

# Βελτιωμένος Σχεδιασμός και Κατασκευή Απτικού Μηχανισμού Δύο Βαθμών Ελευθερίας

(Improved design and construction of a 2- DoF haptic  
mechanism)

Καπαρινού Χρυσή Μαρία

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Βλάχος Κωνσταντίνος

Ιωάννινα, Μάρτιος, 2024



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ. Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**

---

**DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & ENGINEERING**

**UNIVERSITY OF IOANNINA**

## Ευχαριστίες

Στο πλαίσιο ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν με τον δικό τους τρόπο στην υλοποίησή της. Ιδιαίτερα οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Κωνσταντίνο Βλάχο για την πολύτιμη καθοδήγηση, υποστήριξη και υπομονή που μου επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κουράκο-Μαυρομιχάλη Ευάγγελο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση στο κομμάτι της τρισδιάστατης εκτύπωσης του μηχανισμού. Τέλος, ευχαριστώ του γονείς μου για τη στήριξη και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια. Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη και βοήθεια όλων των προαναφερθέντων. Τους ευχαριστώ από καρδιάς.

## Περίληψη

Σε μια εποχή ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας, η αλληλεπίδραση ανθρώπου-μηχανής εξελίσσεται με μεγάλο ρυθμό . Σε αυτό το πλαίσιο, οι απτικοί μηχανισμοί παρουσιάζονται ως ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο, προσφέροντας μια νέα διάσταση στην επικοινωνία μέσω της αίσθησης της αφής. Η εφαρμογή τους ποικίλει σε διάφορους τομείς, όπως η ιατρική, η ψυχαγωγία, η εκπαίδευση και η βιομηχανία . Η παρούσα εργασία εστιάζει στη βελτίωση της κατασκευής και λειτουργίας ενός απτικού μηχανισμού 2 βαθμών ελευθερίας κρατώντας το κόστος χαμηλά. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί μία από τις μεθόδους επικοινωνίας ανθρώπου μηχανής, χρησιμοποιώντας την αίσθηση της αφής, ώστε αυτή να επιτευχθεί. Στόχος μας είναι να κατανοήσουμε τη λειτουργία των απτικών μηχανισμών, να ερευνήσουμε και να σχεδιάσουμε πιο αποδοτικούς τρόπους κατασκευής και λειτουργίας, να εξοικειωθούμε με την απαραίτητη θεωρία και τον εξοπλισμό και να δημιουργήσουμε λογισμικό για την επικοινωνία του μηχανισμού με τον υπολογιστή.

**Λέξεις κλειδιά :** απτικός μηχανισμός , επικοινωνία ανθρώπου μηχανής, αφή, ροπές, python

## Abstract

In an era of rapid technological advancement, human-machine interaction is evolving at a rapid pace. Within this context, haptic mechanisms emerge as a highly promising tool, offering a new dimension to communication through the sense of touch. Their application varies across various fields such as medicine, entertainment, education, and industry. This paper focuses on improving the construction and operation of a 2-degree-of-freedom haptic mechanism while keeping costs low. This mechanism is one of the methods of human-machine communication, utilizing the sense of touch to achieve it. Our goal is to understand the function of haptic mechanisms, explore and design more efficient methods of construction and operation, familiarize ourselves with the necessary theory and equipment, and develop software for the mechanism's communication with the computer.

Keywords: haptic mechanism, human-machine communication, touch, torques, Python

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	2
Περίληψη .....	3
Abstract .....	4
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	7
1.1 Τι εννοούμε με την έννοια απτική τεχνολογία; .....	7
1.2 Ιστορική Αναδρομή .....	8
1.3 Τομείς Εφαρμογής Απτικής Τεχνολογίας.....	10
Κεφάλαιο 2. Μαθηματικές Εξισώσεις .....	14
2.1 Ευθεία Κινηματική.....	14
2.2 Αντίστροφη Κινηματική .....	15
2.3 Ιακωβιανή .....	16
2.4 Στατική .....	17
Κεφάλαιο 3. Υλικό που χρησιμοποιήθηκε .....	18
3.1 Κινητήρες .....	18
3.1.1 Rotary encoders .....	18
3.1.2 Ametek Pittman GM8212D142 .....	19
3.2 Κάρτες σημάτων .....	20
3.2.1 National Instruments USB-6003.....	20
3.2.2 National Instruments USB-6210.....	20
3.3 Οδηγοί κινητήρων .....	21
3.3.1 Escon Module 50/5 .....	21
3.4 Υπόλοιπα υλικά .....	22
Κεφάλαιο 4. Σύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων.....	24
DC MOTOR W/ ENCODER .....	26
ESCON MODULE 50/5 .....	26
USB6003 .....	26
USB6210 .....	27
Κεφάλαιο 5. Σχεδιασμός Βάσης Στήριξης.....	27
5.1 Καινούργιο σχέδιο βάσης .....	28
Κεφάλαιο 6. Σχεδιασμός Συνδέσμων .....	31
6.1 Προβλήματα Προηγούμενου Μηχανισμού.....	31
6.2 Προσπάθειες Υλοποίησης .....	32

6.3 Τελική Υλοποίηση .....	36
6.4 Τελική Κατασκευή .....	39
Κεφάλαιο 7. Προγραμματισμός μηχανήματος .....	40
7.1 Πειράματα .....	41
7.2 Περιγραφή κώδικα .....	43
7.3 Εικονικό Περιβάλλον .....	48
7.4 Μηχανισμός σε Λειτουργία.....	50
7.41 Λειτουργία με την πρώτη υλοποίηση συνδέσμων.....	50
7.42 Λειτουργία με την τελική υλοποίηση συνδέσμων .....	52
7.5 Σύγκριση των δύο υλοποιήσεων συνδέσμων .....	54
Κεφάλαιο 8. Οδηγίες χρήσης του μηχανισμού .....	58
Κεφάλαιο 9. Επίλογος .....	59
9.1 Σύνοψη και συμπεράσματα.....	59
9.2 Μελλοντικές Αλλαγές.....	59
Αναφορές.....	60

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1 Τι εννοούμε με την έννοια απτική τεχνολογία;

Η απτική τεχνολογία (κιναισθητική επικοινωνία ή τρισδιάστατη αφή) είναι μια τεχνολογία που μπορεί να δημιουργήσει μια εμπειρία αφής εφαρμόζοντας δυνάμεις, δονήσεις ή κινήσεις στον χρήστη [1]. Με απλά λόγια, η τεχνολογία αυτή, επιτρέπει σε κάποιον να λαμβάνει απτικές πληροφορίες μέσω των αισθήσεών του. Εστιάζει στην απομίμηση της ανθρώπινης αφής, επιτρέποντας την κατασκευή ελεγχόμενων απτικών αντικειμένων. Την απτική ανάδραση επιτρέπουν οι ενεργοποιητές (Actuators). Οι ενεργοποιητές, οι οποίοι παρέχουν δυνάμεις για απτική ανάδραση και ελέγχους, είναι συσκευές που όταν αποστέλλεται ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του ενεργοποιητή, ο μηχανισμός στο εσωτερικό του κινείται. Στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν μόνο ηλεκτρομαγνητικές συσκευές. Αυτοί οι ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες παρέχουν ισχυρή ανατροφοδότηση και συνήθως λειτουργούν σε συντονισμό, αλλά παρέχουν μόνο ένα στενό εύρος συναισθημάτων. Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή, τα πιεζοηλεκτρικά, τα ηλεκτροστατικά και οι επιφανειακές ενεργοποιήσεις υποηχητικών ηχητικών κυμάτων είναι μερικά μόνο παραδείγματα της επόμενης γενιάς τεχνολογιών ενεργοποιητών που προσφέρουν ταχύτερους χρόνους αντίδρασης [2]. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η ανθρώπινη αφή στηρίζεται σε τρία αισθητήρια συστήματα: δερματικά, κιναισθητικά και απτικά. Η αίσθηση της αφής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως παθητική και ενεργή, με τον όρο "απτικός" να συνδέεται συχνά με την ενεργή αφή, που σχετίζεται με την αλληλεπίδραση και την αναγνώριση αντικειμένων. Η απτική επιτρέπει στον χρήστη να αλληλεπιδρά με συσκευές που βασίζονται σε υπολογιστή, λαμβάνοντας ανατροφοδότηση αφής και δύναμης. Η πρώτη μπορεί να μας ενημερώσει για την υφή του αντικειμένου (π.χ. τραχιά ή λεία). Η δεύτερη προσομοιώνει κάποιες φυσικές ιδιότητες του αντικειμένου, όπως το βάρος ή η πίεση του. Σε μία πιο γενική εικόνα, πρόκειται για τη προσομοίωση ενός αντικειμένου ή μια αλληλεπίδραση από το εικονικό σύστημα, δημιουργώντας την αίσθηση ότι είναι πραγματικό[3]. Οι απτικοί μηχανισμοί, λόγω της γρήγορης ανάπτυξης της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχουν εισαχθεί σε πολλούς κλάδους, όπως είναι η ψυχαγωγία, η ιατρική, οι διαστημικές επιστήμες και η ρομποτική. Ένα από τα πρώτα παραδείγματα απτικής ανάδρασης στη καθημερινότητα μας είναι η δόνηση του κινητού τηλεφώνου.



Εικόνα 1 : Απτικός μηχανισμός 7 βαθμών ελευθερίας [4]

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η αρχή της απτικής τεχνολογίας μπορεί να αναχθεί σε μια μηχανική λύση που δημιουργήθηκε ως απάντηση στο πρόβλημα της αφθονίας ραδιενεργών υλικών μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Η άμεση επαφή που συνεπάγεται τον χειρισμό αυτού του υλικού αποτελούσε κίνδυνο, και έτσι αναπτύχθηκαν μηχανικές συσκευές, γνωστές ως κινητικές συνδέσεις, προκειμένου να το χειρίζονται με ασφάλεια. Το τράβηγμα, η στροφή ή το σπρώξιμο ενός χρήστη στο σύστημα αναπαράγονταν από τους κινητικούς συνδέσμους στο ραδιενεργό υλικό, αποφεύγοντας εντελώς την ανθρώπινη επαφή, αλλά παρέχοντας την απαραίτητη λεπτότητα της ανθρώπινης κίνησης.

