα

2.4 Γενικά Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Συνοπτικά θα λέγαμε ότι τα πλεονεκτήματα είναι

- η ασφάλεια των εργαζομένων
- η υψηλότερη παραγωγικότητα
- η ευελιξία της λειτουργίας τους
- η πρόσβαση σε δυσπρόσιτα μέρη

Ενώ μειονεκτήματα είναι

- η δυσκολία προγραμματισμού λόγω χαμηλότερης “νοημοσύνης” τους από τον άνθρωπο
- η ακρίβεια εκτέλεσης της εργασίας
- το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης, εκπαίδευσης, κλπ.

2.5 Βασικά υποσυστήματα του ρομπότ

Τα ρομπότ αποτελούνται από τρία βασικά υποσυστήματα:

1. Το **μηχανολογικό** υποσύστημα που με μηχανισμούς αρθρώσεων, ενεργοποιητών, οδηγών κλπ
 - είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση του έργου.
2. Το υποσύστημα της **αίσθησης** που με όργανα μέτρησης, αισθητήρες, ηλεκτρονικά κλπ είναι υπεύθυνο:
 - να συγκεντρώνει πληροφορίες από το περιβάλλον
 - να δέχεται εντολές
 - να τις επεξεργάζεται
 - να τις μεταδίδει μέσω ηλεκτρικής ισχύος στους κινητήρες του ρομπότ
 - να πληροφορεί μέσω σημάτων εξόδου για την κατάσταση του συστήματος
3. Το **σύστημα ελέγχου** που με τη βοήθεια της μηχανολογίας, της ηλεκτρολογίας, της επιστήμης των υπολογιστών, της τεχνητής νοημοσύνης, της θεωρίας του αυτόματου ελέγχου κλπ
 - είναι υπεύθυνο να επιβλέπει και να συντονίζει την υλοποίηση του έργου.

2.6 Εφαρμογές Βιομηχανικού Ρομπότ

Το βιομηχανικό ρομπότ, ή ρομποτικός βραχίονας ανήκει στην κατηγορία των ρομπότ σταθερής βάσης και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για τη διαχείριση υλικών, φορτοεκφόρτωση, ψεκασμό, ηλεκτροσυγκόλληση, μηχανουργικές εργασίες, συναρμολόγηση, επιθεώρηση, και έλεγχο ποιότητας.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

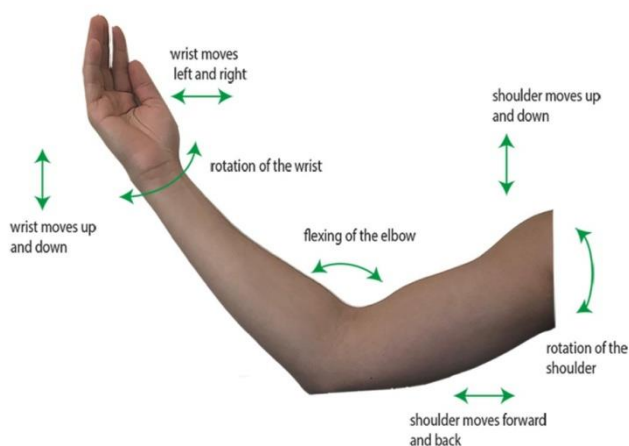
ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ

3.1 Δομή και Λειτουργία του Ρομποτικού Βραχίονα

Ο ρομποτικός βραχίονας είναι ένας ελεγχόμενος μηχανικός βραχίονας προγραμματισμένος να εκτελεί λειτουργίες παρόμοιες με αυτές του ανθρώπινου χεριού (Εικόνα19) [29].



Σχήμα 1 Μηχανική για όλους



Εικόνα 19 Κινήσεις ώμου, αγκώνα, καρπού

- Η Μηχανική Δομή συνίσταται από μία αλυσίδα στερεών σωμάτων που είναι:
 1. η βάση στήριξης
 2. ο βραχίονας (κορμός) που αποτελείται από:
 - Συνδέσμους (links) άκαμπτα μέρη συνδεδεμένα μεταξύ τους με
 - Αρθρώσεις (joints) που επιτρέπουν την γύρω από έναν άξονα, περιστροφική κίνηση ή την κατά μήκος ενός άξονα, γραμμική μετατόπιση.
 3. ο καρπός που συνδέεται με το βραχίονα με αρθρώσεις και το άκρο του ορίζεται ως:
 4. το τελικό στοιχείο δράσης (end effector) καθώς πάνω του είναι προσαρμοσμένο ένα εργαλείο (π.χ. πινέλο, τριβείο κλπ) ή αρπαγή.

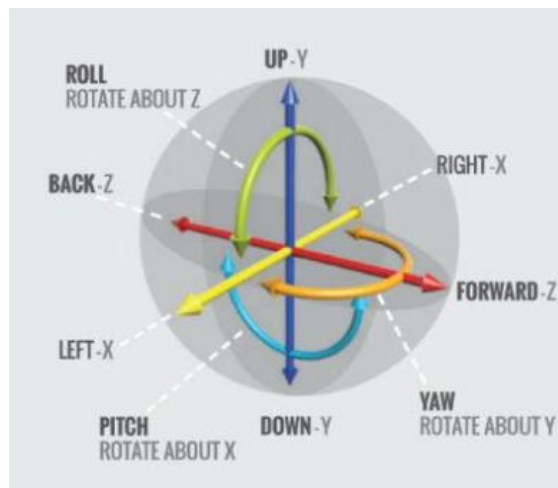
Σε κάθε άρθρωση, αντιστοιχεί ένας κινητήρας, ή αλλιώς

1. **ένας ενεργοποιητής** που προκαλεί την κίνηση της και μπορεί να είναι:
 - ηλεκτρικός (σερβοκινητήρας ή βηματικός)
 - υδραυλικός (έμβολα)
 - πνευματικός (αεροσυμπιεστής)
 2. το **σύστημα μετάδοσης** της κίνησης που γίνεται με οδοντωτούς τροχούς, μάντες ή με απευθείας οδήγηση.
 3. οι **αισθητήρες** (π.χ. ποτενσιόμετρα, ταχύμετρα, ψηφιακοί οπτικοί κωδικοποιητές κλπ) που μετρούν τη θέση και την ταχύτητα μιας άρθρωσης.
- ο **Το Σύστημα Ελέγχου**, (ο εγκέφαλος του ρομπότ), είναι ένα υπολογιστικό σύστημα που με το κατάλληλο λογισμικό,
- παίρνει τα δεδομένα από το χρήστη ή από αισθητήρες και
 - τα αποθηκεύει στον ελεγκτή.
- Ο **ελεγκτής**, μέσω των **ηλεκτρονικών επικοινωνιών**, συνδέεται με το ρομπότ, το εξωτερικό περιβάλλον και τον υπολογιστή.
- Τα **σήματα ελέγχου** που κινούν τις αρθρώσεις ενισχύονται από **ενισχυτές ισχύος** και δημιουργούνται χάρη στο λογισμικό.
- Το **λογισμικό**, σύμφωνα με κάποιο αλγόριθμο, υπολογίζει τις μεταβλητές του ρομπότ, όπως φορτίο, ταχύτητα, θέση κλπ.

3.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη του ρομποτικού βραχίονα

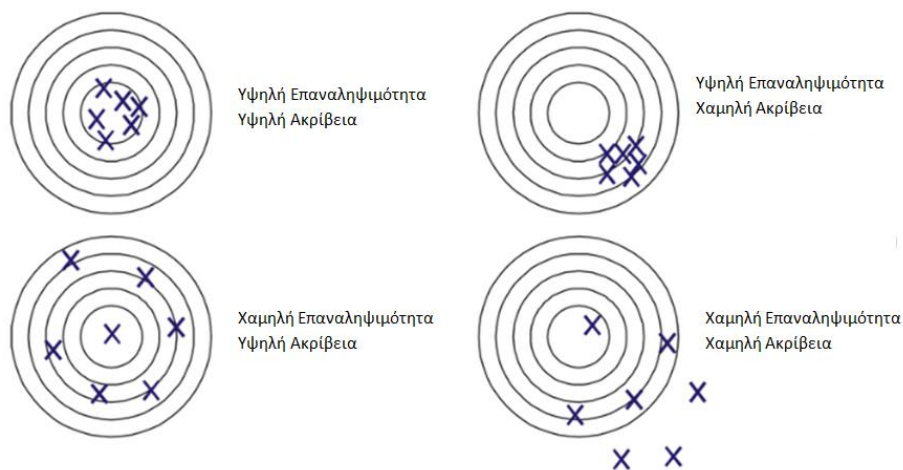
- Βαθμός κινητικότητας
- Βαθμός ελευθερίας
- Επαναληπτικότητα
- Ακρίβεια
- Φορτίο

Κάθε άρθρωση συμβάλλει στην κίνηση του ρομπότ με έναν **βαθμό κινητικότητας**, έτσι, σε κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί ένας **βαθμός ελευθερίας**. Επομένως, ένας βραχίονας με (n) αριθμούς αρθρώσεων έχει και (n) αριθμούς ελευθερίας.[30]



Σχήμα 2 Σχηματική αναπαράσταση άκαμπτου αντικειμένου 6 βαθμών ελευθερίας

- Οι τρεις οριζόντιοι άξονες (εμπρός-πίσω, πάνω-κάτω, δεξιά-αριστερά), ορίζουν τις μεταφορικές κινήσεις του σώματος, δηλαδή τη **θέση** του, όπου, για την τοποθέτησή του απαιτούνται τρεις βαθμοί ελευθερίας που αντιστοιχούν σε τρεις αρθρώσεις.
- Αντίστοιχα, οι τρεις περιστροφές γύρω από αυτούς μέσω των περιστροφικών αρθρώσεων, υλοποιούν τους τρεις αναγκαίους βαθμούς ελευθερίας για τον **προσανατολισμό** του.
- Επομένως η ελεύθερη κίνηση ενός ρομπότ στο χώρο προϋποθέτει την ύπαρξη βραχίονα με έξι αρθρώσεις (ελεύθερος βραχίονας)
- **Επαναληψιμότητα** ως ικανότητα, είναι η χαρακτηριστική διάσταση του χώρου ή όγκου (mm) μέσα στον οποίο το ρομπότ θα τοποθετήσει το άκρο του με μικρή σχετικά απόκλιση, όταν κινηθεί κατά επανάληψη από μία αρχική θέση σε μία επιθυμητή, κάτω από τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος, φορτίου και εργασίας.
- **Ακρίβεια** είναι η ικανότητα ενός βραχίονα να τοποθετήσει το άκρο του σε ορισμένο χώρο ανάλογα με το κέντρο της επιθυμητής θέσης εργασίας αυτού του χώρου.

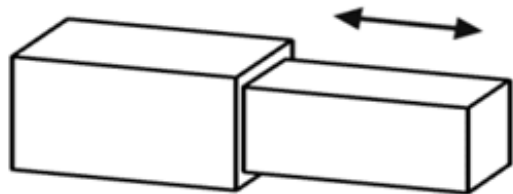


Η ακρίβεια είναι ικανοποιητική όταν οι επιθυμητές θέσεις είναι κοντά στο κέντρο του χώρου εργασίας, αλλά μικρή όταν οι θέσεις είναι κοντά στα όρια του χώρου, όπου ο βραχίονας είναι σχεδόν εκτεταμένος.

- **Φορτίο** είναι το μέγιστο βάρος του σώματος που μπορεί να χειριστεί το ρομπότ βάσει των κατασκευαστικών του προδιαγραφών.
Το φορτίο των σερβοκινούμενων ρομπότ είναι από 100gr έως 80kg, ενώ των υδραυλικών φτάνει τα 300 kg

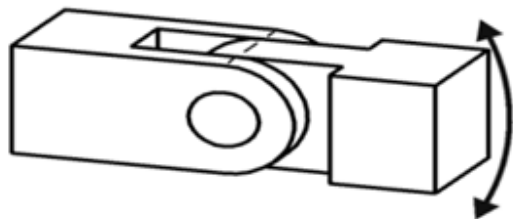
Όταν η **αρχή** μιας κινηματικής αλυσίδας, που απαρτίζεται από το σύνολο των αρθρώσεων και των συνδέσμων, συνδέεται με το **τέλος** της τότε σχηματίζεται βρόγχος και έχουμε **κλειστή κινηματική αλυσίδα**. Όταν όμως η αρχή της **δεν** συνδέεται με το τέλος της, δεν σχηματίζεται βρόγχος και η αλυσίδα ονομάζεται **ανοιχτή κινηματική αλυσίδα**.

3.3 Είδη αρθρώσεων



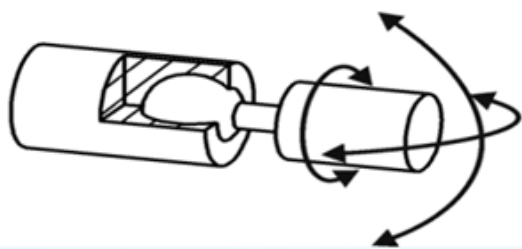
Σχήμα 3 Πρισματική

Επιτρέπουν σχετική μεταφορική κίνηση κατά μήκος του άξονα.



Σχήμα 4 Περιστροφική

Επιτρέπουν σχετική περιστροφή γύρω από τον άξονα της άρθρωσης.



Σχήμα 5 Σφαιρική

Η σχετική μετατόπιση γίνεται με μεγαλύτερη ελευθερία στο χώρο.

3.4 Είδη ρομποτικών βραχιόνων

Οι βραχίονες ταξινομούνται βάσει της γεωμετρικής τους διαμόρφωσης. Το είδος τους εξαρτάται από το συνδυασμό των τριών πρώτων αρθρώσεων του βραχίονα, οι οποίες προσδίδουν και την ανάλογη κινητικότητα στο μηχανισμό του ρομπότ.

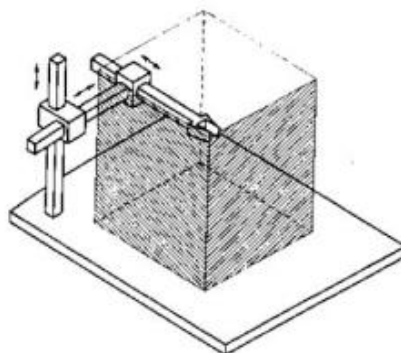
Συγκεκριμένα, τα είδη που διακρίνουμε είναι:

- 1) Οι **καρτεσιανοί** ρομποτικοί βραχίονες αποτελούνται από τρεις πρισματικές αρθρώσεις που συνδέουν άξονες ορθογώνιους μεταξύ τους (90°)

Χαρακτηριστικά: (+) μεγάλη ακρίβεια σε όλο το χώρο εργασίας λόγω υψηλής σταθερότητας και αντοχής

(-) δυσκαμψία

Χρήση: Ιδανική για διεργασίες αριθμητικού ελέγχου (CNC) όπως π.χ. η φρέζα, 3D εκτυπωτές, plotter μηχανήματα.



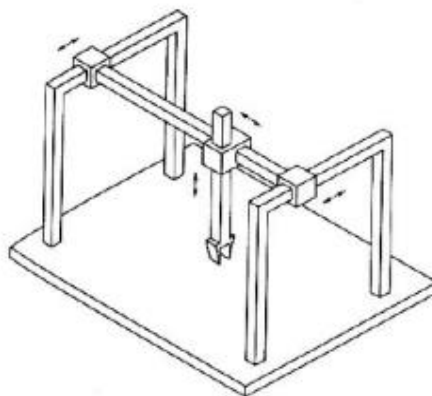
Σχήμα 6 Καρτεσιανός βραχίονας

- 2) Καρτεσιανής γεωμετρίας είναι και οι βραχίονες **Gantry**

Χαρακτηριστικά: (+) Μεγαλύτερος χώρος εργασίας
Μεγάλη ακρίβεια στη μεταφορά μεγαλύτερων και βαρύτερων αντικειμένων

(-) Μεγαλύτερη δυσκαμψία

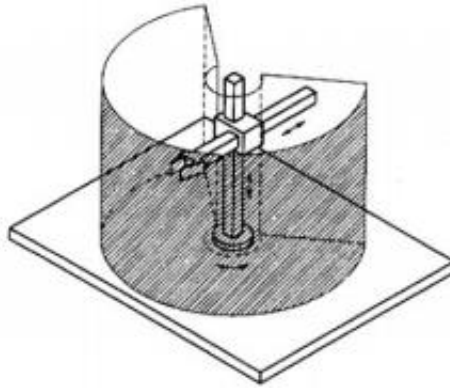
Χρήση: Σε φόρτωση και εκφόρτωση αποθηκών.



Σχήμα 7 Gantry βραχίονας τύπου γερανού οροφής προσεγγίζει το αντικείμενο από την οροφής

- 3) Οι **κυλινδρικοί** αποτελούνται από τρεις αρθρώσεις.
Μία πρώτη περιστροφική στη βάση στήριξης και δύο γραμμικές

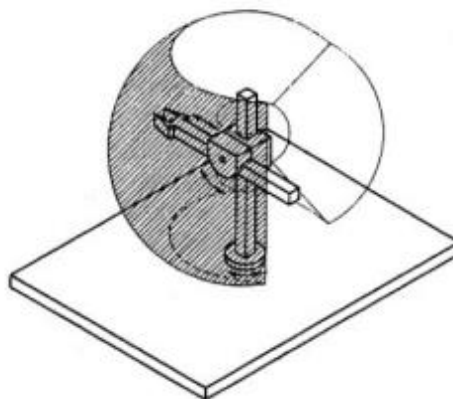
Χαρακτηριστικά: (+)	Σταθερότητα χάρη στη δυσκαμψία και τους περιορισμούς της κίνησης και του χώρου.
(-)	Περιορισμένη κίνηση λόγω περιστροφής γύρω από τον άξονά Περιορισμένος χώρος εργασίας Περιορισμένη ακρίβεια θέσεις λόγω αύξησης της οριζόντιας μετατόπισης του άκρου του βραχίονα.
Χρήση:	Σε χώρους κυλινδρικής γεωμετρίας.



Σχήμα 8 Κυλινδρικός βραχίονας

- 4) Οι **σφαιρικοί** αποτελούνται από τρεις αρθρώσεις.
Οι δύο πρώτες είναι περιστροφικές και η τρίτη γραμμική.

Χαρακτηριστικά: (+)	Μηχανολογική ευελιξία Ταχύτητα στην κίνηση των αξόνων Η ακρίβεια είναι συνάρτηση ανάλογη της απόστασης του σημείου δράσης του βραχίονα από το κέντρο του σφαιρικού χώρου εργασίας
Χρήση:	Εργασία σε χώρους σφαιρικής γεωμετρίας

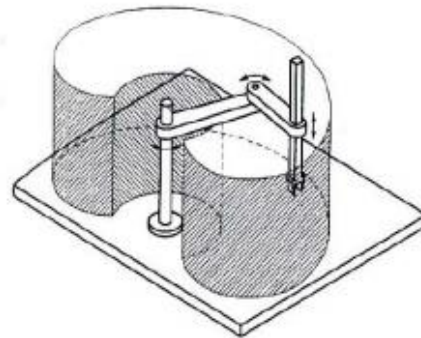


Σχήμα 9 Σφαιρικός βραχίονας

- 5) Ρομποτικός βραχίονας τύπου **Scara** (Selective Coprlaut Articulaled Robot for Asseumbly): Όπως και οι σφαιρικοί, αποτελούνται από τρεις αρθρώσεις, δύο πρώτες περιστροφικές και μία τρίτη γραμμική, όμως οι άξονες κίνησης είναι παράλληλοι μεταξύ τους.

Χαρακτηριστικά: (+) Μεγάλη δυσκαμψία στο κατακόρυφο επίπεδο λόγω κατακόρυφων φορτίσεων
Σχετικά μειωμένη ελαστικότητα στις οριζόντιες μετατοπίσεις
Η ακρίβεια είναι, όπως και στους σφαιρικούς, ανάλογα με την απόσταση του άκρου του βραχίονα από το κέντρο του χώρου εργασίας.

Χρήση: Αφορά σε εξειδικευμένες εφαρμογές

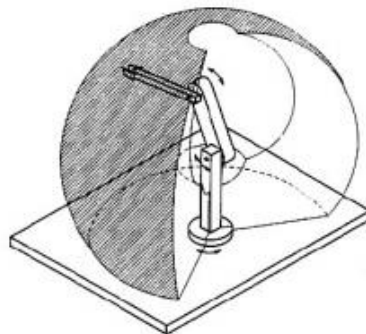


Σχήμα 10 Scara βραχίονας

- 6) **Αρθρωτοί ή ανθρωπομορφικοί**: αποτελούνται από τρεις περιστροφικές αρθρώσεις. Η πρώτη βρίσκεται στη βάση στήριξης γύρω από κατακόρυφο άξονα, κάθετο στους άξονες περιστροφής των άλλων δύο αρθρώσεων οι οποίοι είναι παράλληλοι μεταξύ τους.

Χαρακτηριστικά: (+) Μεγαλύτερη επιδεξιότητα
Μεταβλητή ακρίβεια, ανάλογα των επιθυμητών θέσεων εργασίας

Χρήση: Εξειδικευμένες εφαρμογές όπως π.χ. στη χειρουργική με το σύστημα DaVinci που είναι συνδυασμός ανθρωπομορφικού βραχίονα με ρομπότ τύπου Scara.



Σχήμα 11 Ανθρωπομορφικός βραχίονας

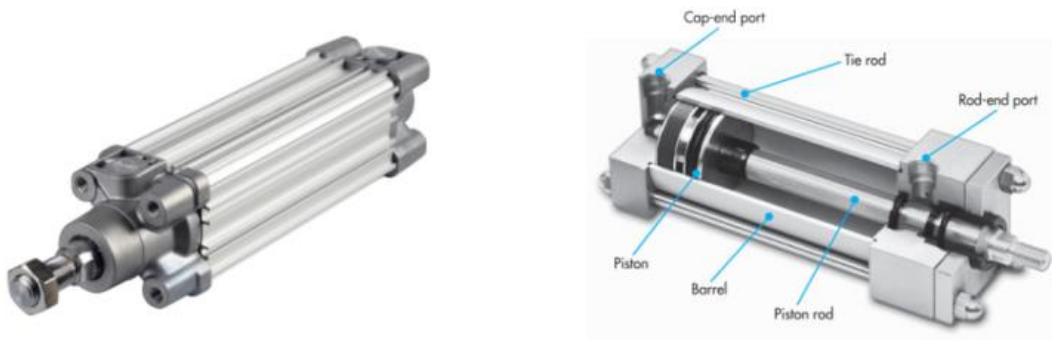
3.5 Μετατροπείς ενέργειας-ενεργοποιητές

Ενεργοποιητές ή **επενεργητές** (Actuators) ορίζονται οι μετατροπείς που μετασχηματίζουν την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική ενέργεια εξόδου, σε μορφή δύναμης ή δρόμου-διαδρομής.

Η ανάγκη για καλή λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων, για ακρίβεια και έλεγχο των προγραμματισμένων κινήσεων των αρθρώσεων ενός ρομπότ, σε συνδυασμό με την απαίτηση για χαμηλή αδράνεια και μεγάλη σχέση ισχύος-βάρους, για την ανάπτυξη επίσης υψηλών επιταχύνσεων καθώς και άλλων παραμέτρων σχετικών με την παραγωγή έργου ενός τέτοιου μηχανισμού, οδηγούν στη χρήση συγκεκριμένων ειδών ενεργοποιητών που μπορεί να είναι:

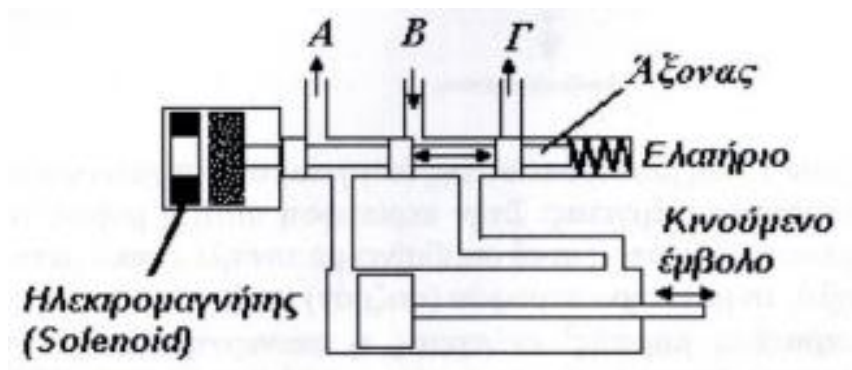
- πνευματικοί,
- υδραυλικοί,
- πιεζοηλεκτρικοί
- ηλεκτρομαγνήτες-σωληνοειδή και
- ηλεκτρικοί: σερβοκινητήρες (DC/AC motors, servos), βηματικοί κινητήρες.

➤ Οι **πνευματικοί** είναι κυλινδρικοί και λειτουργούν περιστροφικά[31]



Εικόνα 20 Πνευματικοί ενεργοποιητές

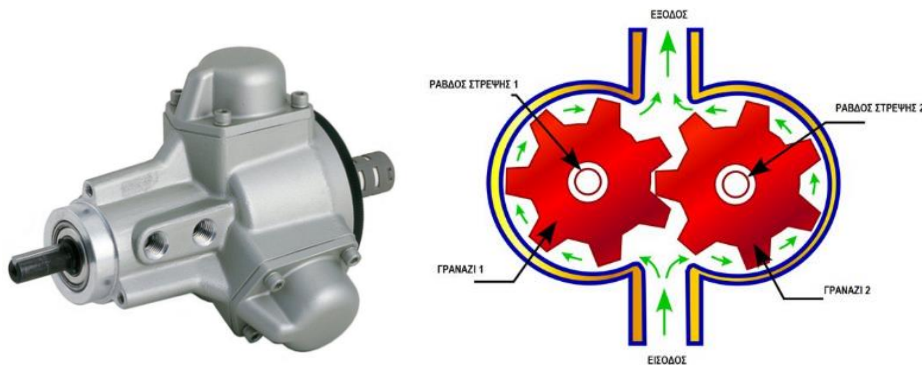
Η λειτουργία τους γίνεται με τη βοήθεια πιστονιών ή στροβίλων τα οποία μετατρέπουν την πνευματική ενέργεια, δηλαδή τον αέρα υπό πίεση που παρέχει ένας συμπιεστής (κομπρεσέρ), σε μηχανική.



Σχήμα 12 Σχηματική παράσταση λειτουργίας πνευματικού ενεργοποιητή.

- (+) Στη λειτουργία τους είναι απλοί, οικονομικοί και αξιόπιστοι,
 (-) όμως, λόγω συμπιεστότητας του αέρα, παρουσιάζουν δυσκολία στον έλεγχο της θέσης, για αυτό χρησιμοποιούνται σε έργα που δεν απαιτούν υψηλή ακρίβεια όπως π.χ. το άνοιγμα και κλείσιμο μιας αρπάγης.

Οι **υδραυλικοί** λειτουργούν παρόμοια με τους πνευματικούς.[32] [33]



Εικόνα 21 Υδραυλικοί κινητήρες

Χρησιμοποιούνται αντλίες που μετατρέπουν την υδραυλική ενέργεια, σε μηχανική δηλαδή το λάδι μιας δεξαμενής υπό πίεση με έμβολα.

Μπορούν να παράγουν ευθύγραμμη κίνηση με τη χρήση εμβόλων αλλά και περιστροφική με τη χρήση αξονικών ή ακτινικών εμβόλων.

Πλεονεκτήματα:

- Είναι ασφαλείς σε επικίνδυνα περιβάλλοντα και δεν βραχυκυκλώνουν
- Το υδραυλικό ρευστό (λάδι) χρησιμεύει και για λίπανση και για ψύξη.
- Λόγω της υδραυλικής πίεσης, έχουν μεγάλες ροπές σε μικρές ταχύτητες και δεν χρειάζονται μειωτήρες.
- Η ισχύς τους, σε σχέση με το μέγεθός τους και το βάρος που μπορούν να χειριστούν, είναι εξαιρετική.

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος κατασκευής (ακριβά εξαρτήματα) και συντήρησης.
- Χαμηλή απόδοση/ ταχύτητα
- Απαιτούνται ογκώδεις αντλίες και σωληνώσεις.
- Λόγω διαρροών, το περιβάλλον εργασίας καθίσταται ρυπαρό.

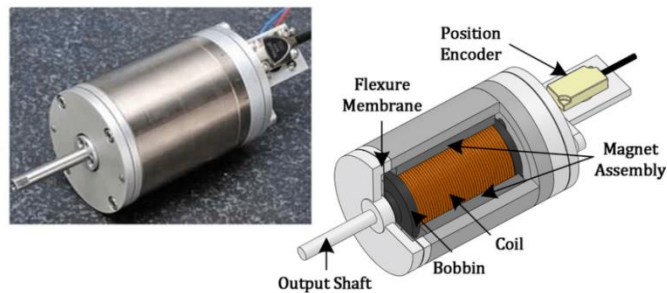
Χρησιμοποιούνται στη μετακίνηση μεγάλων ωφέλιμων φορτίων.

Οι **πιεζοηλεκτρικοί**: είναι απλοί και φθηνοί και η λειτουργία τους βασίζεται στην παραμόρφωση (επιμήκυνση) του πιεζοηλεκτρικού υλικού.

Τα **σωληνοειδή ή ηλεκτρομαγνήτες**: (+) είναι απλοί και φθηνοί,

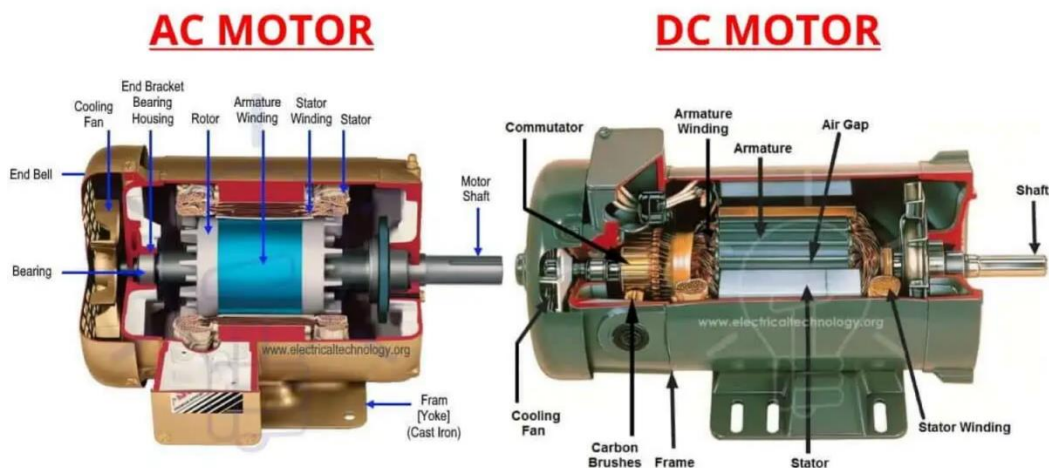
(-) δεν παρέχουν ακρίβεια θέσης.

Χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικούς αυτοματισμούς, για λειτουργίες on-off, κλείδωμα οικιακών συσκευών, αυτοκινήτου και άλλα.