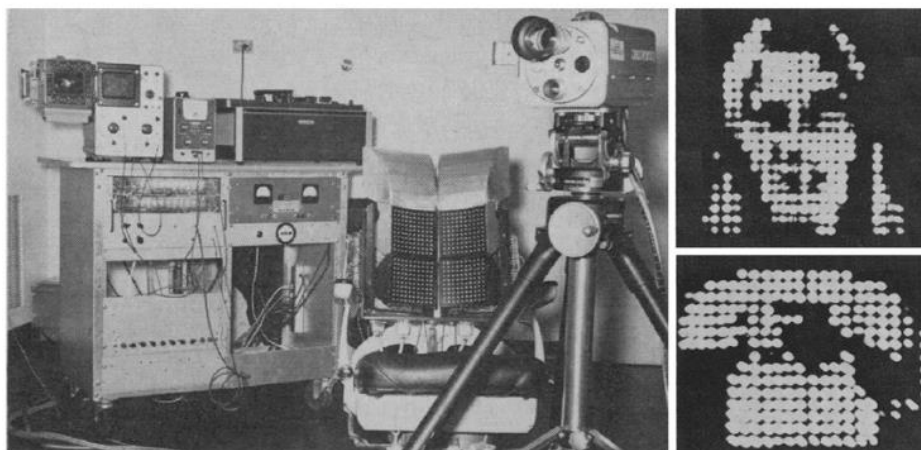
Μια άλλη πλευρά της απτικής τεχνολογίας αναπτύχθηκε επίσης την εποχή του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Το πρώτο σύστημα απτικής ανάδρασης αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε σε αεροπλάνα, προκειμένου να βοηθήσει τους πιλότους αεροπλάνων να γνωρίζουν πότε ο κινητήρας τους ήταν έτοιμος να σταματήσει. Το σύστημα απτικής ανάδρασης, το οποίο δονούσε τον μοχλό ελέγχου, ενεργοποιούνταν όταν ο κινητήρας πλησίαζε στο σβήσιμο, επιτρέποντας στους πιλότους να ελέγχουν καλύτερα τα αεροπλάνα τους. [5]



Εικόνα 2



Τη δεκαετία του 60, ο Paul Bach-y-Rita ανέπτυξε ένα σύστημα προσομοίωσης της όρασης (Εικόνα 3 ) μέσω της αίσθησης της αφής. Το σύστημα αυτό αποτελούνταν από ένα πλέγμα ράβδων 20x20. Οι ράβδοι αυτοί αναλογούσαν σε pixel μιας οθόνης και είχαν την δυνατότητα να ανυψώνονται και να χαμηλώνουν, οι χρήστες μπορούσαν να αναγνωρίσουν εικόνες από το μοτίβο των ράβδων που ακουμπούσαν στην πλάτη τους, ενώ αυτοί κάθονταν σε μια καρέκλα. [6] [7]



Εικόνα 3 : The Tactile Television

Το Motorola StarTAC (Εικόνα 4) ήταν από τις πρώτες κινητές συσκευές που εφάρμοσαν τη λειτουργία δόνησης. Αντιλαμβανόμενοι ότι οι χρήστες δεν ήθελαν να ενοχλούν τους άλλους κατά τη διάρκεια συσκέψεων, αλλά ήθελαν να είναι ενήμεροι για τις εισερχόμενες τηλεφωνικές κλήσεις και τα μηνύματα , οι κατασκευαστές πρόσθεσαν μια εκτός κέντρου μάζα σε ένα μοτέρ που ονομάζεται έκκεντρη περιστρεφόμενη μάζα (ERM) για να δονείται η συσκευή.[8][9]



Εικόνα 4: Motorola StarTAC

Οι απτικοί κινητήρες εισήχθησαν για πρώτη φορά για χειριστήρια βιντεοπαιχνιδιών με το Nintendo 64 το 1997 μετά την κυκλοφορία του πρόσθετου Rumble Pak (Εικόνα 5 ). Το Rumble Pak ήταν ένα πρόσθετο για το χειριστήριο Nintendo 64, που παρείχε απτική ανατροφοδότηση στη συσκευή αναπαραγωγής. Πρόκειται για την πρώτη εμπορική συσκευή απτικής ανάδρασης για μια κονσόλα βιντεοπαιχνιδιών. [10] [11]

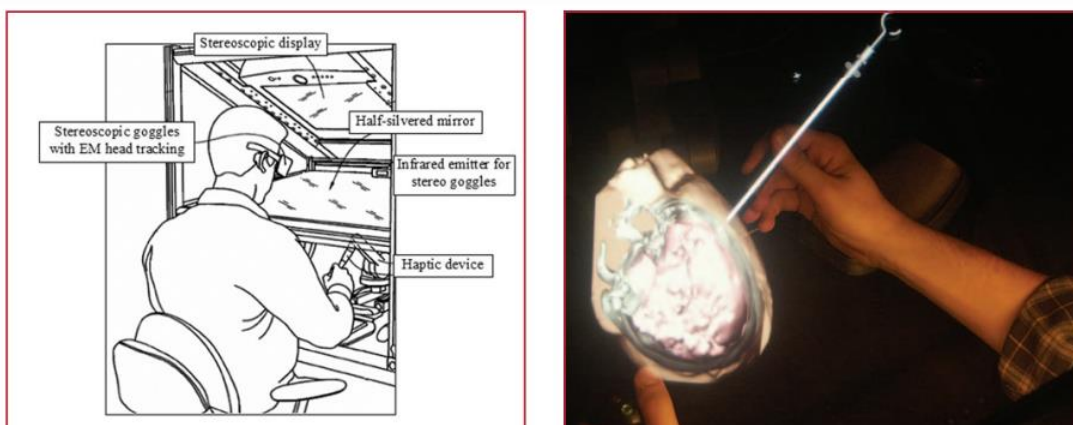


Εικόνα 5 : Nintendo 64 rumble pak

### 1.3 Τομείς Εφαρμογής Απτικής Τεχνολογίας

**Ιατρική:** Στην ιατρική χρησιμοποιούμε την απτική τεχνολογία για να αναπαραστήσουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός ιατρού και του ανθρώπινου σώματος κατά τη διάρκεια ιατρικών εξετάσεων και χειρουργικών επεμβάσεων. Επίσης, Η απτική τεχνολογία επιτρέπει στους χειρουργούς να εξασκηθούν σε ρεαλιστικές προσομοιώσεις, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την αυτοπεποίθησή τους πριν από την πραγματική επέμβαση αλλά μπορεί και να τους προσφέρει μία ρεαλιστική αίσθηση κατά την διάρκεια χειρουργικών επεμβάσεων με τη χρήση ρομποτικών συστημάτων. Ένα παραδείγματα χρήσης της είναι το εξής :

- οι G. Michael et al. ανέπτυξαν έναν υψηλής ποιότητας προσομοιωτή νευροχειρουργικής εκπαίδευσης VR με χρήση απτικής ανατροφοδότησης. Ως πρώτη ενότητα, αναπαρήγαγαν ένα σημαντικό μέρος της διαδικασίας εμφύτευσης κοιλιοστομίας. Η προσομοίωση εργασιών με αυτή τη μέθοδο μπορεί να οικοδομηθεί με αρθρωτό τρόπο, επιτρέποντας την αναδημιουργία πλήρων νευροχειρουργικών επεμβάσεων. (Εικόνα 6)[12]



Εικόνα 6 : The ImmersiveTouch virtual reality platform [13]

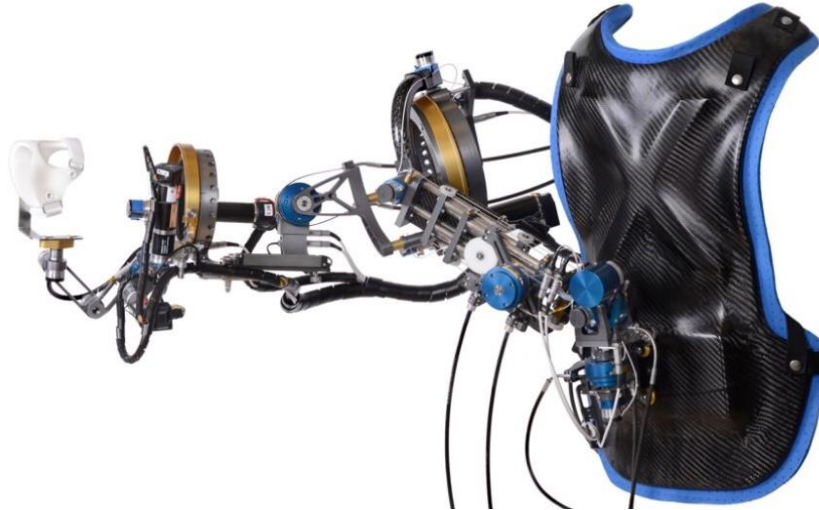
- Η δημιουργία ενός χαμηλού κόστους ρομποτικού χεριού (Εικόνα 7) για άτομα που έχουν χάσει κάποιο από τα άκρα τους. Το σκελετικό μέλος διαθέτει επίσης ένα σύστημα απτικής ανάδρασης, το οποίο προσομοιώνει τη λειτουργία των μηχανοϋποδοχέων στο δέρμα, παρέχοντας στον χρήστη την αίσθηση της αφής κατά τη χρήση της πρόθεσης.[\[14\]](#)



Εικόνα 7 : Ρομποτικό χέρι

**Διαστημικές Επιστήμες :** Η απτική τεχνολογία έχει βρει πλήθος εφαρμογών στον διαστημικό τομέα, συμβάλλοντας στην εκπαίδευση των αστροναυτών , στον χειρισμό ρομποτικών συστημάτων ,στην επισκευή δορυφόρων, στον σχεδιασμό των διαστημικών στολών και την εξερεύνηση πλανητών . Ένα παράδειγμα χρήσης είναι το εξής:

- Η συσκευή X-Arm-2 Exoskeleton (Εικόνα 8) που έχει κατασκευαστεί από την ESA ( European Space Agency) είναι μια εργονομική, πλήρως ενεργοποιούμενη απτική κύρια συσκευή για την ανάκλαση δύναμης στο δεξί χέρι των χειριστών της. Ο απτικός εξωσκελετός διαθέτει 14 αρθρώσεις που είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες θέσης των αρθρώσεων. Το X-Arm-2 χρησιμοποιείται για την έρευνά σχετικά με τις απτικές συσκευές με υπολειτουργία. [\[15\]](#)



Εικόνα 8 : X-Arm-II exoskeleton

**Ψυχαγωγία :** Η απτική τεχνολογία έχει γίνει ολοένα και πιο δημοφιλής στα video games, προσφέροντας στους παίκτες μια πιο ρεαλιστική και καθηλωτική εμπειρία. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει στους παίκτες να νιώθουν διάφορες αισθήσεις, όπως κραδασμούς, δονήσεις και υφές, μέσω του χειριστηρίου ή άλλων ειδικών συσκευών. : Ένα παραδείγματα είναι :