Εικόνα 22 Σωληνοειδής ηλεκτρομαγνήτης

Οι **ηλεκτρικοί ενεργοποιητές εναλλασσόμενου ρεύματος AC** χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης ισχύος, χωρίς ψήκτρες και δεν χρειάζονται συντήρηση.[34]

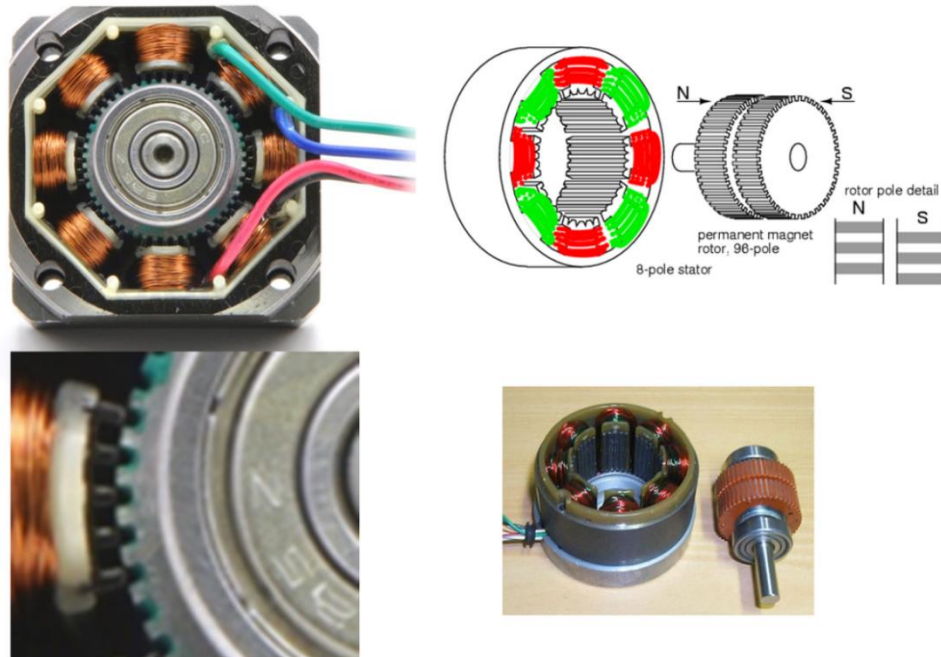


Εικόνα 23 Ηλεκτρικοί ενεργοποιητές εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος

Οι **ηλεκτρικοί ενεργοποιητές συνεχούς ρεύματος DC** χρησιμοποιούνται στη ρομποτική και γενικά σε εφαρμογές ελέγχου και διακρίνονται στους:

- συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες (Permaneut magnet DC motor)
 - (+) φθηνοί με απλή λειτουργία,
 - (-) μέτρια απόδοση και αξιοπιστία, εκπομπή EMI (ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών).
- συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC motors)
 - (+) αξιόπιστοι, με καλή απόδοση, καλό έλεγχο ταχύτητας και μικρή εκπομπή EMI
 - (-) ακριβοί και περίπλοκοι

Οι **βηματικοί** είναι ειδικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Stepper Motor) και αποτελούνται από ένα μόνιμο μαγνήτη, τον ρότορα και τα τυλίγματα που είναι ο στάτης.[35] [36]



Εικόνα 24 Βηματικός κινητήρας

Λειτουργία:

Περιστρέφονται σε δύο κατευθύνσεις, δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα με ακρίβεια γωνιακής μετατόπισης ίσης με ένα βήμα (15°)

Για την κίνησή τους τα βήματα χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτρικών παλμών.

Διατηρούν σταθερή ροπή όταν είναι σταματημένοι.

Χρησιμοποιούνται μόνο, σε συνδυασμό με ψηφιακά κυκλώματα επειδή ελέγχεται πολύ εύκολα από αυτά.

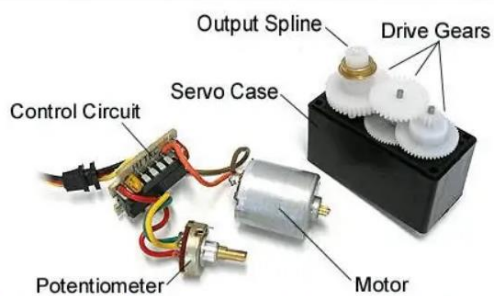
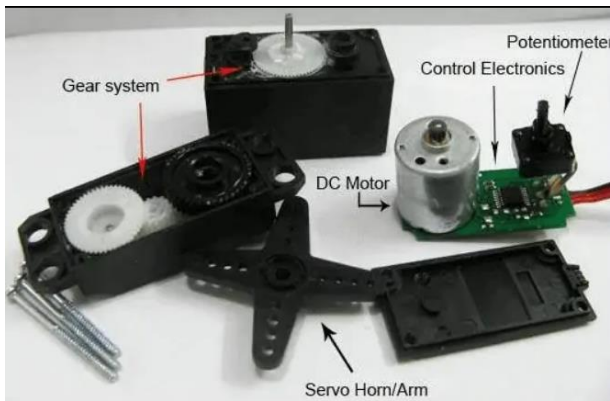
Πλεονεκτήματα:

- Μεγάλη ακρίβεια κίνησης, σταθερότητα, εύκολη οδήγηση από μικροεπεξεργαστή.
- Εύκολη επιβράδυνση και σταμάτημα χωρίς φρένα, όταν σταματημένος, κλειδώνει και μένει ακίνητος.
- Μεγάλη ροπή και στην εκκίνηση, και στις μικρές ταχύτητες περιστροφής.
- Δεν απαιτούνται αισθητήρες για τον προσδιορισμό του άξονα κίνησης.
- Ικανότητα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής με διακριτά βήματα.

Μειονεκτήματα:

- Θορυβώδεις, σχετικά ακριβοί και ογκώδεις.
- Κατά τη μετακίνηση μεγάλων φορτίων μπορεί να μην σταματήσουν ακαριαία.
- Χαμηλή ροπή σε υψηλές ταχύτητες.
- Χαμηλή απόδοση (Low efficiency).
- Ενεργοβόροι, με τάση να ζεσταίνονται.

Οι **σερβοκινητήρες** (servomotors) είναι κινητήρες σε κλειστό κουτί που ελέγχονται από



Εικόνα 25 Σερβοκινητήρας

ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου ΣΑΕ και λειτουργούν όπως όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες εναλασσόμενου AC και συνεχούς DC ρεύματος. Είναι συνδεδεμένοι με μειωτήρα και εσωτερικά διαθέτουν ένα απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα ανάδρασης που αποτελείται από έναν αισθητήρα θέσης (ποτενσιόμετρο), ο οποίος ελέγχει την τελική θέση του άξονα κίνησης, επιτρέποντας την ακριβή μετακίνησή του.

- Έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης και
- Μικρή ροπή αδράνειας.

Χρησιμοποιούνται στα τηλεχειριζόμενα μοντέλα οχημάτων και στα μικρά ρομπότ .[37]

3.6 Αισθητήρες

Οι **αισθητήρες** (sensors) μετατρέπουν κάποια φυσικά μεγέθη σε ηλεκτρικό σήμα, ή κάποια μορφή ενέργειας σε άλλη. Η επιλογή τους γίνεται με κριτήρια όπως η εμβέλεια, το γωνιακό εύρος, η ακρίβεια, η επαναληπτικότητα, η διακριτική ικανότητα (δηλαδή η μικρότερη μεταβολή στη διέγερση που μπορεί να ανιληφθεί ένας αισθητήρας), η κατανάλωση ενέργειας, οι συνθήκες, (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), το μέγεθος και το κόστος.

Οι αισθητήρες **εσωτερικής κατάστασης** εκτιμούν την εσωτερική κατάσταση του βραχίονα. Έτσι, οι οπτικοί κωδικοποιητές (encoders), οι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς θέσης (resolvers), τα ποτενσιόμετρα (Εικόνα 26), τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν τη θέση των αρθρώσεων (δηλαδή τη γωνία για περιστροφική άρθρωση και την απόσταση για γραμμική). Τα ταχύμετρα μετρούν την ταχύτητα κίνησης της άρθρωσης. Οι ψηφιακές πυξίδες τον προσανατολισμό και οι αισθητήρες ρεύματος (μπαταρίες) την επάρκεια σε ενέργεια, ή το στιγμιαίο φορτίο των κινητήρων.

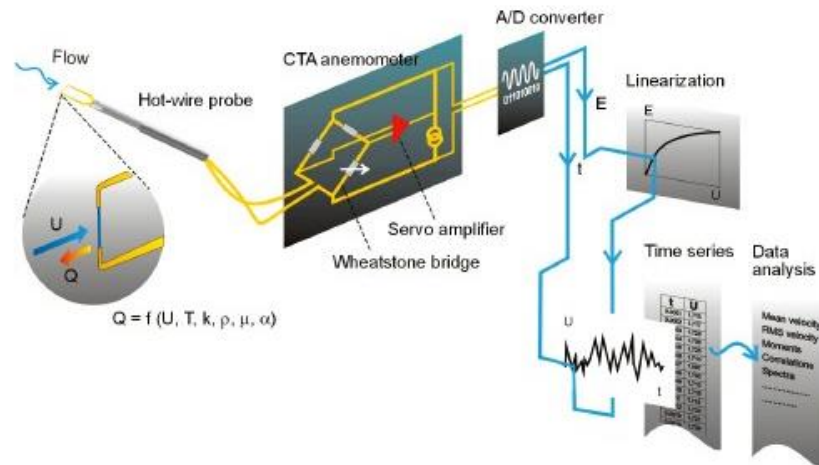


Εικόνα 26 Περιστροφικό ποτενσιόμετρο

Οι αισθητήρες **εξωτερικής κατάστασης** εκτιμούν τη θέση του βραχίονα σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι τα αισθητήρια επαφής, τα οπτικά (CCD CMOS cameras), τα ακουστικά και λέιζερ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εκτιμητές απόστασης από το στόχο του ρομπότ. Άλλοι αισθητήρες εξωτερικού τύπου αναγνωρίζουν τα χρώματα και τη φωτεινότητα στο περιβάλλον.

Οι αισθητήρες **αλληλεπίδρασης** εκτιμούν τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ του βραχίονα και του χώρου δράσης αυτού.

Ένας άλλος τύπος αισθητήρα βασίζεται στην τεχνική μέτρησης **CTA** (Constant Temperature Anemometry). Συγκεκριμένα είναι ένα ανεμόμετρο που χρησιμοποιείται ως εργαλείο για να μετράει την ταχύτητα και να αναλύει τις μικροδομές σε τυρβώδεις ροές αερίων και υγρών. Η λειτουργία του βασίζεται στην ψυκτική επίδραση μιας ροής σε ένα θερμαινόμενο σώμα (Εικόνα 27).[38]



Εικόνα 27 Σύστημα μέτρησης CTA

- Η βασική σχέση μεταξύ θερμότητας Q και ταχύτητας U για ένα σύρμα τοποθετημένο κάθετα στη ροή όπως προτάθηκε από τον LV King (1914):

$$Q = (T_W - T_0)A_W h = A + BU^n; n = 0.5$$

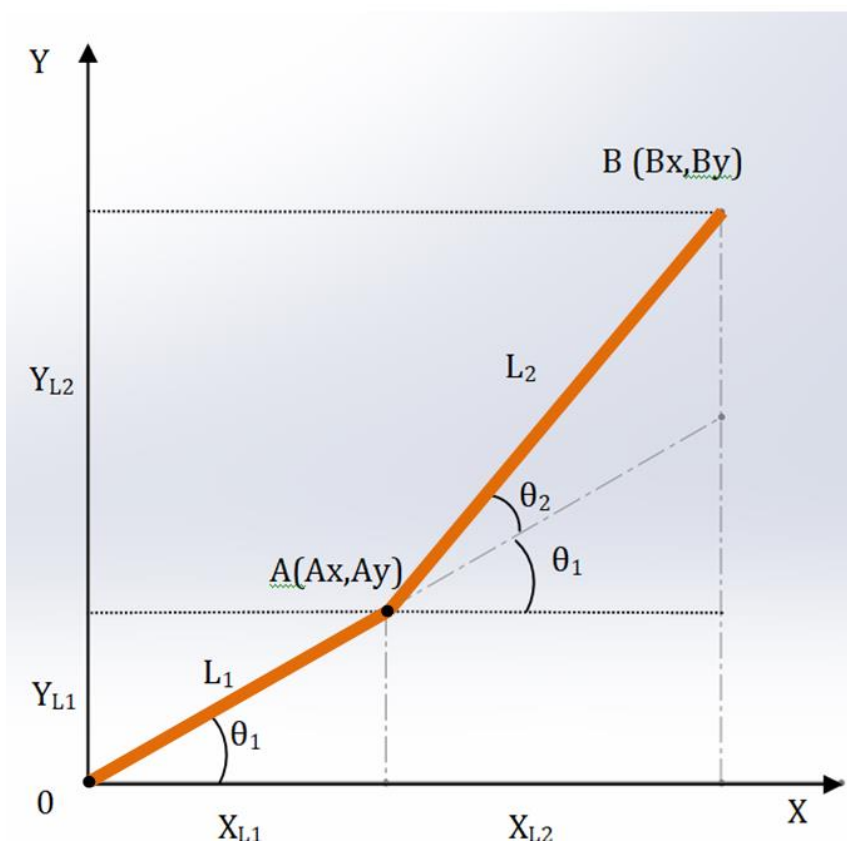
Όπου A_W η επιφάνεια του σύρματος, $(T_W - T_0)$ η υπερθερμοκρασία του σύρματος και h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Το καλώδιο rw συνδέεται με βραχίονα της γέφυρας wheatstone η θερμοκρασία της οποίας ελέγχεται και παραμένει σταθερή χάρη σε έναν σέρβο ενισχυτή

Στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα, στο τελικό δηλαδή στοιχείο δράσης του, τοποθετείται σχετικά μικρός καλωδιακός ανιχνευτής GTA με αισθητήρα από σύρμα βολφραμίου μήκους 1 χιλιοστού και διαμέτρου 5μm τοποθετημένος σε δύο βελονοειδείς οδόντες. Το συγκεκριμένο υλικό παρέχει μεγάλη ευαισθησία ροής μαζί με υψηλή μηχανική αντοχή και ελάχιστη θερμική αδράνεια ενώ το μέγεθός του αποτρέπει τυχόν διαταραχές της ροής.

3.7 Ευθεία κινηματική ανάλυση

Το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής ασχολείται με την εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του εργαλείου του χειριστή ως προς το σταθερό σύστημα αναφοράς όταν είναι γνωστές οι συντεταγμένες, οι γωνιακές μετατοπίσεις των αρθρώσεων του ρομποτικού χειριστή.



Σχήμα 13 Επίπεδος χειριστής δύο βαθμών ελευθερίας (2-DOF)

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις που ορίζουν την ευθεία κινηματική λύση ή μετασχηματισμό ευθείας κινηματικής :

$$A_X = X_{L_1} = L_1 \cos \theta_1 , \quad A_Y = Y_{L_1} = L_1 \sin \theta_1$$

$$X_{L_2} = L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) , \quad Y_{L_2} = L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$B_X = X_{L_1} + X_{L_2} = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$B_Y = Y_{L_1} + Y_{L_2} = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

Ο μετασχηματισμός ευθείας κινηματικής έχει εξαιρετική υπολογιστική αποδοτικότητα για απλούς επίπεδους βραχίονες με ένα ή δύο βαθμούς ελευθερίας.

Για βραχίονες με πολλούς βαθμούς ελευθερίας οι εξισώσεις ευθείας κινηματικής γίνονται πολύπλοκες. Σ' αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούμε τη σύμβαση **Denavit-Hartenberg** για την ανάθεση συστημάτων συντεταγμένων σε κάθε άρθρωση ώστε να επιτυγχάνεται η συσχέτιση μεταξύ των συστημάτων με τη χρήση ομογενών πινάκων. Ακόμη, με τη χρήση υπολογιστή έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για συμβολικό υπολογισμό των κινηματικών εξισώσεων οι οποίοι ελαχιστοποιούν αυτόματα τον αριθμό των πράξεων.

3.8 Ρομποτικός χώρος εργασίας

Το σύνολο των σημείων του προσβάσιμου τρισδιάστατου χώρου που σαρώνει το άκρο του χειριστή ενός ρομποτικού βραχίονα ονομάζεται προσιτός **χώρος εργασίας** του ρομπότ. Το μέγεθος και η γεωμετρική μορφή του εξαρτάται από τους βαθμούς ελευθερίας (DOF), τους περιορισμούς των γωνιών, τα μήκη των συνδέσμων και την εργασία που πρόκειται να εκτελέσει.