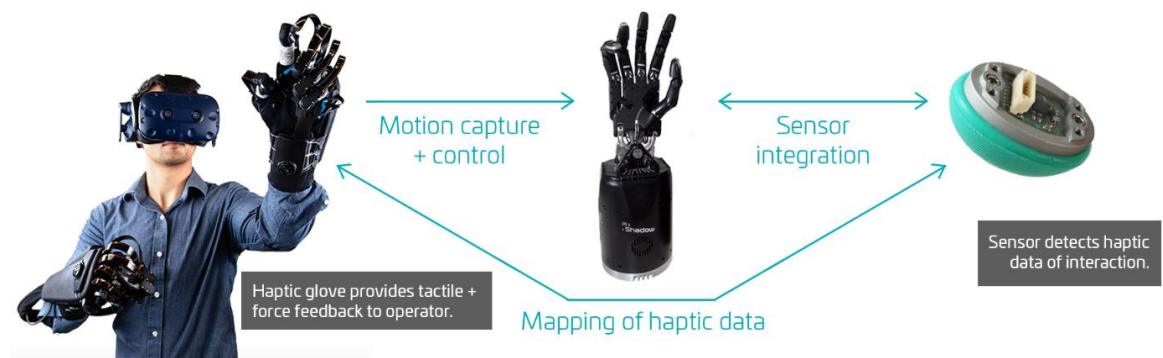
- Χειριστήριο PlayStation 5 DualSense : Στο νέο χειριστήριο της Sony για το PS5 ,έχουν αντικατασταθεί τα παλιά θορυβώδη μοτέρ με διπλούς ενεργοποιητές, που προσφέρουν ρεαλιστικές και δυναμικές δονήσεις. Ο χρήστης μπορεί να νιώσει από την σκανδάλη ενός όπλου μέχρι τη υφή του χιονιού. [\[16\]](#)



Εικόνα 9 : Χειριστήριο PS5

**Ρομποτική :** Στον τομέα της ρομποτικής η απτική τεχνολογία συνδράμει στην επικοινωνία ανθρώπου μηχανής και μας επιτρέπει να εκτελούμε πολύπλοκες ενέργειες μέσω τηλεπαρουσίας. Ένα παράδειγμα είναι:

- Η εταιρεία HaptX Inc., δημιούργησε τα HaptX Gloves G1 (Εικόνα 10) . Πρόκειται για τα πιο προηγμένα γάντια απτικής τεχνολογίας της εταιρείας, προσφέροντας στους χρήστες ρεαλιστική αίσθηση αφής σε εικονικά και φυσικά περιβάλλοντα. Τα γάντια διαθέτουν εκατοντάδες ενεργοποιητές που μετατοπίζουν φυσικά το δέρμα σας, δημιουργώντας ρεαλιστική αίσθηση αφής κατά την αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα. [17]



Εικόνα 10 : HaptX Gloves G1

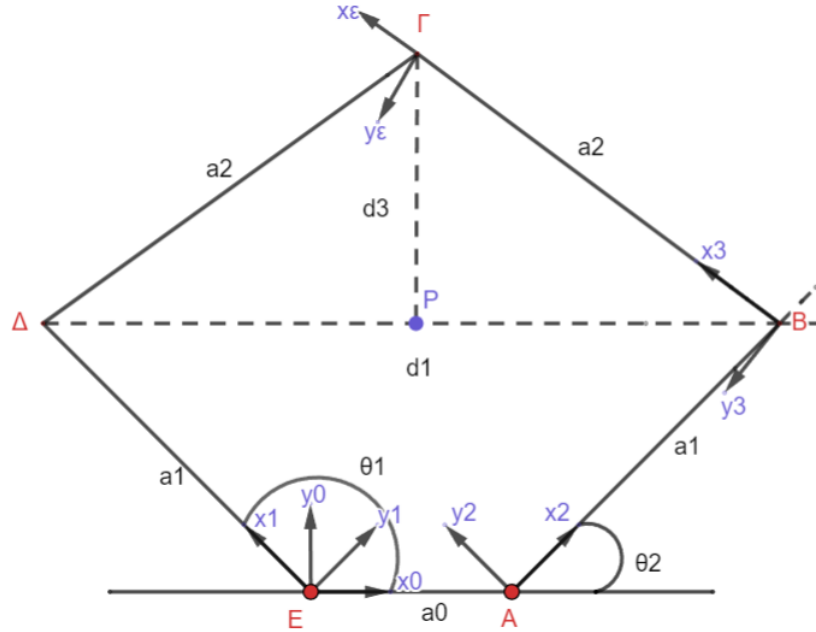
## Κεφάλαιο 2. Μαθηματικές Εξισώσεις

### 2.1 Ευθεία Κινηματική

Με την κινηματική εξετάζουμε τις κινήσεις του μηχανισμού μας, χωρίς όμως να εξετάζουμε τις δυνάμεις που τις προκαλούν. [18] [19]

#### Υπόμνημα Εικόνας 11

<b>A</b>	Κινητήρας
<b>E</b>	Κινητήρας
$\vartheta_1$	Γωνία από τον encoder του κινητήρα στο σημείο A
$\vartheta_2$	Γωνία από τον encoder του κινητήρα στο σημείο E
$a_0$	Απόσταση μεταξύ των κινητήρων
$a_1$	Μήκος Συνδέσμου
$a_2$	Μήκος Συνδέσμου
$d_1$	Απόσταση μεταξύ των σημείων B - Δ
$d_2$	Το μισό του $d_1$
$d_3$	Απόσταση μεταξύ των σημείων P - Γ
$x_B$	Η θέση του σημείου B στον άξονα x'x
$y_B$	Η θέση του σημείου B στον άξονα y'y
$x_\Delta$	Η θέση του σημείου Δ στον άξονα x'x
$y_\Delta$	Η θέση του σημείου Δ στον άξονα y'y
$x_P$	Η θέση του σημείου P στον άξονα x'x
$y_P$	Η θέση του σημείου P στον άξονα y'y
$x_\Gamma$	Η θέση του σημείου Γ στον άξονα x'x
$y_\Gamma$	Η θέση του σημείου Γ στον άξονα y'y



Εικόνα 11 : Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού

Γενικότερα το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της θέσης του σημείου Γ (Εικόνα 11). Αυτό θα γίνει με τη χρήση της τριγωνομετρίας. Σύμφωνα με το σχήμα 1, οι γωνίες  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$  θα δίνονται κάθε φορά από τους encoders των κινητήρων. Έπειτα θα γίνουν οι παρακάτω υπολογισμοί για να καταλήξουμε στο ζητούμενο.

- (1)  $x_B = a_1 \cdot \cos \vartheta_2 + a_0$
- (2)  $y_B = a_1 \cdot \sin \vartheta_2$
- (3)  $x_\Delta = a_1 \cdot \cos \vartheta_1$
- (4)  $y_\Delta = a_1 \cdot \sin \vartheta_1$
- (5)  $d_1((x_B, y_B), (x_\Delta, y_\Delta)) = \sqrt{(x_B - x_\Delta)^2 + (y_B - y_\Delta)^2}$
- (6)  $d_2 = \frac{d_1}{2}$
- (7)  $x_P = x_B + \frac{d_2}{d_1} \cdot (x_\Delta - x_B)$
- (8)  $y_P = y_B - \frac{d_2}{d_1} \cdot (y_\Delta - y_B)$
- (9)  $d_3 = \sqrt{a_2^2 - d_2^2}$



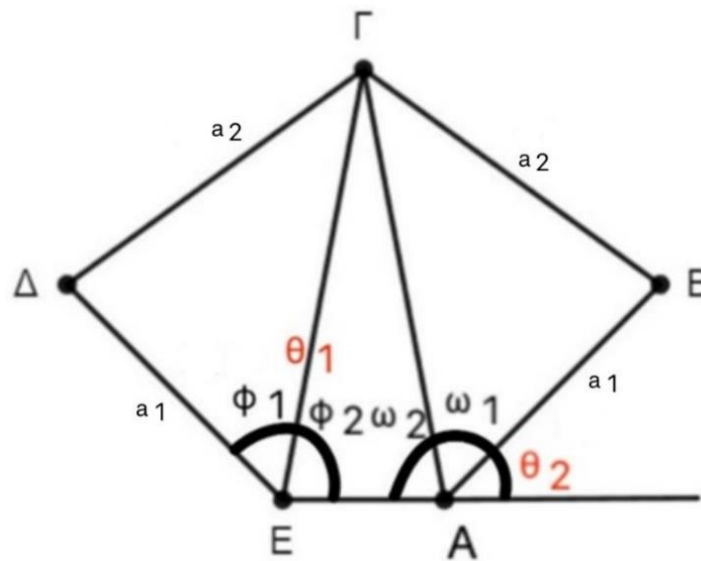
Έτσι καταλήγουμε στις εξής δύο συντεταγμένες για το σημείο Γ:

$$(10) \text{ Στον άξονα } x: x_{\Gamma} = x_P + \frac{d_3}{d_1} \cdot (y_{\Delta} - y_B)$$

$$(11) \text{ Στον άξονα } y: y_{\Gamma} = y_P - \frac{d_3}{d_1} \cdot (x_{\Delta} - x_B)$$

## 2.2 Αντίστροφη Κινηματική

Με την αντίστροφη κινηματική μπορούμε να υπολογίσουμε τις γωνίες  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$  των αρθρώσεων δεδομένης της θέσης του σημείου Γ, αυτό γίνεται κάνοντας χρήση του κανόνα των συνημιτόνων και τη βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων:



Εικόνα 12 : Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού χωρισμένου σε τρία τρίγωνα

$$(12) \vartheta_1 = \varphi_1 + \varphi_2$$

$$(13) \vartheta_2 = 180 - \omega_1 - \omega_2$$

$$(14) A\Gamma = d_4 = \sqrt{(x_{\Gamma} - x_A)^2 + (y_{\Gamma} - y_A)^2}$$

$$(15) E\Gamma = d_5 = \sqrt{(x_{\Gamma})^2 + (y_{\Gamma})^2}, E(0,0)$$

$$(16) \omega_1 = \cos^{-1}\left(\frac{d_4^2}{2 \cdot a_2 \cdot d_4}\right)$$

$$(17) \omega_2 = \cos^{-1}\left(\frac{a_0^2 + d_4^2 - d_5^2}{2 \cdot a_0 \cdot d_4}\right)$$

$$(18) \varphi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{a_0^2 - d_4^2 + d_5^2}{2 \cdot a_0 \cdot d_5}\right)$$

$$(19) E\Delta = d_6 = \sqrt{(x_{\Delta})^2 + (y_{\Delta})^2}, E(0,0)$$

$$(20) \Delta\Gamma = d_7 = \sqrt{(x_{\Gamma} - x_{\Delta})^2 + (y_{\Gamma} - y_{\Delta})^2}$$

$$(21) \varphi_1 = \cos^{-1}\left(\frac{d_6^2 + d_5^2 - d_7^2}{2 \cdot d_6 \cdot d_5}\right)$$