Από το (Σχήμα 13) με τον επίπεδο χειριστή δύο βαθμών ελευθερίας προκύπτει ότι

για ένα σημείο του χώρου που απέχει από το Ο απόσταση $r = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}$

ισχύει:

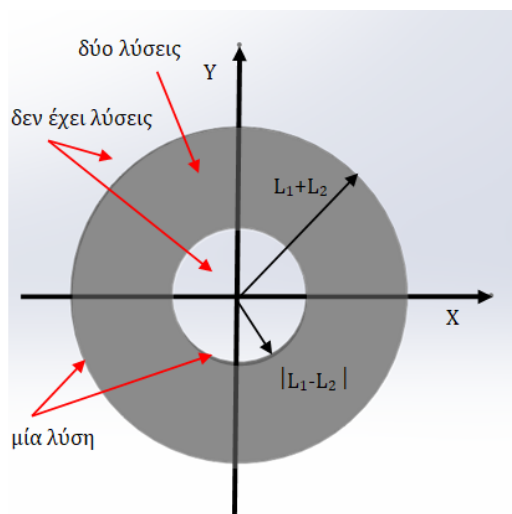
$$\begin{aligned} r^2 &= B_X^2 + B_Y^2 = \\ &= (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))^2 + (L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2))^2 = \\ &= L_1^2 + L_2^2 + 2 L_1 L_2 (\cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)) = \\ &= L_1^2 + L_2^2 + 2 L_1 L_2 \cos \theta_2 \end{aligned}$$

Επομένως $(L_1 - L_2)^2 \leq L_1^2 + L_2^2 + 2 L_1 L_2 \cos \theta_2 \leq (L_1 + L_2)^2 \Rightarrow$

$$|L_1 - L_2| \leq r \leq L_1 + L_2$$

Από αυτή τη σχέση αποδεικνύεται ότι ο χώρος εργασίας του ρομπότ είναι ένας δακτύλιος με κέντρο την αρχή Ο των αξόνων, η εξωτερική ακτίνα του οποίου είναι $L_1 + L_2$ και

η εσωτερική είναι $|L_1-L_2|$. Τα σημεία στο εξωτερικό όριο του δακτυλίου είναι προσιτά όταν ο βραχίονας βρίσκεται σε πλήρη έκταση, ενώ στο εσωτερικό όριο είναι προσιτά όταν ο βραχίονας είναι πλήρως διπλωμένος. Ο χώρος εργασίας του συγκεκριμένου επιπέδου χειριστή φαίνεται στο (Σχήμα 14).



Σχήμα 14 Χώρος εργασίας επίπεδου χειριστή δύο βαθμών ελευθερίας

Η έννοια **επιπέδιος χώρος εργασίας** δηλώνει το γεωμετρικό τόπο των προσεγγίσιμων σημείων με όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς του χειριστή, (εργαλείου) και είναι υποσύνολο του προσιτού.

3.9 Αντίστροφη κινηματική ανάλυση

Στην ευθεία κινηματική ανάλυση (Σχήμα 13) προσδιορίζουμε τη θέση $B(B_x, B_y)$ του άκρου του χειριστή γνωρίζοντας, τις γωνίες θ_1, θ_2 των αρθρώσεων και τα μήκη των συνδέσμων. Στην αντίστροφη κινηματική ανάλυση (Σχήμα 15) γνωρίζουμε τη θέση $B(B_x, B_y)$ που θέλουμε να βρίσκεται το άκρο του χειριστή και ζητάμε να προσδιοριστούν οι γωνίες θ_1 και θ_2 των αρθρώσεων οι οποίες θα φέρουν το εργαλείο στην προκαθορισμένη αυτή θέση. Ενώ ο ευθύς υπολογισμός της θέσης του άκρου των δεδομένων μεταβλητών των αρθρώσεων είναι σχετικά απλός, η αντίστροφη διαδικασία είναι γενικά δύσκολη και ίσως αδύνατη για χειριστές με πολλούς συνδέσμους, εκτός αν ο μηχανισμός έχει σχεδιαστεί κατάλληλα. Αυτό συμβαίνει διότι οι κινηματικές εξισώσεις είναι μη γραμμικές και επομένως μία λύση ούτε προσδιορίζεται εύκολα, ούτε είναι μοναδική.

Από το (Σχήμα 15) προκύπτει ότι:

$$r^2 = B_X^2 + B_Y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2 L_1 L_2 \cos \theta_2 \Rightarrow$$

$$\cos \theta_2 = \frac{B_X^2 + B_Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 L_1 L_2} = \sigma$$

Επομένως,

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \sigma^2}$$

Άρα, η γωνία θ_2 μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\theta_2 = ATAN2 \left(\pm \sqrt{1 - \sigma^2}, \sigma \right)$$

Η συνάρτηση ATAN2 εκφράζει την αντίστροφη εφαπτομένη με δύο ορίσματα. Το πρώτο αντιστοιχεί στην τιμή του ημίτονου της γωνίας και το δεύτερο στην τιμή του συνημίτονου. Έτσι, είναι δυνατός ο μονοσήμαντος υπολογισμός της ζητούμενης γωνίας, επειδή είναι γνωστό και το τεταρτημόριο στο οποίο βρίσκεται αυτή. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα υπάρχουν δύο λύσεις για το θ_2 με ίσο μέτρο και αντίθετο πρόσημο. Από τις τιμές του θ_2 προκύπτουν αντίστοιχες τιμές του θ_1 από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων της ευθείας κινηματικής

$$B_X = (L_1 + L_2 \cos \theta_2) \cos \theta_1 + (-L_2 \sin \theta_2) \sin \theta_1$$

$$B_Y = (L_2 \sin \theta_2) \cos \theta_1 + (L_1 + L_2 \cos \theta_2) \sin \theta_1$$

Λύνοντας το παραπάνω σύστημα ως προς $\sin \theta_1$ και $\cos \theta_1$ προκύπτει ότι:

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_1 &= [(-L_2 \sin \theta_2)B_X + (L_1 + L_2 \cos \theta_2)B_Y] / [(L_1 + L_2 \cos \theta_2)^2 + (L_2 \sin \theta_2)^2] \\ \cos \theta_1 &= [(L_1 + L_2 \cos \theta_2)B_X + (L_2 \sin \theta_2)B_Y] / [(L_1 + L_2 \cos \theta_2)^2 + (L_2 \sin \theta_2)^2] \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\sin \theta_1 = [B_X(-L_2 \sin \theta_2) + B_Y(L_1 + L_2 \cos \theta_2)] / [B_X^2 + B_Y^2]$$

$$\cos \theta_1 = [B_X(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + B_Y(L_2 \sin \theta_2)] / [B_X^2 + B_Y^2]$$

Επομένως,

$$\theta_1 = \text{ATAN2} \left(\frac{B_X(-L_2 \sin \theta_2) + B_Y(L_1 + L_2 \cos \theta_2)}{B_X^2 + B_Y^2}, \frac{B_X(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + B_Y(L_2 \sin \theta_2)}{B_X^2 + B_Y^2} \right)$$

ή ισοδύναμα,

$$\theta_1 = \text{ATAN2}(B_X(-L_2 \sin \theta_2) + B_Y(L_1 + L_2 \cos \theta_2), B_X(L_1 + L_2 \cos \theta_2) + B_Y(L_2 \sin \theta_2))$$

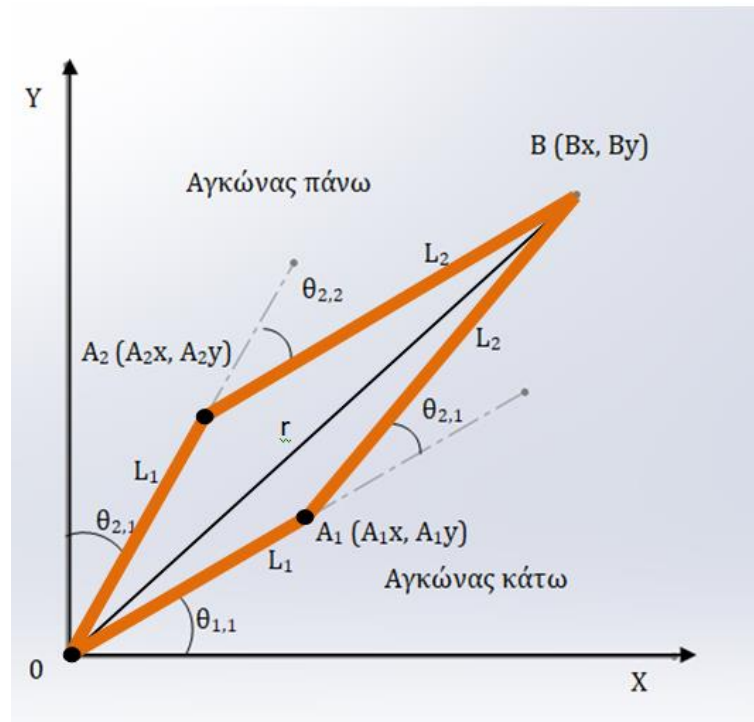
Όπου, οι παρονομαστές των $\sin \theta_1$ και $\cos \theta_1$ έχουν εξαλειφθεί διότι είναι πάντοτε θετικοί.

Άρα, για κάθε τιμή του θ_2 υπάρχει μία μόνο τιμή για το θ_1 . Συνεπώς, στη γενική περίπτωση υπάρχουν δύο αντίστροφες κινηματικές λύσεις δηλαδή δύο ζεύγη (θ_1, θ_2) . Αυτές οι δύο λύσεις ονομάζονται λύση ΑΓΚΩΝΑ ΠΑΝΩ (ELBOW UP) και λύση ΑΓΚΩΝΑ ΚΑΤΩ (ELBOW DOWN) για τις οποίες ισχύει ότι $-180^\circ < \theta_2 < 0$ και $0^\circ < \theta_2 < 180$ αντίστοιχα.

Οι περιορισμοί αυτοί περιγράφουν τις δύο περιοχές λύσεων αντίστροφης κινηματικής στο χώρο θ_1 - θ_2 των μεταβλητών των αρθρώσεων, οι οποίες απεικονίζονται στο (Σχήμα 14).

Στις παραπάνω εξισώσεις, επειδή το σημείο που θέλουμε να βρίσκεται το άκρο του χειριστή βρίσκεται εκτός του χώρου εργασίας και το ρομπότ δεν μπορεί να το προσεγγίσει, για να υπάρχει λύση, πρέπει να ισχύει η σχέση $|\sigma| \leq 1$.

Εάν $|\sigma|=1$, το ζητούμενο σημείο βρίσκεται πάνω στο όριο του χώρου εργασίας. Τα σημεία του χώρου λύσεων, για τα οποία οι δύο αντίστροφες κινηματικές λύσεις συμπίπτουν, ονομάζονται **σημεία ιδιομορφίας** ή **μοναδικά σημεία**.



Σχήμα 15 Αντίστροφη κινηματική λύση

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

4.1 Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου

Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του Πανεπιστήμιου Δυτικής Αττικής, είναι κλειστού κυκλώματος ροής σε σχήμα 8 με δύο ανοικτά τμήματα δοκιμών ελλειπτικής διατομής 1.0 m x 0.69m και μέγιστης ταχύτητας 30 m/s. Είναι η δεύτερη σε μέγεθος αεροσήραγγα στην Ελλάδα. Να τονιστεί επίσης, ότι η αεροσήραγγα αυτή, πέραν του ότι είναι καθόλα λειτουργική και αξιόπιστη, έχει μεγάλη ιστορική αξία, δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε από το μεγαλύτερο αεροδυναμικό επιστήμονα του 20ου αιώνα, Ludwig Prandtl, στο University of Göttingen (κατασκευάστηκε το 1938).



Εικόνα 28 Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του ΠΑ.Δ.Α.

Στο ένα ανοικτό τμήμα της αεροσήραγγας λειτουργεί φορέας στήριξης αισθητήρα (σωλήνα pilot) με κίνηση στους τρεις άξονες X,Y,Z (καρτεσιανή διάταξη).



Εικόνα 29 Πλαίσιο καρτεσιανής κίνησης

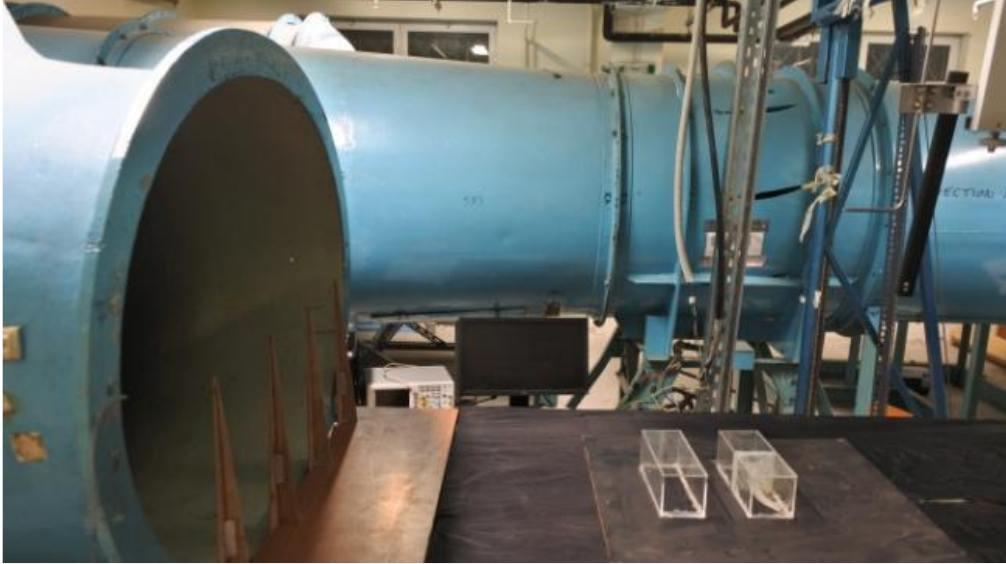
4.2 Διαστάσεις φορέα αεροσήραγγας

Ο ρομποτικός βραχίονας θα στηριχτεί πάνω στον φορέα μετακίνησης στο σημείο που τώρα στηρίζεται ο αισθητήρας pilot. Μετρήθηκαν οι διαστάσεις της βάσης στήριξης του ρομποτικού βραχίονα, ύψος 21cm, πλάτος 14,5cm και πάχος δοκού 3cm.