### 2.3 Ιακωβιανή

Η ιακωβιανή είναι ένας πίνακας που συσχετίζει την ταχύτητα του ΤΣΔ με την ταχύτητα των αρθρώσεων. Διαφορίζοντας τις σχέσεις της Ευθείας κινηματικής έχουμε:

$$(22) \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_\Gamma}{\partial \vartheta_2} & \frac{\partial x_\Gamma}{\partial \vartheta_1} \\ \frac{\partial y_\Gamma}{\partial \vartheta_2} & \frac{\partial y_\Gamma}{\partial \vartheta_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial_1 x_\Gamma & \partial_1 y_\Gamma \\ \partial_2 x_\Gamma & \partial_2 y_\Gamma \end{bmatrix}$$

(23) Μερική παράγωγος των (1),(2):

$$\partial_2 x_B = -a_1 \cdot \sin \vartheta_2, \quad \partial_2 y_B = a_1 \cdot \cos \vartheta_2$$

(24) Μερική παράγωγος των (3),(4):

$$\partial_1 x_A = -a_1 \cdot \sin \vartheta_1, \quad \partial_1 y_A = a_1 \cdot \cos \vartheta_1$$

$$\partial_1 x_B = \partial_1 y_B = \partial_2 x_A = \partial_2 y_A = 0$$

(25) Μερική παράγωγος της (5) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 d_1 = \frac{(x_A - x_B) \cdot (\partial_2 x_A - \partial_2 x_B) + (y_A - y_B) \cdot (\partial_2 y_A - \partial_2 y_B)}{d_1}$$

(26) Μερική παράγωγος της (6) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 d_2 = \frac{\partial_2 d_1}{2}$$

(27) Μερική παράγωγος της (9) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 d_3 = \frac{-d_2 \cdot \partial_2 d_2}{d_3}$$

(28) Μερική παράγωγος της (7) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 x_P = \partial_2 x_B + \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot \sin \vartheta_2$$

(29) Μερική παράγωγος της (8) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 y_P = \partial_2 y_B - \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot \cos \vartheta_2$$

(30) Μερική παράγωγος της (10) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 x_\Gamma = \partial_2 x_P + \partial_2 d_3 \left( \frac{1}{d_1 \cdot (y_A - y_B)} \right) + d_3 \left( -\frac{1}{d_1^2 \cdot (y_A - y_B)^2} \right) \cdot (\partial_2 d_1 \cdot (y_A - y_B) - d_1 a_1 \cos \vartheta_2)$$

(31) Μερική παράγωγος της (11) ως προς  $\vartheta_2$  :

$$\partial_2 y_\Gamma = \partial_2 y_P - \partial_2 d_3 \left( \frac{1}{d_1 \cdot (x_A - x_B)} \right) + d_3 \left( -\frac{1}{d_1^2 \cdot (x_A - x_B)^2} \right) \cdot (\partial_2 d_1 \cdot (x_A - x_B) + d_1 a_1 \sin \vartheta_2)$$

(32) Μερική παράγωγος της (5) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 d_1 = \frac{(x_A - x_B) \cdot (\partial_1 x_A - \partial_1 x_B) + (y_A - y_B) \cdot (\partial_1 y_A - \partial_1 y_B)}{d_1}$$



(33) Μερική παράγωγος της (6) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 d_2 = \frac{\partial_1 d_1}{2}$$

(34) Μερική παράγωγος της (9) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 d_3 = \frac{-d_2 \cdot \partial_1 d_2}{d_3}$$

(35) Μερική παράγωγος της (7) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 x_P = \partial_1 x_B - \frac{1}{2} a_1 \cdot \sin \vartheta_1$$

(36) Μερική παράγωγος της (8) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 y_P = \partial_1 y_B + \frac{1}{2} a_1 \cdot \cos \vartheta_1$$

(37) Μερική παράγωγος της (10) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 x_G = \partial_1 x_P + \partial_1 d_3 \left( \frac{1}{d_1 \cdot (y_A - y_B)} \right) + d_3 \left( -\frac{1}{d_1^2 \cdot (y_A - y_B)^2} \right) \cdot (\partial_1 d_1 \cdot (y_A - y_B) + d_1 a_1 \cos \vartheta_1)$$

(38) Μερική παράγωγος της (11) ως προς  $\vartheta_1$  :

$$\partial_1 y_G = \partial_1 y_P - \partial_1 d_3 \left( \frac{1}{d_1 \cdot (y_A - y_B)} \right) + d_3 \left( -\frac{1}{d_1^2 \cdot (y_A - y_B)^2} \right) \cdot (\partial_1 d_1 \cdot (y_A - y_B) - d_1 a_1 \sin \vartheta_1)$$

## 2.4 Στατική

Από την Ιακωβιανή προκύπτει:

$$\tau = J^T \cdot f \Rightarrow$$

$$(39) \quad \tau = \begin{bmatrix} \partial_1 x_G & \partial_1 y_G \\ \partial_2 x_G & \partial_2 y_G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}$$

Με την βοήθεια του ανάστροφου πίνακα της Ιακωβιανής μπορούμε να υπολογίσουμε τις επιμέρους ροπές  $\tau_1$  και  $\tau_2$  αντίστοιχα για τον καθένα από τους 2 κινητήρες στην βάση του μηχανισμού μας. Όπου  $f_{x_G}$  και  $f_{y_G}$  είναι οι δυνάμεις που ασκούνται για τον κάθε άξονα. Έτσι έχουμε:

$$(40) \quad \tau_1 = \partial_1 x_G \cdot f_{x_G} + \partial_1 y_G \cdot f_{y_G}$$

$$(41) \quad \tau_2 = \partial_2 x_G \cdot f_{x_G} + \partial_2 y_G \cdot f_{y_G}$$

## Κεφάλαιο 3. Υλικό που χρησιμοποιήθηκε

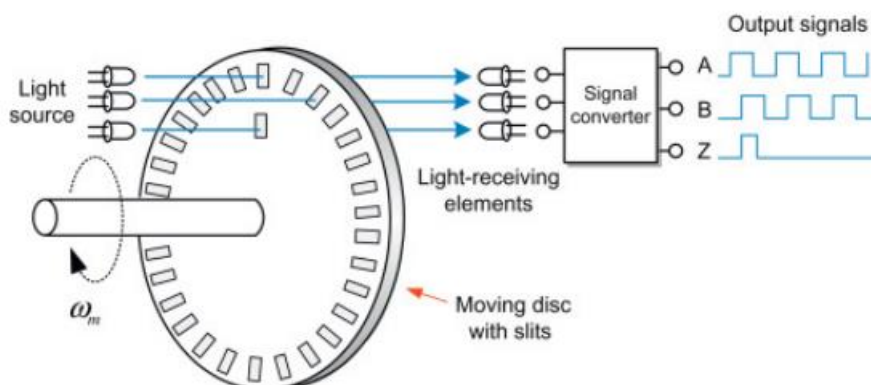
Στο βασικό υλικό του μηχανισμού δεν έγινε κάποια αλλαγή ,οπότε παρέμεινε το ίδιο.

### 3.1 Κινητήρες

Χρησιμοποιήσαμε δύο DC κινητήρες με κβαντικούς αισθητήρες αναφοράς (quadrature encoders) αυτού του τύπου .Ένας αυξητικός περιστροφικός αισθητήρας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση και την κατεύθυνση περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Αποτελείται από έναν δίσκο με υποδοχές και αισθητήρες (συνήθως οπτικούς ή μαγνητικούς). Καθώς ο άξονας του κινητήρα περιστρέφεται, ο αισθητήρας παράγει παλμούς. Οι δύο έξοδοι (Α και Β) έχουν φάση μεταξύ τους 90 βαθμούς, δημιουργώντας σήματα κβαντικής φάσης. Χρησιμοποιεί την ανατροφοδότηση του αισθητήρα για να προσαρμόσει την εφαρμοζόμενη τάση ή ρεύματος στον κινητήρα, επιτρέποντας ακριβή έλεγχο της θέσης και της ταχύτητας.[20]

#### 3.1.1 Rotary encoders

Rotary encoder ονομάζεται μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μετατρέπει την γωνιακή θέση και την κίνηση ενός άξονα σε αναλογικό ή ψηφιακό σήμα εξόδου (Εικόνα 13). Αυτές η συσκευές μας δίνουν την δυνατότητα να προσδιορίσουμε τρία συγκεκριμένα πράγματα σχετικά με έναν άξονα, την γωνιακή του θέση, την ταχύτητα περιστροφής και την κατεύθυνση-φορά περιστροφής. Μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, σε απόλυτους και αυξητικούς. Στους απόλυτους η τρέχουσα θέση είναι γνωστή από την στιγμή που εφαρμόζουμε τάση στα άκρα τους, αυτή η κατηγορία είναι και η πιο δαπανηρή στην κατασκευή. Οι αυξητικοί είναι και οι πιο συνηθισμένοι, αυτοί βρίσκονται πάντα σε μια από τέσσερις δυνατές καταστάσεις και απαιτούν ρύθμιση της αρχικής τους θέσης. [21] Οι encoders αυτού του τύπου έχουν συνήθως τρία σήματα εξόδου το Α το Β και το Ζ, το Α έχει η παλμούς ανά περιστροφή, το Β έχει τους ίδιους αλλά με διαφορά φάσης 90 μοιρών από το Α και το Ζ έχει έναν παλμό ανά πλήρη περιστροφή. Συγκρίνοντας το Α με το Β πέρα από την γωνιακή θέση μπορούμε να υπολογίσουμε και την φορά.