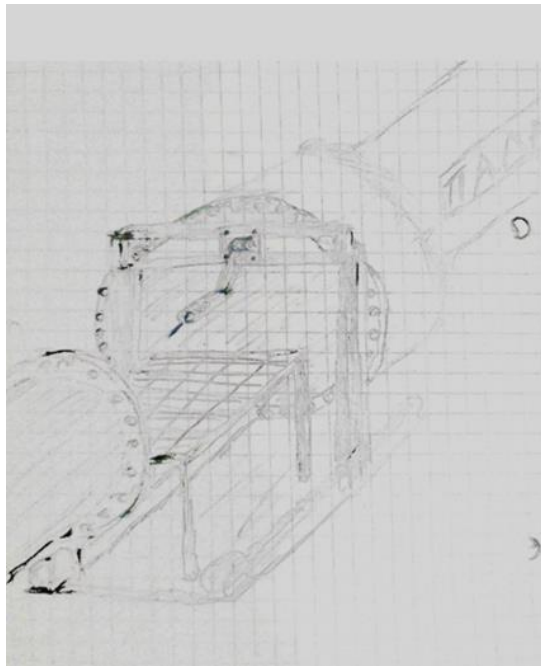
Σημείο στήριξης
ρομποτικού βραχίονα

Εικόνα 30 Διαστάσεις κίνησης φορέα. μήκος 140cm, πλάτος 180cm και ύψος 80cm



Εικόνα 31 διαστάσεις ελλειπτικής διατομής εξόδου 1.0 m x 0.69m και τραπέζι πειραμάτων

4.3 Το πρώτο βήμα της εργασίας



Σχήμα 16 Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα σε σκίτσο πάνω στο φορέα

4.4 Τρισδιάστατη Σχεδίαση σε Υπολογιστή (3D Computer aided Design)

Στη σύγχρονη εποχή η κατασκευή, σχεδόν οποιουδήποτε μηχανολογικού εξαρτήματος έως και πολύπλοκου μηχανολογικού συστήματος, ακολουθεί τη φάση του σχεδιασμού μέσω εξειδικευμένου λογισμικού με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design – CAD). Τα λογισμικά αυτά παρέχουν εργαλεία σχεδίασης και ανάλυσης. Με τη χρήση CAD λογισμικών οι μηχανολογικοί σχεδιασμοί γίνονται ταχύτερα και καλύτερα. Επιπλέον, όλα σχεδόν τα μηχανήματα κατασκευής εξοπλισμού ή κατεργασίας υποστηρίζουν αρχεία που δημιουργούνται στα CAD λογισμικά και που περιέχουν το σχεδιαστικά βελτιστοποιημένο εξάρτημα προς κατασκευή ή προς κατεργασία. Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται είναι ο Computer Aided Design and Drafting – CADD. Τα CAD λογισμικά χρησιμοποιούνται και στον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών συστημάτων. Αυτή η χρήση τους ονομάζεται ηλεκτρονική αυτοματοποίηση σχεδιασμού (Electronic Design Automation – EDA), ενώ στο μηχανικό σχεδιασμό, μηχανική αυτοματοποίηση σχεδιασμού (Computer-aided Drafting – CAD). Η αναπαράσταση του σχεδίου στο CAD λογισμικό, γίνεται είτε με διανυσματικά γραφικά που είναι περισσότερο συμβατικά, είτε με γραφικά κουκίδων πλέγματος (raster graphics) που επιτρέπουν τη συνολική απεικόνιση των εξαρτημάτων. Επιπλέον, κάθε σχέδιο σε CAD λογισμικό περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους ενός πραγματικού αντικειμένου, όπως είναι το υλικό που χρησιμοποιείται, οι περιορισμοί βάσει προτύπων κλπ. Φυσικά κάθε CAD λογισμικό επιτρέπει το σχεδιασμό σε δύο ή τρεις διαστάσεις, μια επιλογή που εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής, δηλαδή από το σκοπό για τον οποίο προορίζεται το κάθε σχέδιο. Η γνώση CAD λογισμικών είναι πλέον προαπαιτούμενο σε πολλές βιομηχανικές εργασίες, καθώς παρέχει πολλές δυνατότητες που ξεπερνούν σε σημαντικό βαθμό κάθε άλλη προσέγγιση σχεδιασμού. Παραδείγματα χρήσης είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η προσθετική κ.α.

‘Άλλη χρήση των CAD λογισμικών είναι στο χώρο των κινουμένων σχεδίων (animation) στον υπολογιστή, για ειδικά εφέ σε ταινίες, διαφημιστικά και τεχνικά εγχειρίδια ψηφιακού περιεχομένου (Digital Content Creation - DCC) κλπ. Είναι πολλά τα προγράμματα που μπορούμε να σχεδιάσουμε διάφορα μοντέλα, σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα είναι το Pro-Engineer, το Solidworks, το Autocad (Mechanical), το 3d studio max, το Ideas-Master, το Rhino και άλλα.

Μεγάλο πλεονέκτημα των προγραμμάτων αυτών είναι ότι μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους, εισάγοντας και εξάγοντας αρχεία (import, export) με διαφορετικές καταλήξεις κάθε φορά. Έτσι, μπορούμε για παράδειγμα να σχεδιάσουμε ένα μοντέλο στο πρόγραμμα του Autocad και να το ανοίξουμε από το Solidwork (με import), με αποτέλεσμα να το επεξεργαστούμε με τα εργαλεία του.

Το SolidWorks είναι το λογισμικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για το σχεδιασμό τρισδιάστατων μηχανολογικών εξαρτημάτων. Το λογισμικό αυτό είναι ένα πακέτο εργαλείων σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό τρισδιάστατων (3D) αντικειμένων (μοντέλων) σε όποια κλίμακα επιθυμεί ο χρήστης. Επιπλέον, επιτρέπει την ανάλυση αυτών των μοντέλων, όπως είναι η θερμική ανάλυση, με την χρήση των αντίστοιχων ενσωματωμένων εργαλείων που παρέχει. [39] [40]

4.5 Ιστορία του SolidWorks

Η SolidWorks είναι μια εταιρία που, σε πάνω από δύο δεκαετίες, ανέπτυξε μέσω Η/Υ, εφαρμογές και εργαλεία σχεδιασμού και ελέγχου μηχανολογικών εξαρτημάτων κ.α. Ιδρύθηκε το 1993 στο ινστιτούτο τεχνολογίας της Μασαχουσέτης – MIT (Massachusetts Institute of Technology) από έναν μεταπτυχιακό φοιτητή, τον Jon Hirschtick. Ο Hirschtick εντάχθηκε στην ομάδα μηχανικών που ασχολούνταν με τη δημιουργία λογισμικού για σχεδίαση τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω υπολογιστή, γνωστά και ως 3D CAD. Η πρώτη έκδοση του λογισμικού SolidWorks κυκλοφόρησε το 1995. Το 1997, η Dassault εξαγόρασε το λογισμικό για 310 εκατ. δολάρια. Σήμερα το λογισμικό αυτό κυκλοφορεί σε διάφορες εκδόσεις εξυπηρετώντας πληθώρα αναγκών και κατασκευαστικών απαιτήσεων.



Σχήμα 3.1: Logo του Solidworks

4.6 Σταδιακή εξέλιξη σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα

4.6.1 Σχέδιο 1

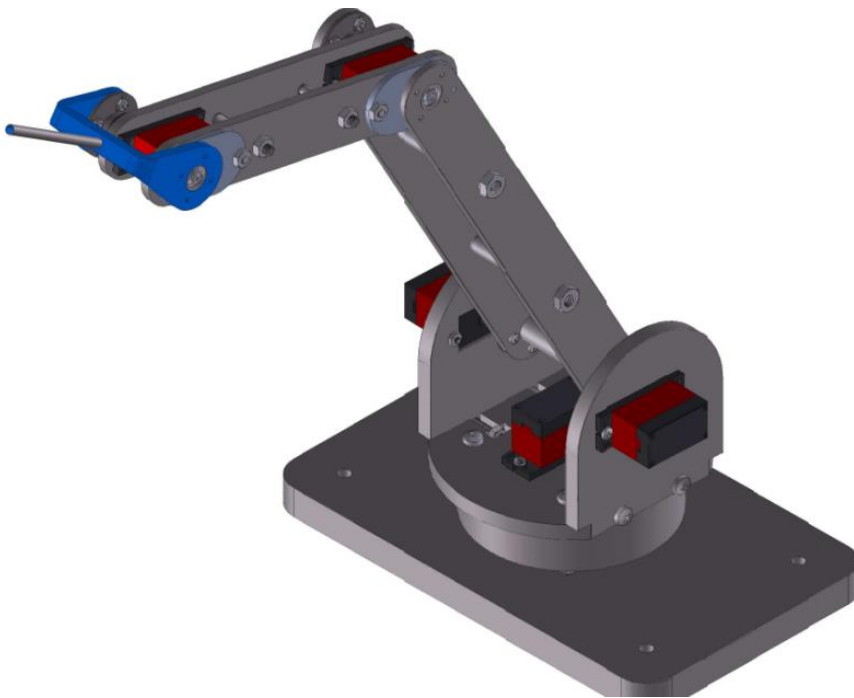
Η πρώτη προσέγγιση στο θέμα έγινε με τον σχεδιασμό ενός απλού σχεδίου στην κατασκευή με υλικά που βρίσκονται εύκολα στην αγορά.

Όλα τα τμήματα του βραχίονα κόβονται πάνω σε μονοκόμματη πλάκα αλουμινίου (ALUMINIUM6063) χρησιμοποιώντας CNC. Τα μέλη του βραχίονα αποτελούνται από δύο επίπεδες παράλληλες λάμες πάχους 4mm, πλάτους 30mm και μήκους 200mm με διπλή στερέωση για να έχει σταθερότητα, ακαμψία και ελάχιστη ταλάντωση. Η κατασκευή είναι απλή μόνο με βίδες.

Χρησιμοποιήθηκε κινητήρας Servo που έχει μικρό μέγεθος, ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου και πολύ μεγάλη δύναμη (1kgcm έως 50 kgcm). Τα 2 Servo στη βάση δίνουν μεγαλύτερη και πιο ισοκατανεμημένη ροπή. Τα ρουλεμάν υποστηρίζουν τους άξονες, μειώνουν τις τριβές και βελτιώνουν την απόδοση των κινητήρων.

Ο βραχίονας έχει 4 περιστροφικές αρθρώσεις. Η πρώτη στη βάση του περιστρέφεται κατά 360° και άλλες τρεις κατά 270°.

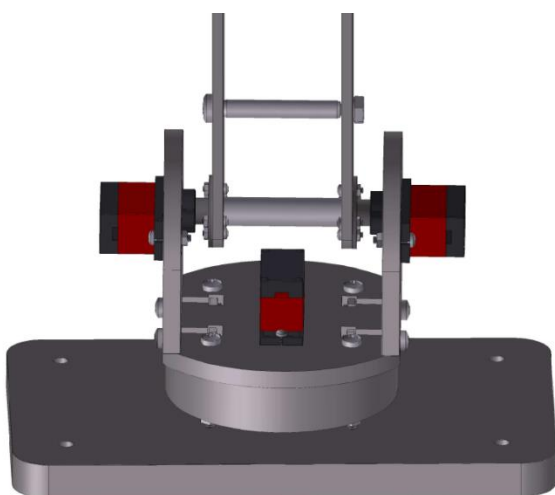
Στην 4η άρθρωση είναι προσαρτημένος αισθητήρας που μετράει τη ροή του ανέμου. Έχει τη δυνατότητα να παρακολουθήσει σχήματα με περίπλοκη γεωμετρία.



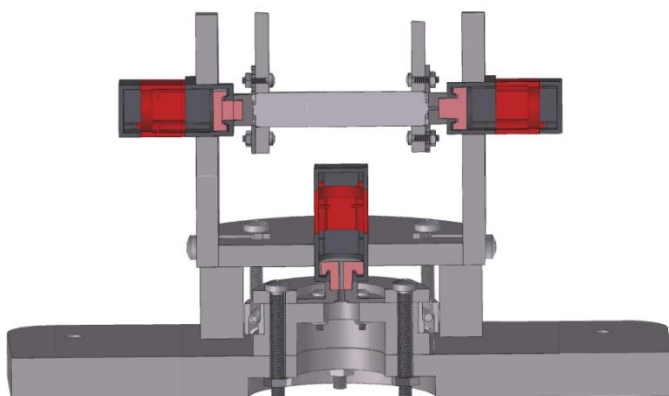
Εικόνα 32 «Σχέδιο 1» ολοκληρωμένο



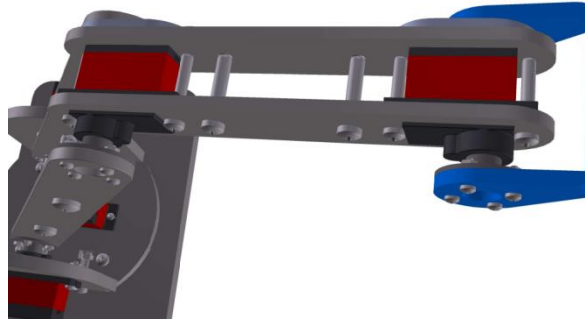
Εικόνα 33 «Σχέδιο 1» Πίσω όψη



Εικόνα 34 «Σχέδιο 1» Περιστρεφόμενη άρθρωση βάσης



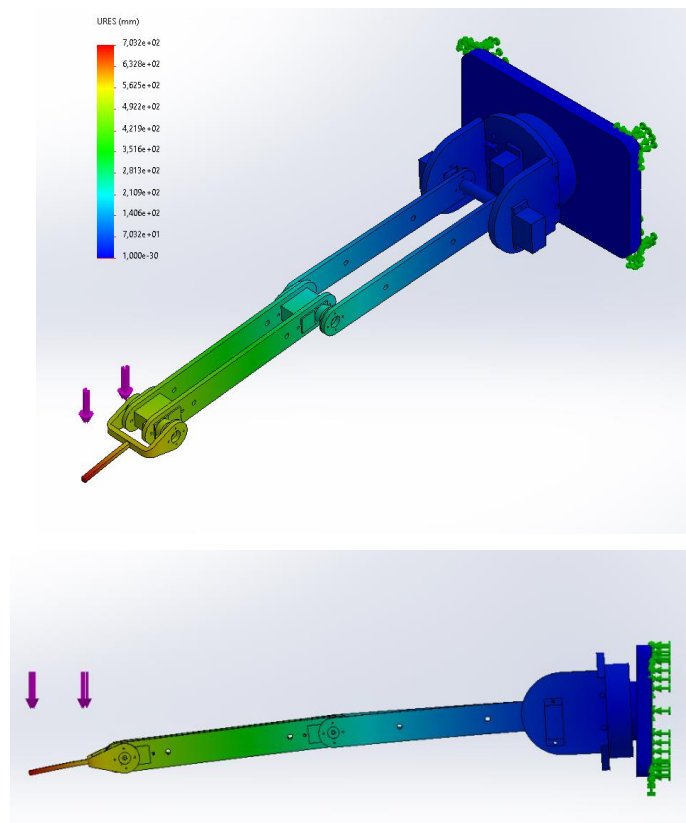
Εικόνα 35 «Σχέδιο 1» Τομή περιστρεφόμενης άρθρωσης βάσης



Εικόνα 36 «Σχέδιο 1» Πάνω όψη του δεύτερου μέλους

Μειονεκτήματα

- Ο βραχίονας δεν έχει σταθερότητα στην άκρη του αισθητήρα διότι η ταχύτητα του αέρα της αεροσήραγγας ασκεί τόση δύναμη στον βραχίονα με αποτέλεσμα να ταλαντώνεται και να χάνεται η ακριβής θέση και η ικανότητα επαναληπτικότητας του αισθητήρα.
- Η στήριξη όλου του βραχίονα είναι αδυναμία γιατί γίνεται μόνο πάνω σε μια περιστροφική άρθρωση, γύρω από ένα μόνο ρουλεμάν στη βάση στήριξης.



Εικόνα 37 Μετατόπιση αισθητήρα βάσει υπολογισμών (Solidworks Simulation)

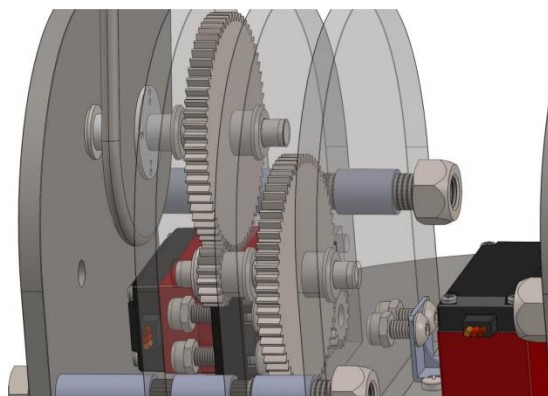
4.6.2 Σχέδιο 2

Επανασχεδίαση «σχεδίου 1» για βελτίωση ακρίβειας θέσης αισθητήρα Hot wire:

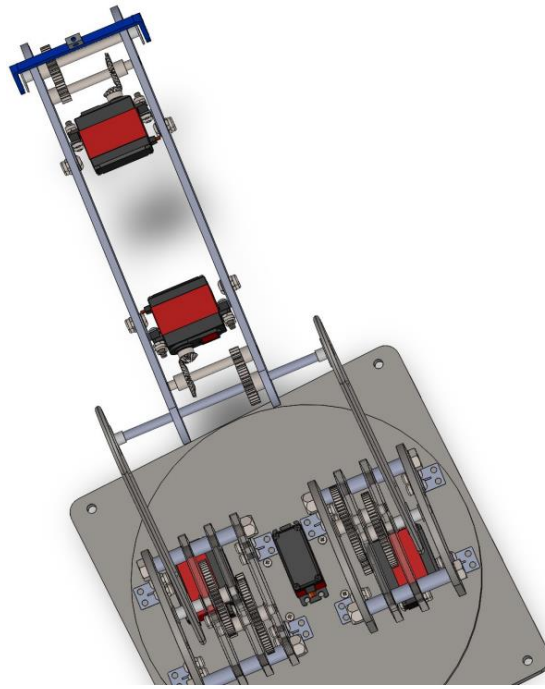
- Σχεδιάστηκε πολυβάθμιος μειωτήρας με μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς με σχέση $I=1/72$ με αποτέλεσμα μεγάλη ροπή και πιο αργή κίνηση.
- Η επιφάνεια της βάσης αυξήθηκε λόγω πολλών γραναζιών.
- Λόγω αλλαγής της θέσης στήριξης των Servo κινητήρων, στην 3^η και 4^η άρθρωση τοποθετήθηκαν μειωτήρες με κωνικούς οδοντωτούς τροχούς και σχεδιαστήκαν μειωτήρες με δυο μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς για προσδιορισμό της θέσης με μεγαλύτερη ακρίβεια.



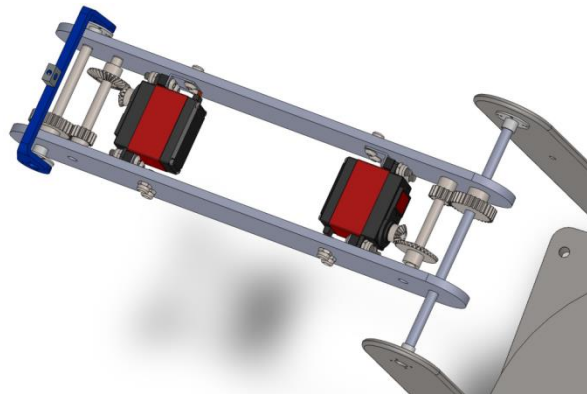
Εικόνα 38 «Σχέδιο 2» ολοκληρωμένο



Εικόνα 39 «Σχέδιο 2» Λεπτομέρεια περιστρεφόμενης άρθρωσης βάσης αριστερά



Εικόνα 40 «Σχέδιο 2» Πάνω όψη



Εικόνα 41 «Σχέδιο 2» πάνω όψη του δεύτερου μέλους

Μειονεκτήματα:

- Η 1^η άρθρωση στη βάση έχει αδύναμη στήριξη λόγω μεγάλης επιφάνειας και στήριξης μόνο γύρω από το ρουλεμάν.
- Η ακριβής τοποθέτηση των οδοντωτών τροχών των πολυβάθμιων μειωτήρων ώστε να έχουν καλή συναρμογή τα δόντια τους χωρίς να υπάρχουν ταλαντώσεις που καθορίζουν την ακρίβεια της θέσης του αισθητήρα είναι δύσκολη.

4.6.3 Σχέδιο 3

Βραχίονας με 2 αρθρώσεις και 2 βαθμούς ελευθερίας.

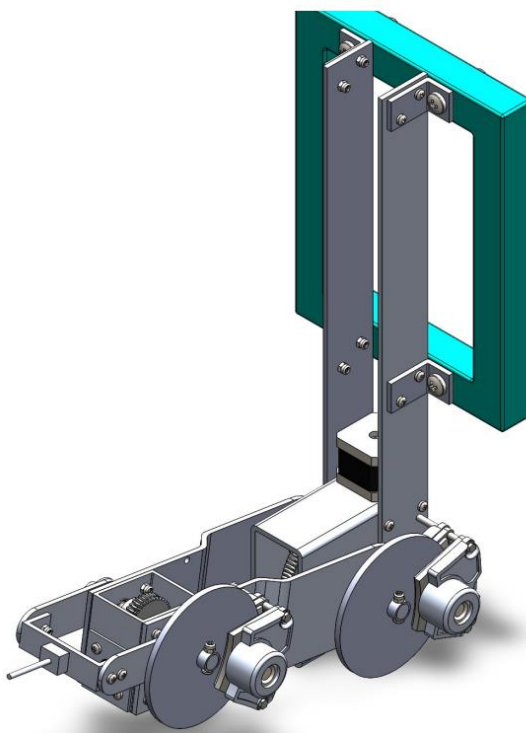
Οι αρθρώσεις του βραχίονα μειώθηκαν διότι εκτελούνται από τον φορέα στήριξης οποίος κινείται στους τρεις άξονες X,Y,Z (καρτεσιανή διάταξη).

Καταργήθηκε ο πολυβάθμιος μειωτήρας λόγω δυσκολίας κατασκευής και χρησιμοποιήθηκαν βηματικός κινητήρας (stepper motor) για έλεγχο της ακρίβειας κίνησης καθώς και φρένα για σταθερότητα.

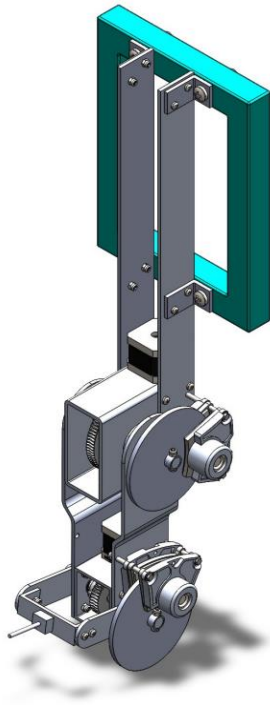
- Stepper motor είναι ο κινητήρας επιλογής για πολλές εφαρμογές ελέγχου ακριβείας. Επέλεξα κινητήρα με 200step (1,7°) με ροπή (1kgcm – 150kgcm).
- Τα δισκόφρενα περιλαμβάνουν δαγκάνες με πιστόνια που πιέζουν τα τακάκια επάνω στο δίσκο και προσφέρουν απόλυτα σταθερά μέλη χωρίς ταλαντώσεις.
- Τα μεταλλικά μέρη είναι από αλουμίνιο 4mm όπως και στο πρώτο σχέδιο.

Μειονεκτήματα

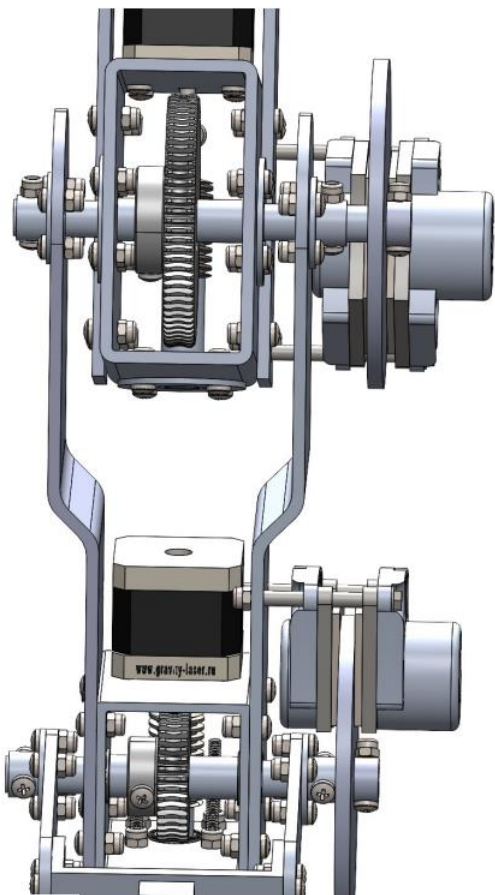
- Δυσκολία τοποθέτησης ατέρμονα και γραναζιών μέσα στο μεταλλικό πλαίσιο.



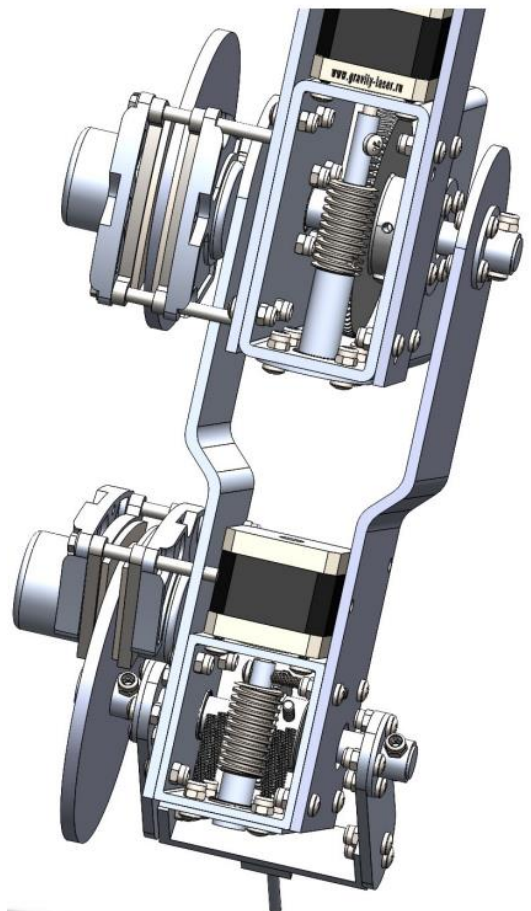
Εικόνα 42 «Σχέδιο 3» ολοκληρωμένο



Εικόνα 43 «Σχέδιο 3» » Το δεύτερο μέλος κάθετα (-90°)



Εικόνα 44 «Σχέδιο 3» Μπροστινή όψη

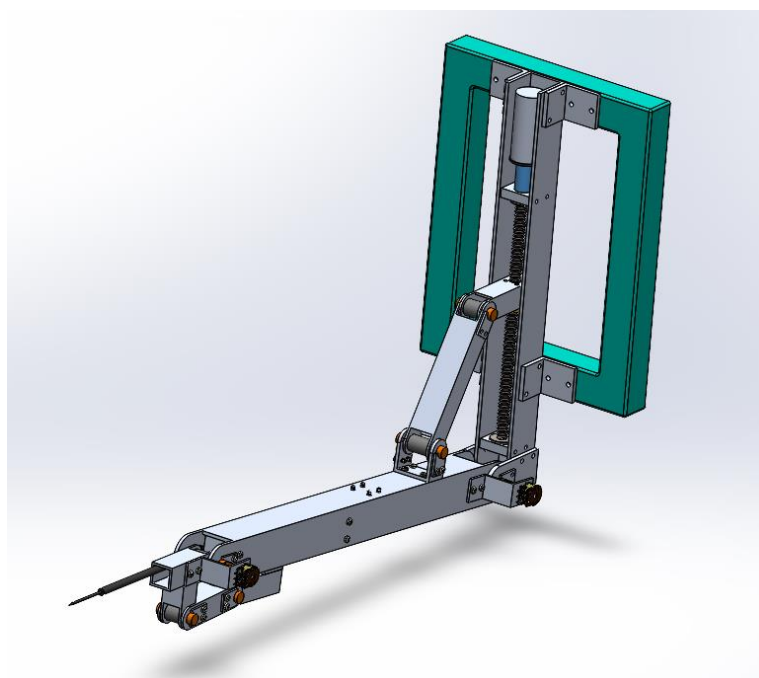


Εικόνα 45 «Σχέδιο 3» Πίσω όψη

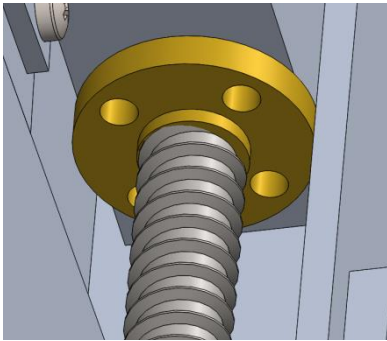
4.6.4 Σχέδιο 4

Μια ιδέα βασισμένη στον τρόπο λειτουργίας του γρύλλου αυτοκίνητου με κοχλία.

- Βραχίονες με 2 κύριες περιστροφικές αρθρώσεις και δυο βαθμών ελευθερίας.
- Σε κάθε κύρια άρθρωση αντιστοιχούν και δυο βοηθητικές περιστροφικές.
- Οι ατέρμονες με τους οδοντωτούς τροχούς αντικαταστάθηκαν με δύο τραπεζοειδείς κοχλίες που συνδέεται με τα μέλη του βραχίονα με περικόχλιο.
- Οι κοχλίες είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη με μικρούς κινητήρες σέρβο.
- Για πιο ακριβή έλεγχο της θέσης και καλύτερη επαναληπτικότητα προστέθηκαν ποτενσιόμετρα.

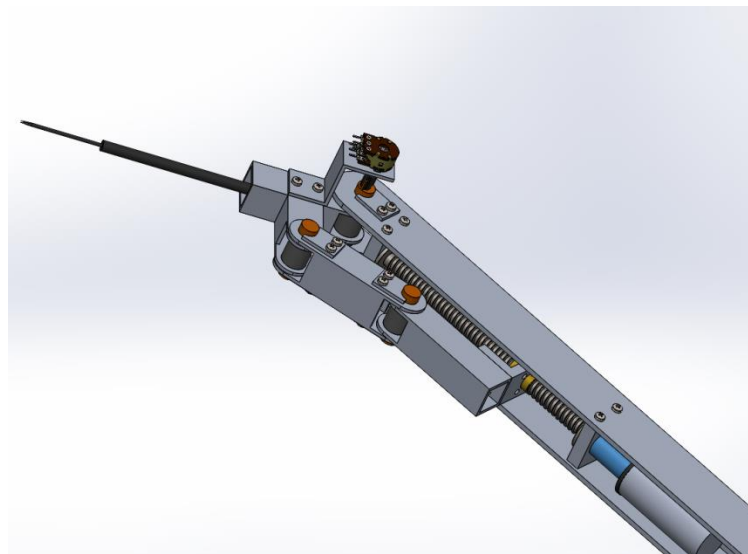


Εικόνα 46 «Σχέδιο 4» ολοκληρωμένο

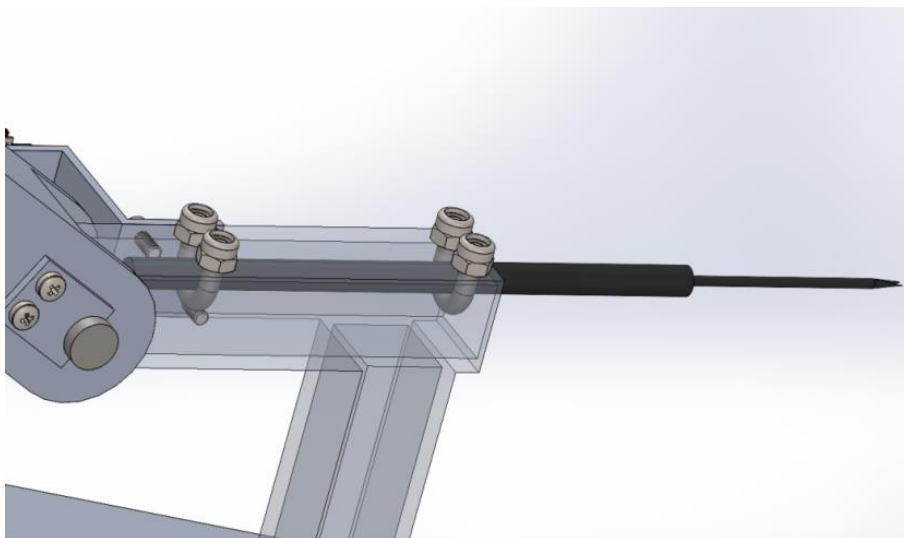


Οι κοχλίες κίνησης χρησιμεύουν για μετατροπή ροπών σε αξονικές αλλά και για μετατροπή περιστροφικής κίνησης σε γραμμική, ώστε να έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια και έλεγχο της μετατόπισης σε μηχανικές διατάξεις,