Εικόνα 13 : Σχηματική απεικόνιση rotary encoder [22]

### 3.1.2 Ametek Pittman GM8212D142

Πρόκειται για ηλεκτροκινητήρες των 12Volt και 2Ampere. Οι encoders παρέχουν 1024 παλμούς ανά περιστροφή. Επίσης διαθέτουν σχέση μετάδοσης μέσω γραναζώματος 19.5 επομένως οι συνολικοί παλμοί των encoders ανά περιστροφή στον τελικό άξονα περιστροφής είναι 19968. Έχουν σταθερά ροπής  $K_T = 0.0137 \text{ Nm/A}$  και σταθερά τάσης  $K_E = 1.43 \text{ V/krpm}$ . (Εικόνα 14)



Εικόνα 14 : Ametek Pittman GM8212D142

Motor Assembly Data for: DC030A-1 ( 1.43 V/krpm)			
Voltage Constant	$K_E$	0.0137	V/rad/s
		1.43	V/krpm
Torque Constant	$K_T$	0.0137	Nm/A
		1.93	oz-in/A
Rated Voltage	$V_r$	12	VDC
Rated Torque <sup>1,3</sup>	$T_r$	0.07	Nm
		10.6	oz-in
Rated Speed <sup>1,3</sup>	$\omega_r$	263	rpm
Rated Current <sup>1,3</sup>	$I_r$	0.80	A
Rated Power <sup>1,3</sup>	$P_r$	2	W
No-Load Speed <sup>2</sup>	$\omega_{nl}$	369	rpm
No-Load Current <sup>2</sup>	$I_{nl}$	0.35	A
Resistance (L-L)	$R_{mt}$	4.38	Ohms
Inductance (L-L)	$L$	2.15	mH
Rotor Inertia	$J_r$	9.2E-07	kg-m <sup>2</sup>
		0.00013	oz-in-sec <sup>2</sup>
Max Winding Temp	$\theta_{max}$	155	°C
Hall Sensor Spacing		TBD (60 or 120)	°Elec
Poles		2	
Winding Configuration		N/A	
Direction of Rotation		Elec. Rev.	lead end
Weight	$w_m$	260	g
		9	oz

Gearbox Data for: G35A (19.5:1)		
Rated Torque	0.7	Nm
	100	oz-in
Gear Ratio	19.5	
Efficiency	0.73	

Encoder Data for: E30A (1024 CPR)		
Rated Voltage	5	VDC
Resolution	1024	CPR
Output Channels	2-Ch Quadrature	
Output Type	TBD (Single Ended or Differential Line Driver)	

Brake Data for: None		
Rated Voltage	N/A	VDC
Rated Torque	N/A	Nm
	N/A	oz-in

<b>AMETEK</b>	<b>PITTMAN</b>
MOTOR ELECTRICAL AND PERFORMANCE OUTLINE	
GM8212D142	

<sup>1</sup> Recorded at maximum winding temperature at 25 deg C ambient and without heat sink.

<sup>2</sup> Recorded at Rated Voltage.

<sup>3</sup> Based on thermal limitations of motor only. See Maximum Speed and Gearbox Rated Torque if applicable for possible additional limitations.

Εικόνα 15: Εγχειρίδιο κατασκευαστή κινητήρα

### 3.2 Κάρτες σημάτων

Οι κάρτες σήματος είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την είσοδο και έξοδο αναλογικών και ψηφιακών σημάτων από και προς υπολογιστές. Αυτού του είδους οι κάρτες συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν την περιγραφή, τη μέτρηση ή τον έλεγχο σημάτων σε πραγματικό χρόνο. Οι κάρτες I/O συνήθως παρέχουν λογισμικό (π.χ., προγραμματιστικά περιβάλλοντα) που επιτρέπει την εύκολη επικοινωνία και έλεγχο των σημάτων.

#### 3.2.1 National Instruments USB-6003

Είναι μια κάρτα (Εικόνα 16 ) σημάτων 8 αναλογικών εισόδων(16-Bit 100000 Δειγμάτων/δευτερόλεπτο), 2 αναλογικών εξόδων (5000 δειγμάτων/δευτερόλεπτο) και 13 ψηφιακών εισόδων/εξόδων. Είναι μια συσκευή συλλογής δεδομένων χαμηλού κόστους που παρέχει βασικές λειτουργίες για εφαρμογές και υλικό. Διαθέτει αναλογικές εισόδους και εξόδους αλλά και ψηφιακές, επίσης έναν μετρητή 32-bit. Είναι μια κατάλληλη συσκευή για ακαδημαϊκούς σκοπούς.



Εικόνα 16: NI USB-6003

#### 3.2.2 National Instruments USB-6210

Είναι μια κάρτα σημάτων (Εικόνα 17) 16 αναλογικών εισόδων(16-Bit 250000 Δειγμάτων/δευτερόλεπτο), 4 ψηφιακών εισόδων, 4 ψηφιακών εξόδων. Διαθέτει αναλογικές εισόδους και εξόδους αλλά και ψηφιακές, επίσης δύο μετρητές 32-bit. Διαθέτει έναν ενσωματωμένο ενισχυτή για γρήγορη συλλογή και αποστολή δεδομένων. Είναι μια κατάλληλη συσκευή για δοκιμή, έλεγχο και σχεδιασμό εφαρμογών για βιομηχανικούς και ακαδημαϊκούς σκοπούς.



Εικόνα 17 : NI USB-6210 [23]

### 3.3 Οδηγοί κινητήρων

Οι οδηγοί κινητήρων ελέγχουν το ρεύμα που τροφοδοτεί τον κινητήρα, ρυθμίζοντας έτσι την ταχύτητα και την ισχύ του. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις διαθέτουν αισθητήρες, οι οποίοι εκτελούν λειτουργίες όπως να διαβάζουν αισθητήρες θέσης, περιλαμβάνουν κυκλώματα προστασίας για να αποτρέψουν την υπερθέρμανση του κινητήρα και τον προστατεύουν από υπερβολικές τάσεις. Οι περισσότεροι οδηγοί κάνουν έλεγχο στροφών (rpm control), αυτοί συνήθως είναι και οι φθηνότεροι, στην ουσία καθορίζουν τον επιτρεπόμενο αριθμό στροφών ανά λεπτό που μπορεί να κάνει ο άξονας του κινητήρα. Οι οδηγοί κινητήρων είναι κρίσιμοι για την απόδοση και την αξιοπιστία των κινητήρων σε πολλές εφαρμογές.

#### 3.3.1 Escon Module 50/5

Είναι ένας οδηγός κινητήρων μικρού μεγέθους με μεγάλη απόδοση (Εικόνα 18). Έχει την δυνατότητα να καθορίζει τη σωστή λειτουργία κινητήρων τύπου brushed DC , brushless EC ισχύος μέχρι 250Watt. Οι χαρακτηριστικοί τρόποι λειτουργίας είναι έλεγχος ταχύτητας (κλειστού βρόγχου), έλεγχος ταχύτητας (ανοικτού βρόγχου) και έλεγχος ροπής. Διαθέτει εκτεταμένη αναλογική και ψηφιακή λειτουργικότητα εισόδου / εξόδου, έτσι ώστε να μπορεί να πληροί και τις υψηλότερες απαιτήσεις. Η συσκευή έχει σχεδιαστεί ώστε να προγραμματίζεται μέσω διεπαφής USB χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον του υπολογιστή και το Escon Studio.



Εικόνα 18 : Escon module 5/50

### 3.4 Υπόλοιπα υλικά

- Βίδα 4 χιλιοστών (Εικόνα 19 )



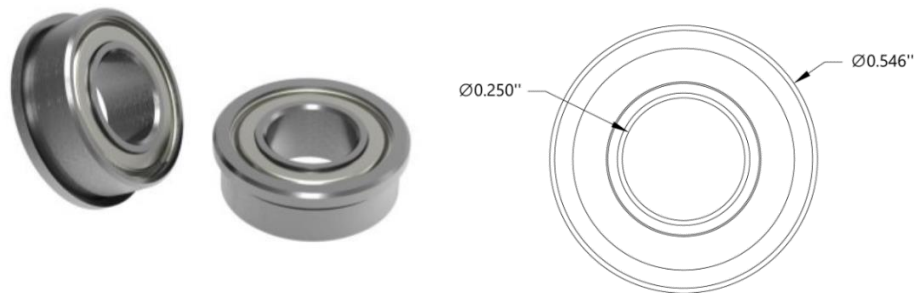
Εικόνα 19

- Βίδα 3 χιλιοστών (Εικόνα 20 )



Εικόνα 20

- Ρουλεμάν ( Εικόνα 21)



Εικόνα 21

- Coupler 4 – 8 χιλιοστών (Εικόνα 22)



Εικόνα 22

- Dremel 3000 (Εικόνα 23)



Εικόνα 23

- Τροφοδοτικό EL302RD Dual Power Supply (Εικόνα 24)