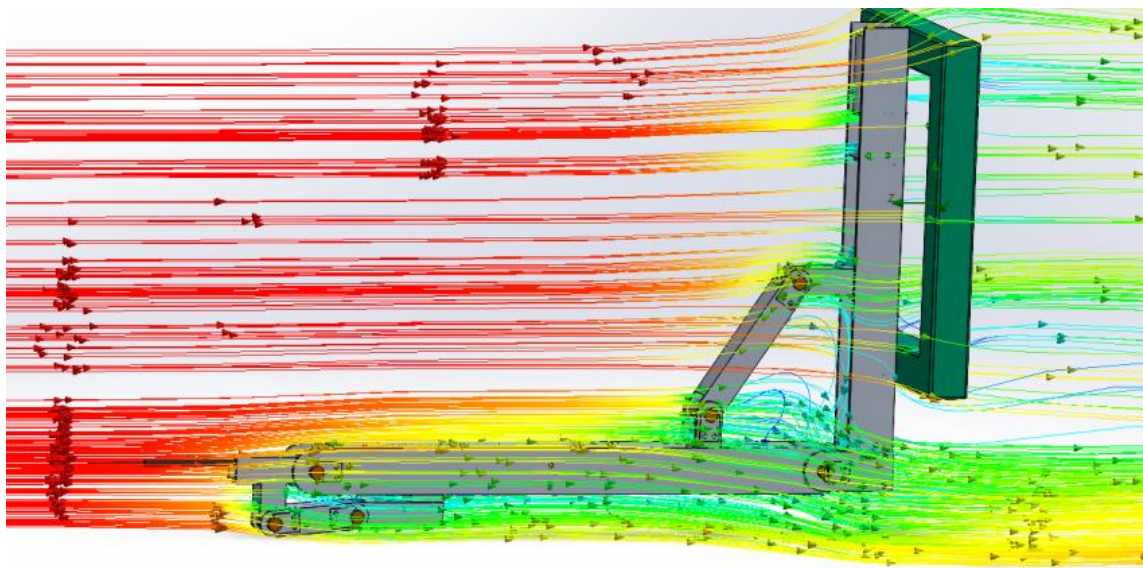
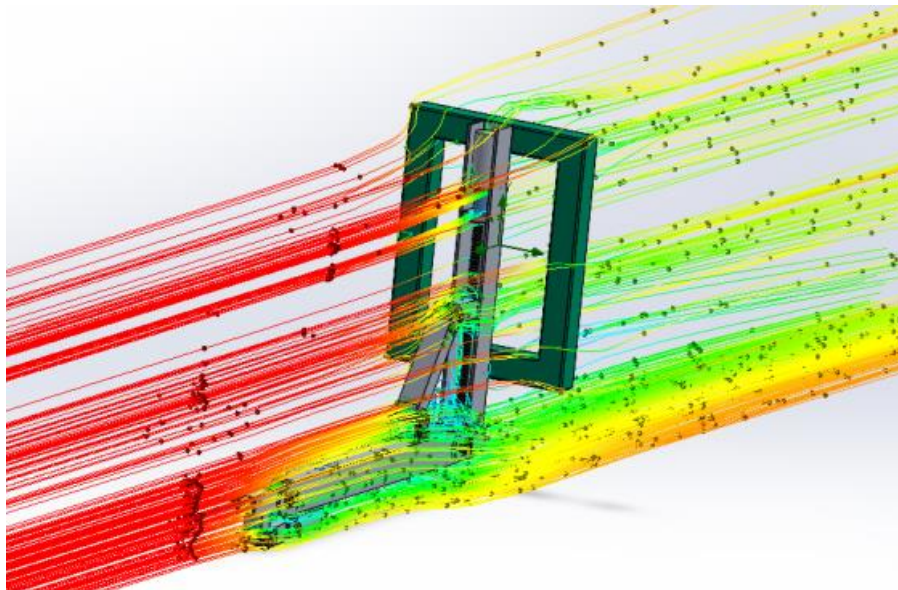
Διάμετρος 8mm lead 2mm thread pitch 2mm



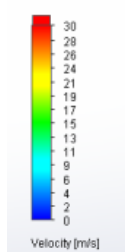
Εικόνα 47 «Σχέδιο 4» Το δεύτερο μέλος



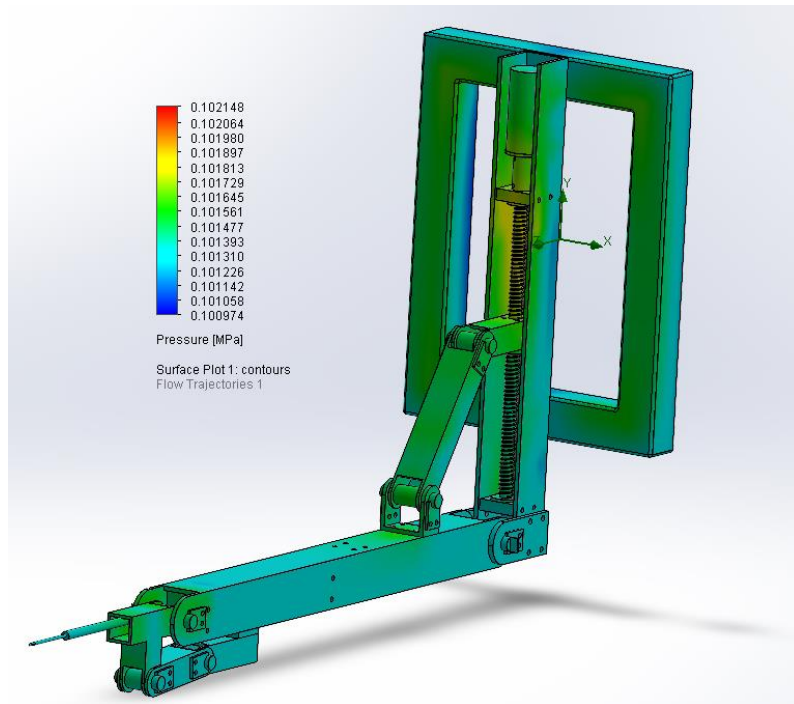
Εικόνα 48 Στήριξη αισθητήρα Hot wire



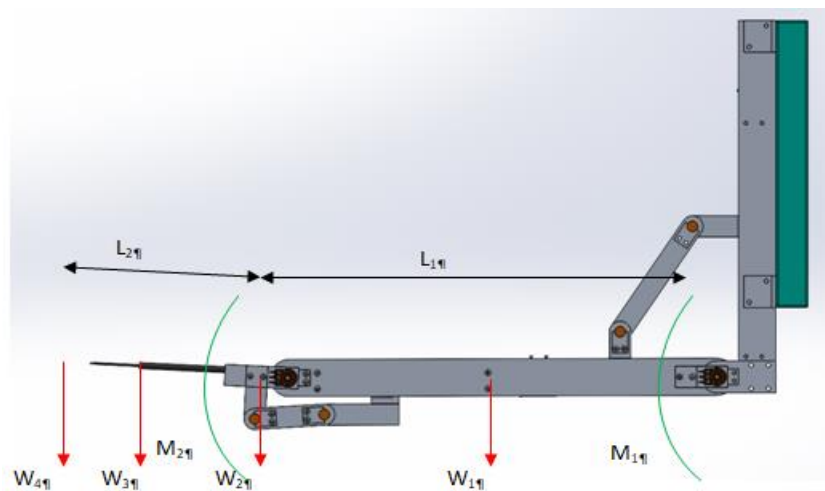
Εικόνα 49 Αεροδυναμική ροή, απεικόνιση του Solidworks flow simulation



Εικόνα 50 Υπόμνημα ενδείξεων ταχυτήτων ανέμου



Εικόνα 51 Ασκούμενες πιέσεις από την ταχύτητα του ανέμου



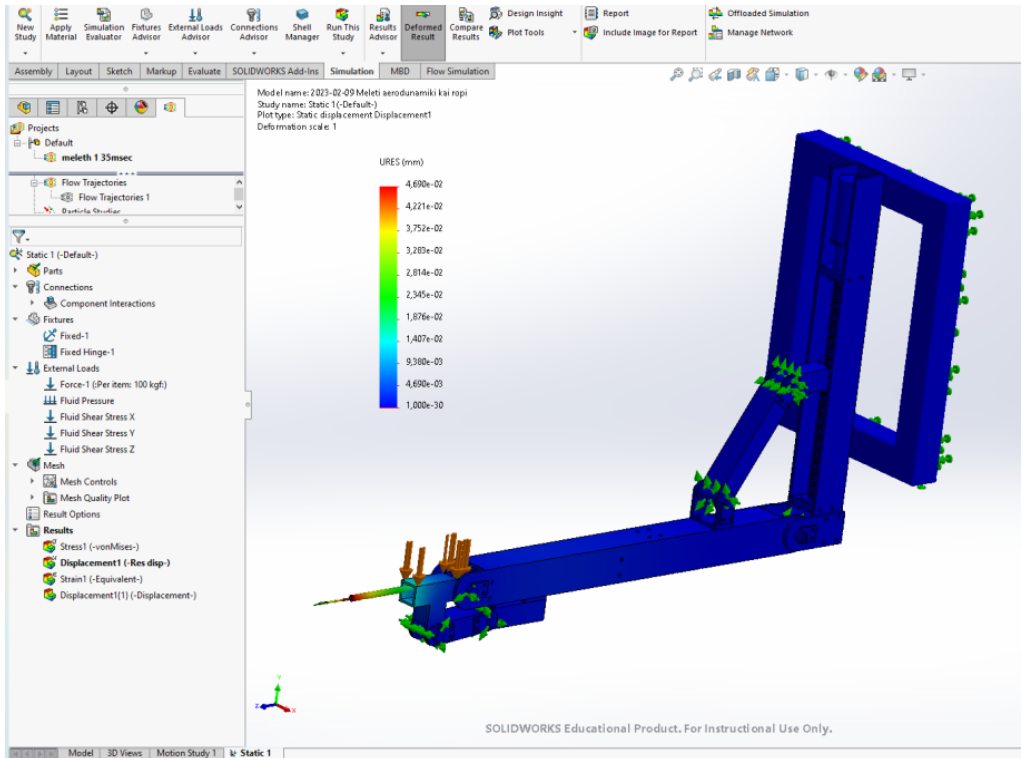
Εικόνα 52 Ροπές δύναμης του βραχίονα

Η εξίσωση της ροπής για την πρώτη άρθρωση

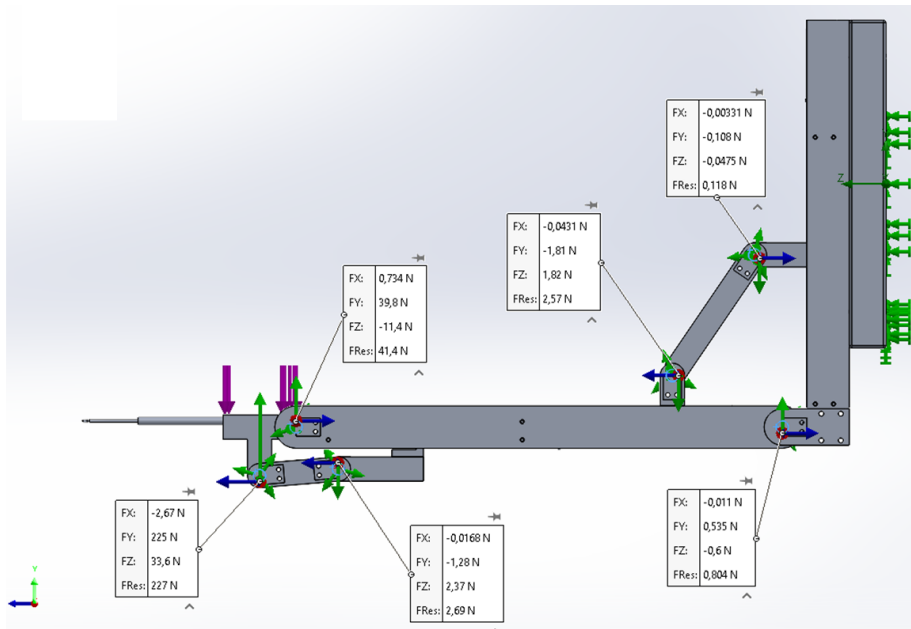
$$M_1 = \left(\frac{L_1}{2} \times W_1\right) + (L_1 \times W_2) + \left(\left(L_1 + \frac{L_2}{2}\right) \times W_3\right) + (L_1 + L_2) \times W_4$$

Ενώ για τη δεύτερη άρθρωση είναι

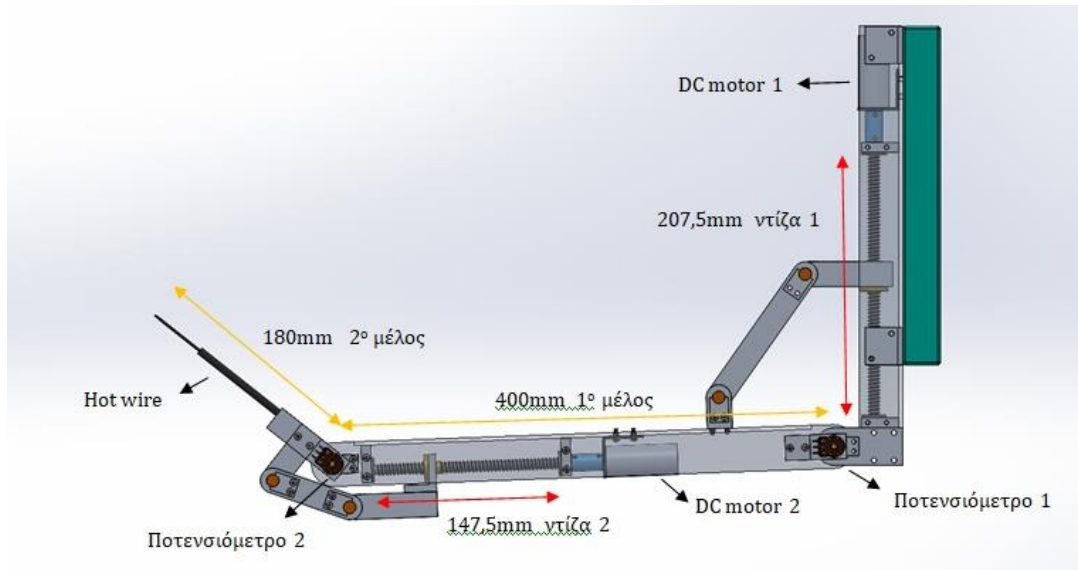
$$M_2 = \left(\frac{L_2}{2} \times W_3\right) + (L_2 \times W_4)$$



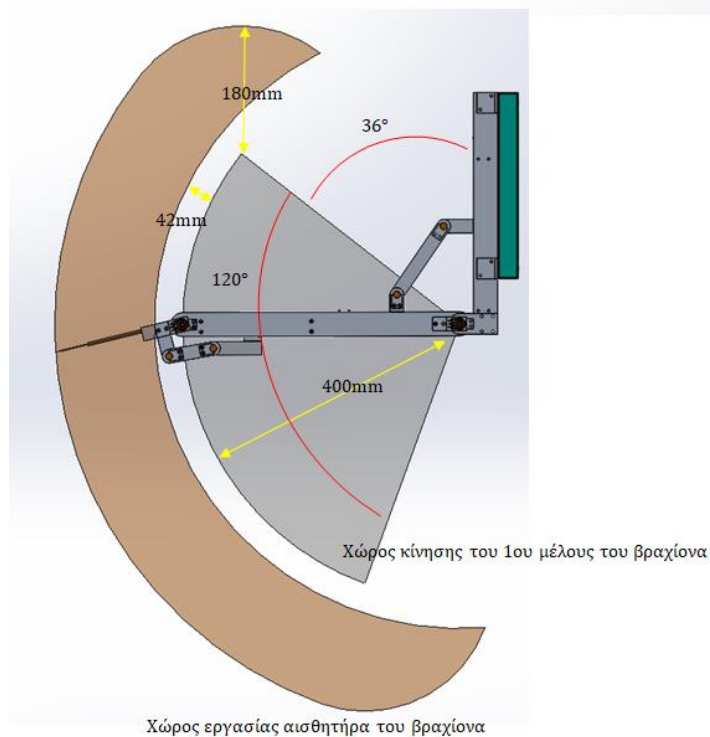
Εικόνα 53 Μετατόπιση αισθητήρα βάσει υπολογισμών (Solidworks Simulation)



Σχήμα 17 Εμφάνιση των αντιδράσεων στις αρθρώσεις λόγω του βάρους του βραχίονα μαζί με το βάρος του αισθητήρα και της πίεσης που ασκείται επάνω του λόγω της ταχύτητας του ανέμου που περνάει από την αεροσήραγγα.

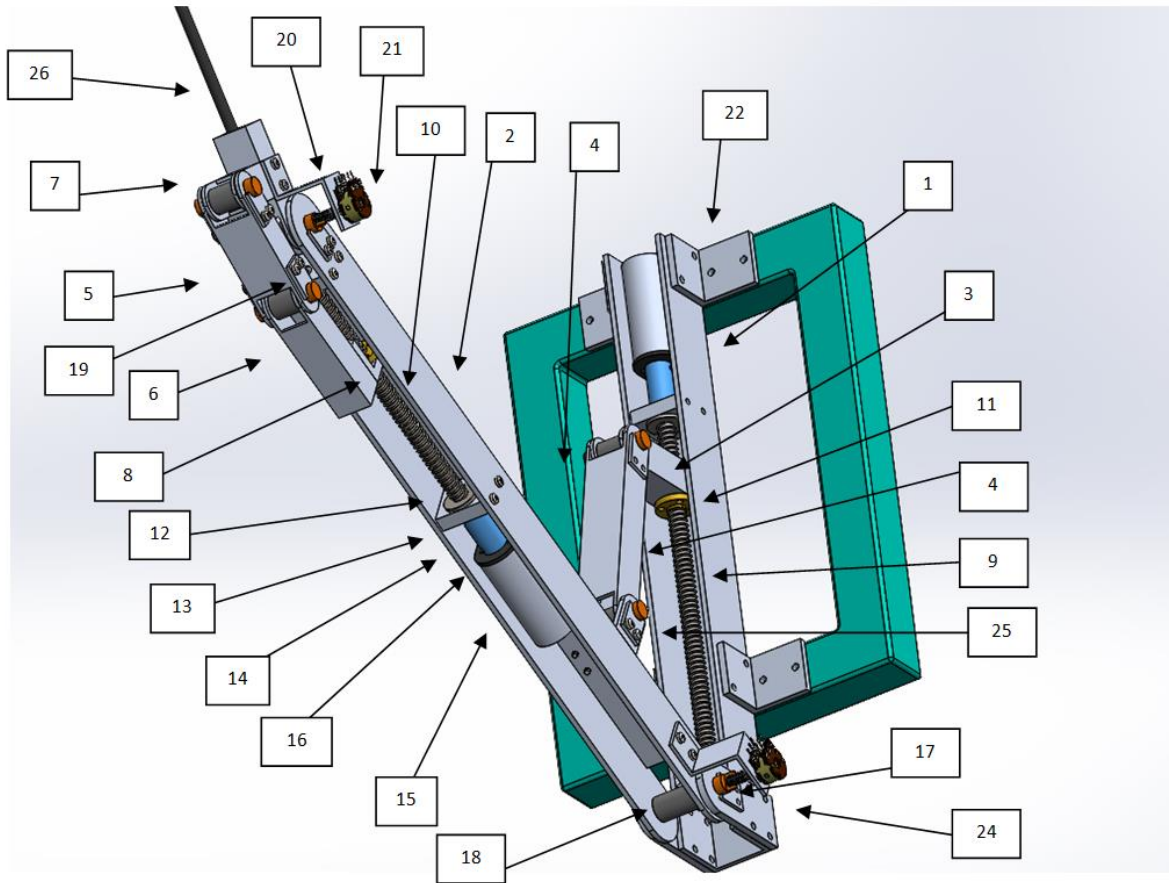


Εικόνα 54 Διαστάσεις βραχίονα



Εικόνα 55 Χώρος εργασίας του ρομποτικού βραχίονα

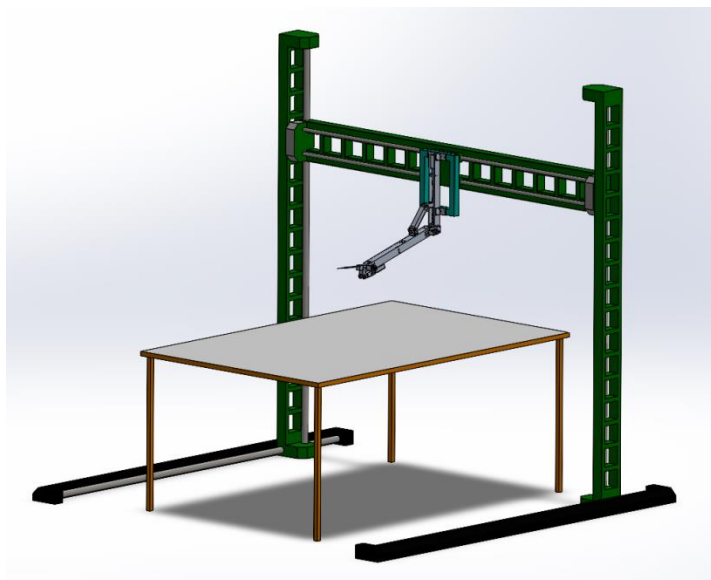
Κατασκευή τραπεζοειδή κοχλία με μήκος 207,5mm που μπορεί να κινηθεί σε 120°



Εικόνα 56 Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα με αρίθμηση των στοιχείων που αποτελείται

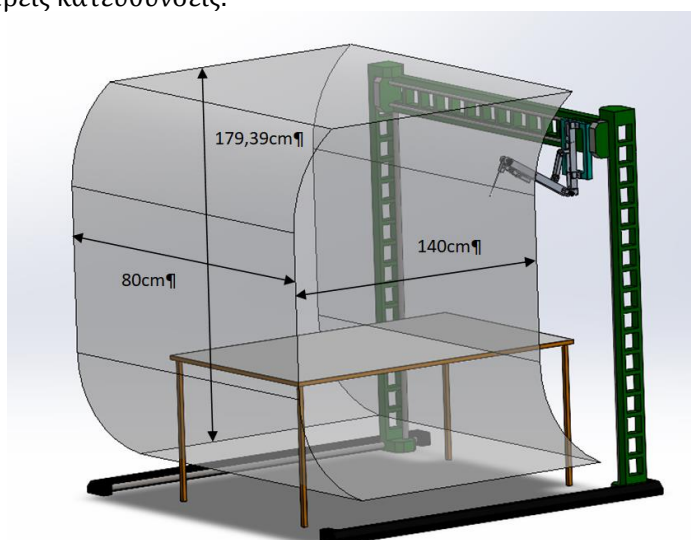
Κατάλογος των μελών του ρομποτικού βραχίονα				
A/A	ΟΝΟΜΑ	ΥΛΙΚΑ	ΔΙΣΤΑΣΕΙΣ σε mm	ΒΑΡΟΣ σε gr
1	Βάση στήριξης	Aluminium 6063	U profile 35*35*3*350	320,8
2	Βραχίονας 1ος	Aluminium 6063	U profile 35*35*3*351	348,87
3	Σύνδεσμος με περικόχλιο	Aluminium 6063	20*20*2*80	31,12
4	Σύνδεσμος	Aluminium 6063	25*20*2*140	62,02
5	Σύνδεσμος	Aluminium 6063	25*20*2*85	37,655
6	Σύνδεσμος	Aluminium 6063	20*20*2*80	31,12
7	Βραχίονας 2ος	Aluminium 6063	20*20*2*110	42,79
8	Σύνδεσμος με περικόχλιο	Aluminium 6063	20*20*2	10
9	Τραπεζοειδής Κοχλίας (Ντίζα)	Steel	179 Thread Pitch 2	60
10	Τραπεζοειδής Κοχλίας (Ντίζα)	Steel	145,5 Thread Pitch 2	50
11	Περικόχλιο για Τραπεζοειδή Κοχλία T8*2	Brass	8 Thread Pitch 2mm	24
12	Ρουλεμάν με Φλάντζα - MF128ZZ*4	Steel	8d 12D	8
13	Βάση στήριξης ρουλεμάν*4	Aluminium 6063	21*16*4	24
14	Solid Coupler*2	Aluminium	25 4-8	16
15	σερβοκινητήρας*2	Μεταλλικά	25	200
16	Motor Mount *2	Aluminium	30 x 26 x 33	30
17	πυρρος*6	Ατσάλι	8	30
18	αυτολίπαντα δαχτυλίδια *6	Ατσάλι	10	48
19	ασφάλεια θέσης πηνίου*12	Aluminium 6063	20*10*2	36
20	στήριξη ποτενσιόμετρου *2	Aluminium 6063	15*15*1	12
21	ποτενσιόμετρο *2	Χαλκος		10
22	γωνία στήριξης στη φορέα*4	Aluminium 6063	14*10*4	44
23	βίδες*80	Steel	3	40
24	σύνδεσμοι συνδεδεμένοι μεταξύ τους	Aluminium 6063	14*10*2	12
25	βάση συνδεδεμένο 1 άρθρωση 2	Aluminium 6063	20*20*2	30
26	Ανιχνευτής Hot wire	Βολφραμίου	10	100

4.7 Τελικός σχεδιασμός



Εικόνα 57 Τελικό σχέδιο

Το πλαίσιο στο οποίο είναι προσαρμοσμένος ο ρομποτικός βραχίονας των δύο περιστροφικών αρθρώσεων και των δύο βαθμών ελευθερίας, έχει τη δυνατότητα πρισματικής κίνησης και στους τρεις κατευθύνσεις.



Εικόνα 58 Παρουσίαση χώρου εργασίας, σε οποιαδήποτε θέση του οποίου δυνητικά μπορεί να βρεθεί το τελικό στοιχείο δράσης του βραχίονα μπροστά απ' την αεροσήραγγα

Αποτέλεσμα: Μεγάλη σταθερότητα του ρομποτικού συστήματος και ακρίβεια που στην παρακολούθηση του αντικειμένου σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου εργασίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Είναι μεγάλης σημασίας το άκρο του αισθητήρα να είναι απολύτως σταθερό και όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια του για να μην αλλοιώνεται η στροβιλώδης ροή και χάνεται η ακρίβεια της μέτρησης. Επίσης να μην γίνεται σφάλμα στροβιλισμού της τυρβώδους ροής. Όλες οι κατασκευές έγιναν με σκοπό την ελάχιστη ταλάντωση του αισθητήρα.

Η ολοκλήρωση της σχεδιομελέτης του ρομποτικού βραχίονα απαίτησε πολλές ώρες στο χειρισμό του προγράμματος Solidworks ώστε να αξιοποιηθούν τα εργαλεία που διαθέτει και να ολοκληρωθεί ψηφιακά. Αυτό είναι το πρώτο μέρος της εργασίας, γιατί θεωρώ απαραίτητο, ως επόμενο βήμα, την πραγματική του κατασκευή με υλικά, προκειμένου να τοποθετηθεί στην αεροσήραγγα και να παρθούν πραγματικές μετρήσεις ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία του στο μέλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]Εμίρης Δημήτρης, Κουλουριώτης Δημήτρης, Ρομποτική, 4η Έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ 2020

[2]Δουλγέρη Ζωή, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ –κινηματική, δυναμική και έλεγχος αρθρωτών βραχιόνων ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΙΤΙΚΗ 2007

[3]Craig J John, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ – Μηχανική και Αυτόματος Έλεγχος - 3η Έκδοση ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

[4]Μπουτάλη Σ. Γιάννη, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ – Ανάλυση, Έλεγχος και Προγραμματισμός Ρομποτικών Χειριστών Σταθερής Βάσης ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΙΚΟΣ 2017

[5]Corke Peter, Ρομποτική, Όραση και Έλεγχος ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟ MATLAB 2η Έκδοση ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΦΟΥΝΤΑΣ 2017

[6]Mordechai Ben-Ari Francesco Mondada Elements of Robotics SpringerOpen 2018 eBook <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1>

[7]Σταμάτης Αλατσαθιανός, Ειρήνη Αλατσαθιανού , Ρομποτική για Μηχανικούς

[8]Δρ. Σταμάτης Αλατσαθιανός, Εισαγωγή στη ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΗ και στα ενσωματωμένα συστήματα

[9]ΙΩΑΝΝΗΣ Κ.ΣΤΕΡΓΙΟΥ, ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ι.ΣΤΕΡΓΙΟΥ, ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΙΙ

[10]Νέον Ορθογραφικόν Λεξικόν Δ. Δημητράτος 1964

[11]Λεξικό Νέας Ελληνικής Γλώσσας Γ. Μπαμπινιώτη έκδοση 2008

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

[12] CAPEK, Karel (1890-1938). R.U.R. Rossum's Universal Robots. Prague: Aventinum, 1920. 8° (213 x 140mm). (One gathering detached but present, one leaf with a tear touching some letters, some soiling.) Original brown cloth-backed printed wrappers, pink endpapers (spine chipped and with tears, extremities rubbed). Provenance: a contemporary theatrical company (annotations). (christies.com)

[13] Robot's World: Histoire de la robotique (robotsworld2.blogspot.com)

[14] Τάλως, ο χάλκινος γίγαντας Τάλος προστατεύει την Κρήτη (explocrete.com)

[15] <https://www.mixanitouxronou.gr/rompot-i-lexi-pou-proekipse-apo-tin-katanagkastiki-ergasia-ke-tous-sklavous-tin-epinoise-enas-theatrikos-singrafeas-to-1921-pou-proidopiise-gia-tin-exelixa-ton-michanon-ke-polemise-to-nazismo/>

[16] Κλασική Αγγειογραφία (Υστερη Ι), Ζωγράφος του Τάλω, Ο θάνατος του Τάλω (sch.gr)

[17] Μουσείο Αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας "Κώστας Κοτσανάς" - Αρχική (kotsanas.com)

[18] Ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων | ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ (amth.gr)

[19] Αρχαία ελληνική τεχνολογία: 18 απολύτως εξωπραγματικές εφευρέσεις των αρχαίων Ελλήνων! (dinfo.gr)

[20] "Ιστορικά Γεγονότα για την Ρομποτική" - Free stories online. Create books for kids | StoryJumper

[21] Η Ιστορία των Ρομπότ. Η εξέλιξή τους. - Αθηνοδρόμιο (athinodromio.gr)

[22] C-3PO - Βικιπαίδεια (wikipedia.org)

[23] (3) First Industrial Robot Ever Installed on an Assembly Line | Innovation Nation - YouTube

[24] GIZELIS ROBOTICS - Effective Automation (grobotics.eu)

[25] Space Station Robotic Arms Have a Long Reach | NASA

[26] NHS surgeons become pioneers in robotic surgery - Hospital Times

[27] Τεχνητή νοημοσύνη. Έξυπνη Ρομποτική Ανάλυση Φύλλων και Φυλλώματος Γονιμοποίηση και Επικοινωνία Φρούτων Λαχανικά Εικόνα Αρχείου - Εικόνα ανίχνευσης, περιβάλλον: 246505771 (dreamstime.com)

- [28] [Kiwi Bots roll into the Westwood area's food delivery scene - Daily Bruin](#)
- [29] [TORS, trans-oral robotic surgery \(maxfacts.uk\)](#)
- [30] [Crucial role of motion sensor data in video stabilization | Imint \(weareimint.com\)](#)
- [31] <https://robocademy.com/2020/04/13/how-to-choose-an-actuator-for-your-robot/>
- [32] <https://www.yswinch.com/product/small-pneumatic-motors/>
- [33] [Υδραυλικά & Πνευματικά ΣΑΕ - ppt κατέβασμα \(slideplayer.gr\)](#)
- [34] <https://www.electricaltechnology.org/2020/06/difference-between-ac-dc-motor.html>
- [35] <https://www.electricaltechnology.org/2016/05/bldc-brushless-dc-motor-construction-working-principle.html>
- [36] <https://www.instructables.com/4-5-6-and-8-wire-Stepper-Motors/>
- [37] <https://hu.pinterest.com/pin/278801033169696809/>
- [38] [Measurement Principles of CTA - Dantec Dynamics](#)
- [39] [Computer-aided design – Wikipedia](#)
- [40] [SolidWorks - Wikipedia](#)