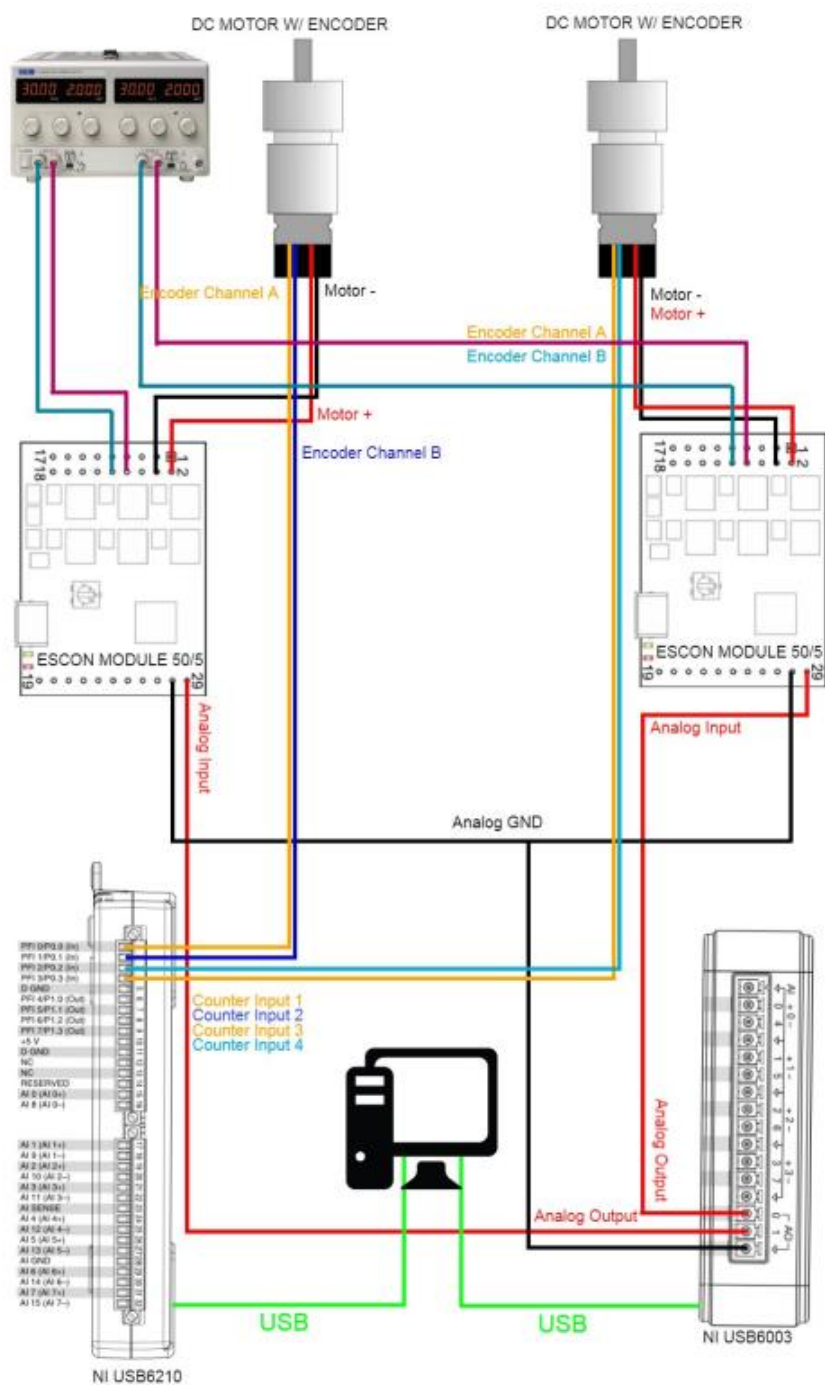
Εικόνα 24

- Plexiglass 30 \* 30 cm

## Κεφάλαιο 4. Σύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέσαμε τα εξαρτήματα βασίζεται στην δημιουργία ενός συστήματος ελέγχου ανατροφοδότησης. Δηλαδή οι κινητήρες ενημερώνουν την κάρτα σημάτων NI USB6210 για την θέση τους, αυτήν με την σειρά ενημερώνει τον υπολογιστή μας, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα, δίνει την κατάλληλη απεικόνιση στο εικονικό περιβάλλον, μετά επικοινωνεί με την κάρτα σημάτων NI USB6003, ώστε αυτή να δώσει τα κατάλληλα σήματα στους οδηγούς και αυτοί θα κινήσουν τους κινητήρες κατάλληλα. Ουσιαστικά έχουμε έναν κλειστό βρόγχο επικοινωνίας μεταξύ των συγκεκριμένων εξαρτημάτων, πρόκειται για μια διαδικασία που μόνιμα επαναλαμβάνεται έτσι ώστε να γίνεται ο έλεγχος της κατάστασης κάθε μέρους. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να επιτυγχάνει και να διατηρεί αυτόματα την επιθυμητή κατάσταση εξόδου συγκρίνοντάς την με την πραγματική κατάσταση. Επομένως πρόκειται για ένα πλήρως αυτόματο σύστημα ελέγχου του οποίου η δράση εξαρτάται με κάποιο τρόπο από την έξοδο.[\[24\]](#) Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 25) απεικονίζεται η συνδεσμολογία των επιμέρους εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μηχανισμού μας. Επίσης αναγράφεται αναλυτικά το είδος της κάθε σύνδεσης.





Εικόνα 25: Διάγραμμα συνδεσμολογίας

## DC MOTOR W/ ENCODER

- Encoder Channel A είναι το κανάλι A του encoder του κινητήρα μας.
- Encoder Channel B είναι το κανάλι B του encoder του κινητήρα μας.
- Motor + είναι ο θετικός πόλος του κινητήρα.
- Motor - είναι ο αρνητικός πόλος του κινητήρα.

## ESCON MODULE 50/5

- Motor+(1,2) είναι η τροφοδοσία του θετικού πόλου του κινητήρα.
- Motor-(3,4) είναι η τροφοδοσία του αρνητικού πόλου του κινητήρα.
- Analog Input(29) είναι η είσοδος του αναλογικού σήματος. Το σήμα αυτό είναι που καθορίζει την επιτρεπτή ένταση ρεύματος που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο κινητήρας. Είναι από 0 έως 10 Volt. Κάθε 0.1 Volt αντιστοιχεί στο 1% της συνολικής έντασης του ρεύματος η οποία κυμαίνεται από 0 έως 2 Ampere.
- Analog Input GND(28) είναι η γείωση του αναλογικού σήματος.
- VCC(7,8) είναι η είσοδος της εξωτερικής τροφοδοσίας του οδηγού.
- GND(9,10) είναι η γείωση της εξωτερικής τροφοδοσίας του οδηγού.

## USB6003

- Analog Output(AO 0) είναι η πρώτη αναλογική έξοδος. Η τιμή της οποίας εξαρτάται από τον αλγόριθμό μας και είναι από 0 έως 10 Volt.
- Analog Output(AO 1) είναι η δεύτερη αναλογική έξοδος. Η τιμή της οποίας εξαρτάται από τον αλγόριθμό μας και είναι από 0 έως 10 Volt.
- Analog Output(AO GND) είναι γείωση των αναλογικών σημάτων.
- USB είναι η σύνδεση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω αυτής της σύνδεσης η κάρτα μας λαμβάνει δεδομένα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που τρέχει τον αλγόριθμο και έτσι καθορίζει την συμπεριφορά της.

## USB6210

- Counter Input 1(PFI 0) Είναι η είσοδος του πρώτου μετρητή της κάρτας. Επίσης λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδος.
- Counter Input 2(PFI 1) Είναι η είσοδος του δεύτερου μετρητή της κάρτας. Επίσης λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδος.
- Counter Input 3(PFI 2) Είναι η είσοδος του τρίτου μετρητή της κάρτας. Επίσης λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδος.
- Counter Input 4(PFI 3) Είναι η είσοδος του τέταρτου μετρητή της κάρτας. Επίσης λειτουργεί ως ψηφιακή είσοδος.
- USB είναι η σύνδεση με τον υπολογιστή. Μέσω αυτής της σύνδεσης η κάρτα μας λαμβάνει δεδομένα από τον υπολογιστή που τρέχει τον αλγόριθμο και έτσι καθορίζει την συμπεριφορά της.

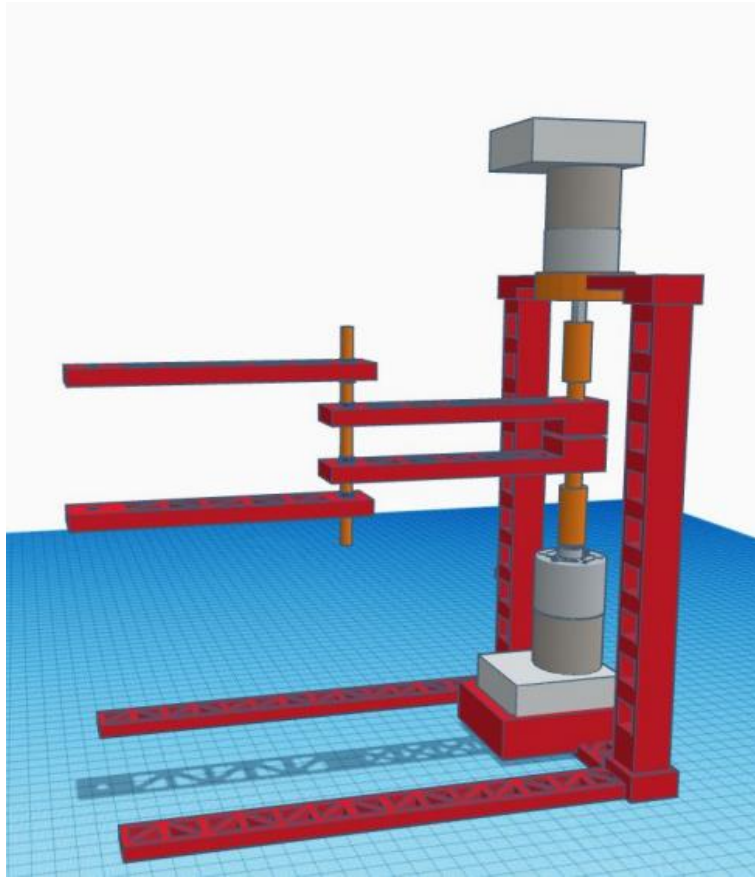
## Κεφάλαιο 5. Σχεδιασμός Βάσης Στήριξης

Στόχος για τη νέα βάση του μηχανισμού είναι να σχεδιαστεί, έτσι ώστε να μειωθεί το ύψος σε σχέση με την προηγούμενη κατασκευή αλλά και το τελικό σημείο δράσης να βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια.

Ο μηχανισμός απαιτεί μια βάση στήριξης , η οποία θα προσφέρει σταθερότητα λόγω του βάρους που έχει ,ευελιξία στην κίνηση ,ώστε να μην εμποδίζεται αυτή αλλά και τη μέγιστη δυνατή ακαμψία για τα μέρη του μηχανισμού τα οποία παραμένουν ακίνητα όσο αυτός λειτουργεί.

Η βάση στήριξης θα αποτελείται από 6 κομμάτια τα οποία έχουν τυπωθεί σε 3D εκτυπωτή και τα 3D μοντέλα έχουν σχεδιαστεί στον πρόγραμμα Tinkercad.

Το 3D μοντέλο που αντιπροσωπεύει τον προηγούμενο μηχανισμό φαίνεται στην Εικόνα 26

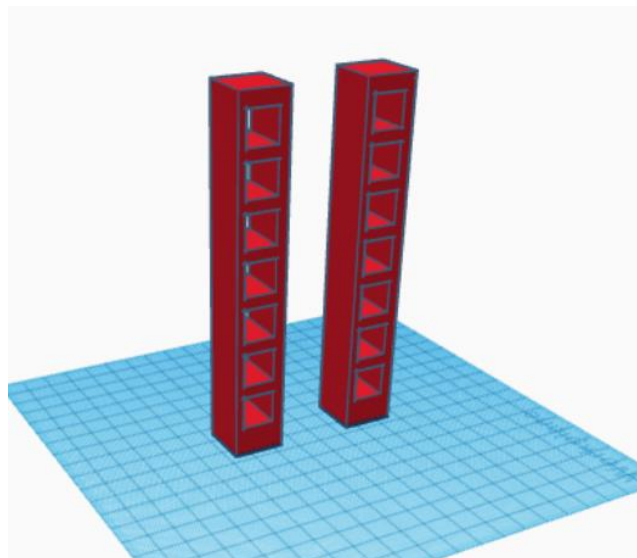


Εικόνα 26: 3D απεικόνιση προηγούμενου μηχανισμό

### 5.1 Καινούργιο σχέδιο βάσης

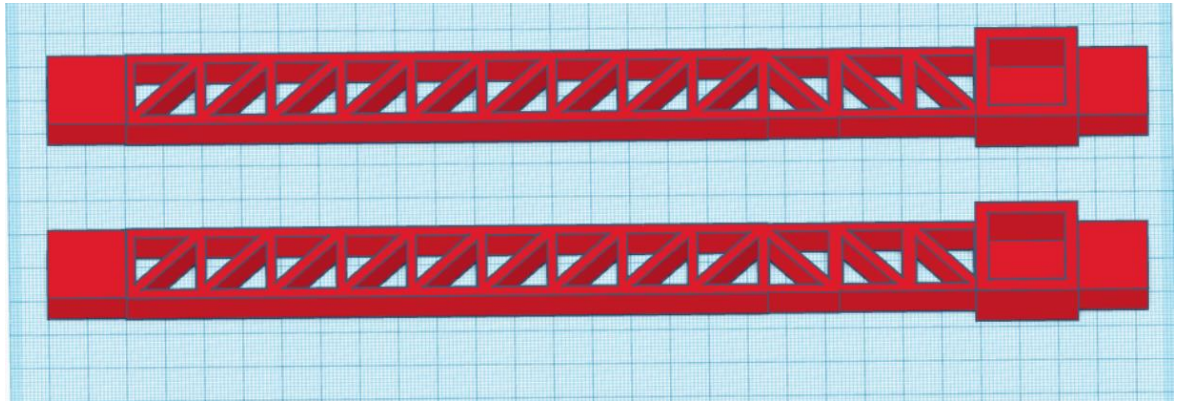
Τα κομμάτια που αποτελούν τη βάση στήριξης είναι τα εξής:

- Δύο ράβδοι που αποτελούν τα κατακόρυφα στηρίγματα του μηχανισμού με διαστάσεις 20\*20\*180mm (Εικόνα 27)



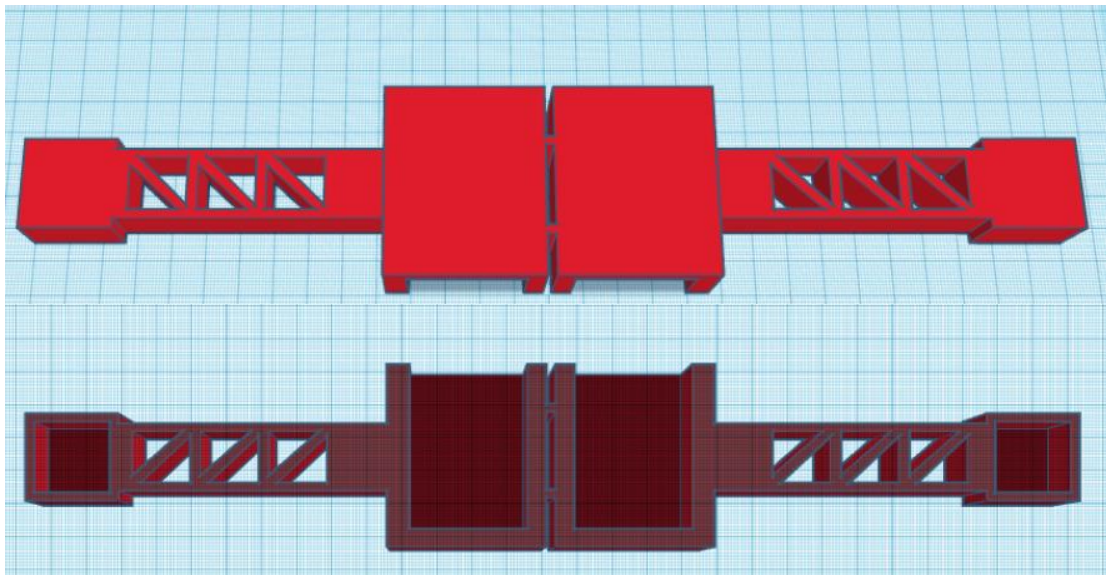
Εικόνα 27: Ράβδοι στήριξης

- Δύο κομμάτια για το οριζόντιο επίπεδο της βάσης με εσοχές για τις ράβδους και τμήματα για να βιδωθεί η βάση σε ένα κομμάτι plexiglass με διαστάσεις 283\*26\*15 mm. (Εικόνα 28)



Εικόνα 28: Οριζόντιο επίπεδο βάσης

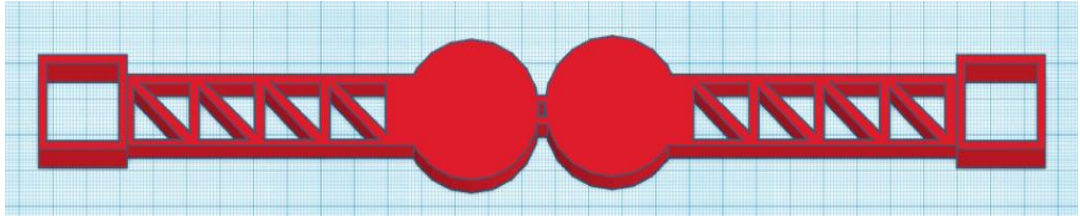
- Μία βάση και για τους δύο κινητήρες, ώστε να εφαρμόζει σε αυτή το τμήμα του κινητήρα που αποτελεί τον encoder με διαστάσεις 300\*55\*10 mm και 55\*45\*20 mm (η θέση των κινητήρων). (Εικόνα 29)



Εικόνα 29 : Τμήμα βάσης για τον encoder

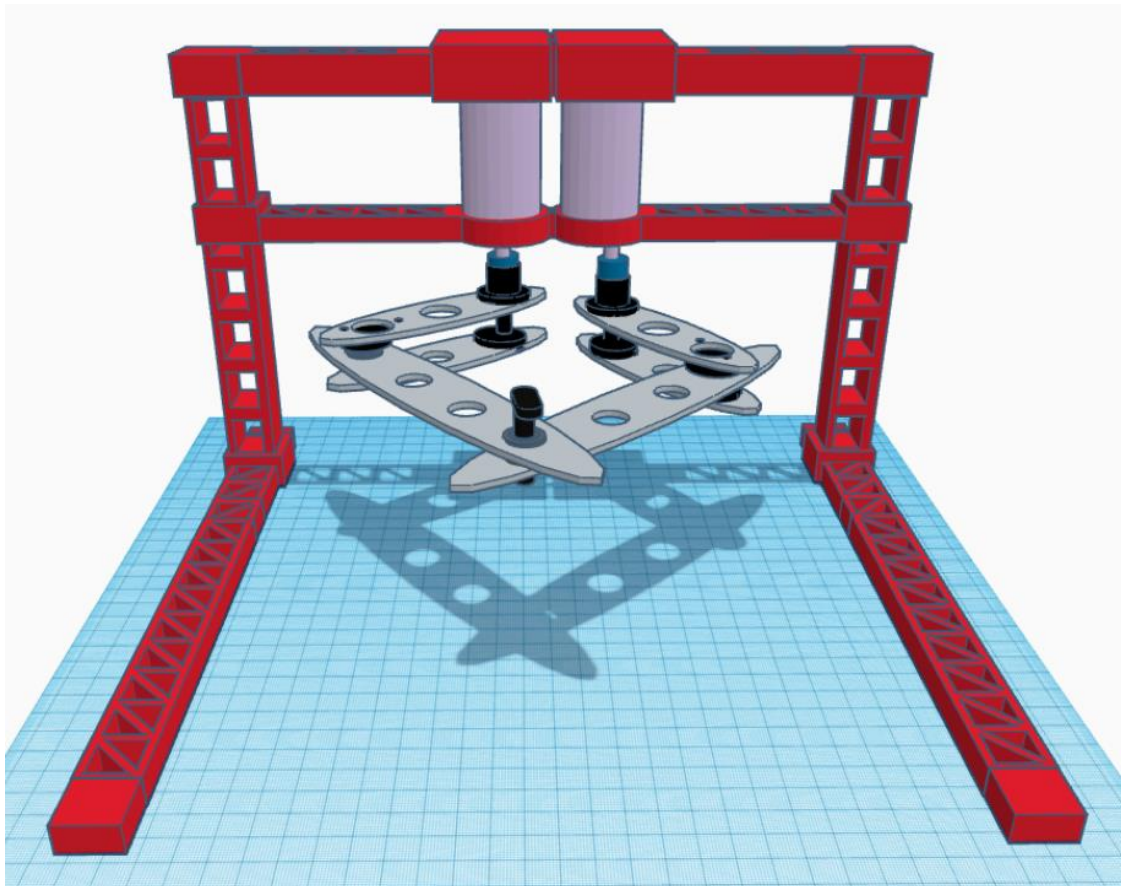


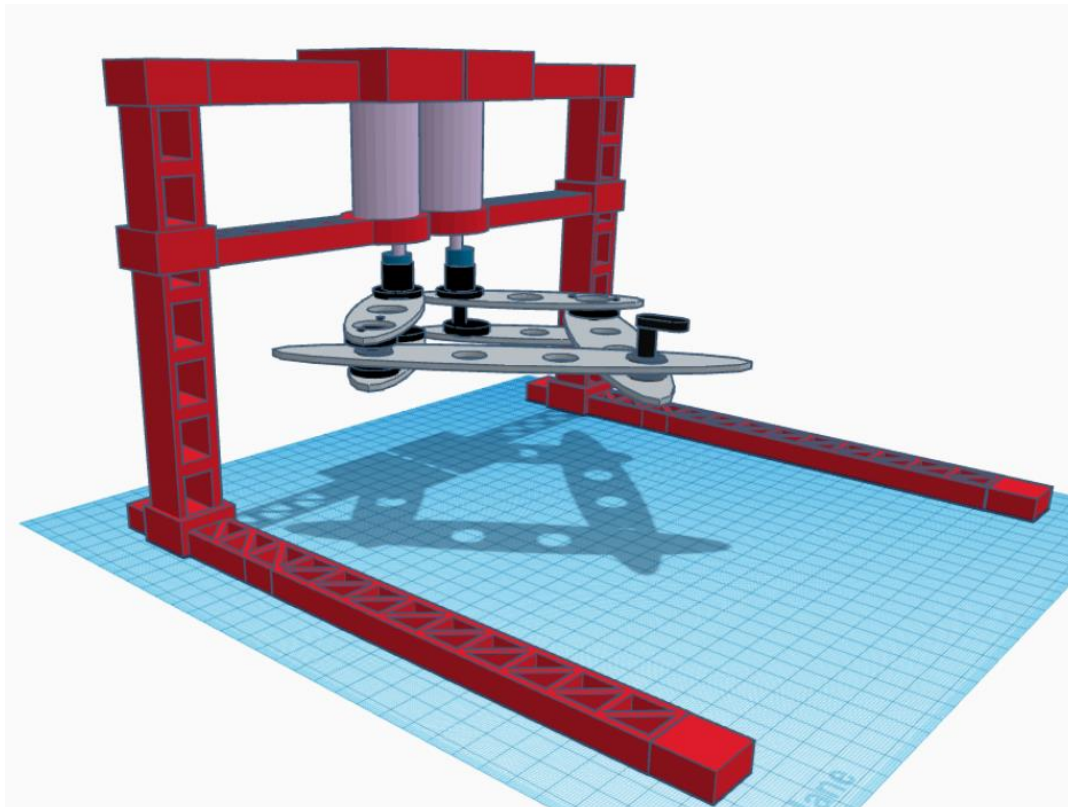
- Μία βάση και για τους δύο κινητήρες, ώστε να εφαρμόζει σε αυτή το κυλινδρικό μέρος του κινητήρα, για την καλύτερη στήριξη του μηχανισμού με διαστάσεις 300\*55\*10 mm και 40\*40\*10 mm (το κυλινδρικό μέρος). (Εικόνα 30)



Εικόνα 30: Τμήμα βάσης για το κυλινδρικό μέρος

Μετά τη συναρμολόγηση των παραπάνω κομματιών προκύπτει ο μηχανισμός στην Εικόνα 31





Εικόνα 31 : 3D απεικόνιση τελικού μηχανισμού

Τέλος αφού το σχέδιο έφτασε σε ένα ικανοποιητικό σημείο χωρίσαμε τον μηχανισμό σε τμήματα προς εκτύπωση και στην εξαγωγή του κάθε μοντέλου σε αρχείο μορφής .stl , ώστε να γίνει η εκτύπωση από τον 3D εκτυπωτή.

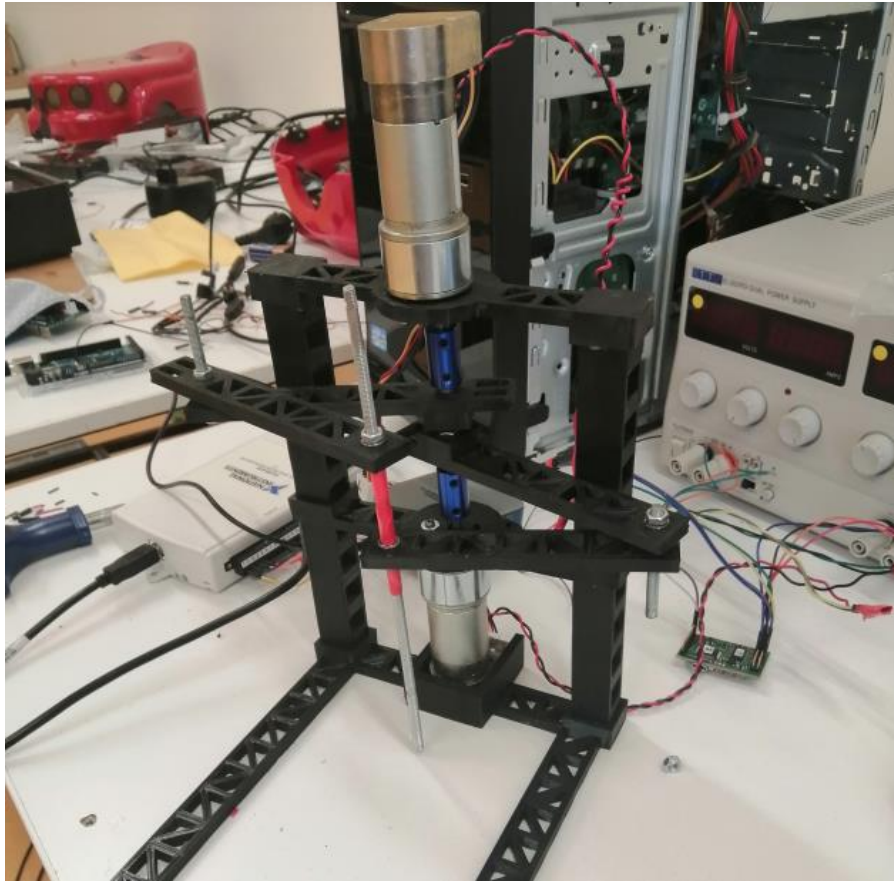
## Κεφάλαιο 6. Σχεδιασμός Συνδέσμων

### 6.1 Προβλήματα Προηγούμενου Μηχανισμού

Η ανακατασκευή του απτικού μηχανισμού έγινε έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη σταθερότητα και μικρότερες τριβές μεταξύ των εξαρτημάτων στις κινήσεις του, καθώς και η πιο αξιόπιστη και στιβαρή δομή της συνολικής κατασκευής σε σύγκριση με την υπάρχουσα.

Στην αρχική κατασκευή οι βραχίονες ήταν πλαστικοί σύνδεσμοι φτιαγμένοι με 3d εκτυπωτή. Η ένωση με το δρομέα του κινητήρα γινόταν με ένα coupler και μία βίδα και η ένωση μεταξύ των σημείων περιστροφής του βραχίονα με ντίζες και παξιμάδια.

Αυτή η προσέγγιση δημιουργούσε τριβές μεταξύ των συνδέσμων του βραχίονα κατά την περιστροφή που είχε ως αποτέλεσμα τα παξιμάδια να χαλαρώνουν ή να σφίγγουν και να δημιουργούν αποκλίσεις στη λειτουργία του μηχανισμού και τη γραφική αναπαράσταση.



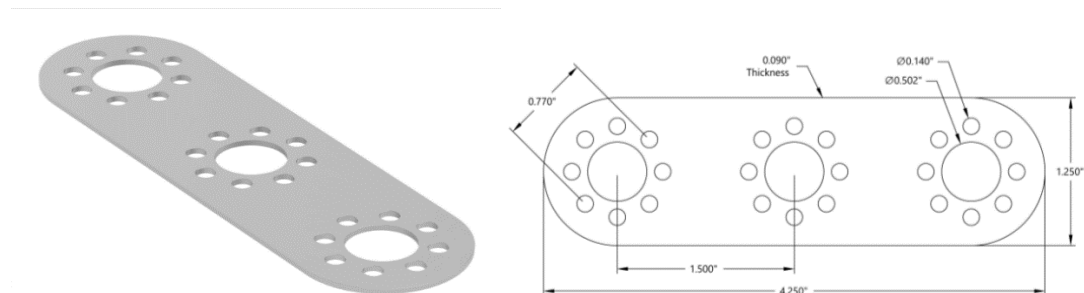
Προηγούμενος μηχανισμός

## 6.2 Προσπάθειες Υλοποίησης

Στόχος μας λοιπόν ήταν αναζητήσουμε εξαρτήματα που θα χρησιμοποιούσαμε ως συνδέσμους των βραχιόνων από υλικά πιο ανθεκτικά αλλά ταυτόχρονα χαμηλού βάρους.

Επίσης τα εξαρτήματα αυτά θέλαμε να είναι εύκολα προσαρμόσιμα σε αυτό που θέλουμε να φτιάξουμε.

Μετά από έρευνα αγοράς καταλήξαμε σε συνδέσμους Flat bracket D (Εικόνα 32 ). Τα εξάρτημα αυτά έχουν εσοχές για ρουλεμάν .

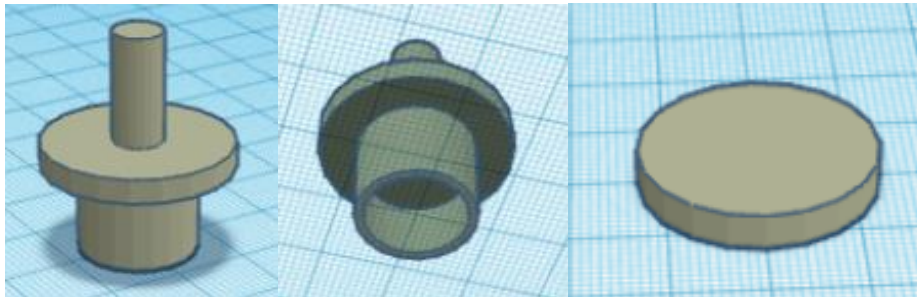


Εικόνα 32 : Flat bracket D



Αφού είχαμε τα brackets , έπρεπε να σκεφτούμε πως θα γίνει η ένωση τους με σταθερότητα και η περιστροφή των συνδέσμων χωρίς τριβή. Η αρχική ιδέα ήταν να χρησιμοποιήσουμε 4 brackets σε ίδια συνδεσμολογία με αυτή του προηγούμενου μηχανισμού. Η ένωση με τον κινητήρα έγινε πάλι με το coupler , μια μικρή βίδα για τις μικρές τρύπες του bracket και 2 παξιμάδια , ώστε να περιστρέφεται μόνο ο δρομέας του κινητήρα. Έπειτα η ένωση μεταξύ των brackets έγινε με μια εξάγωνη βίδα , μία ροδέλα, ένα ρουλεμάν για την περιστροφή και ένα παξιμάδι ασφαλείας . Γρήγορα έγινε αντιληπτό πως το αρχικό σχέδιο δεν είχε την δυνατότητα να προσφέρει έναν αξιόπιστο τρόπο σύνδεσης με τους κινητήρες αλλά και μεταξύ των συνδέσμων , διότι είχε τριβές, ελάχιστη σταθερότητα και μικρό εύρος κίνησης.

Έπειτα προχωρήσαμε σε νέο σχεδιασμό. Για να λύσουμε το πρόβλημα των τριβών στην ένωση των συνδέσμων σκεφτήκαμε να χρησιμοποιήσουμε διπλά brackets για τη σύνδεση με τους κινητήρες και μονά για το τελικό σημείο δράσης με αποτέλεσμα η ένωση στα σημεία Β και Δ (Εικόνα 33) να αποτελείται από 3 brackets . Στη συνέχεια αποφασίσαμε να εκμεταλλευτούμε τις μικρές τρύπες που υπάρχουν στα brackets και να σχεδιάσουμε βοηθητικά εξαρτήματα, τα οποία τυπώσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Για τη σύνδεση με τους κινητήρες κρατήσαμε το coupler και σχεδιάσαμε ένα εξάρτημα μέσα στο οποίο θα κουμπώνει η μεριά του coupler που δεν βιδώνει στον κινητήρα, αυτό θα βιδώνει πάνω στο bracket για να είναι σταθερό και με ένα καπάκι που θα βιδώνει στο πάνω bracket θα ενώνονται τα brackets μεταξύ τους, έτσι εξασφαλίσουμε ότι οι σύνδεσμοι μένουν σταθεροί και περιστρέφεται μόνο ο δρομέας.

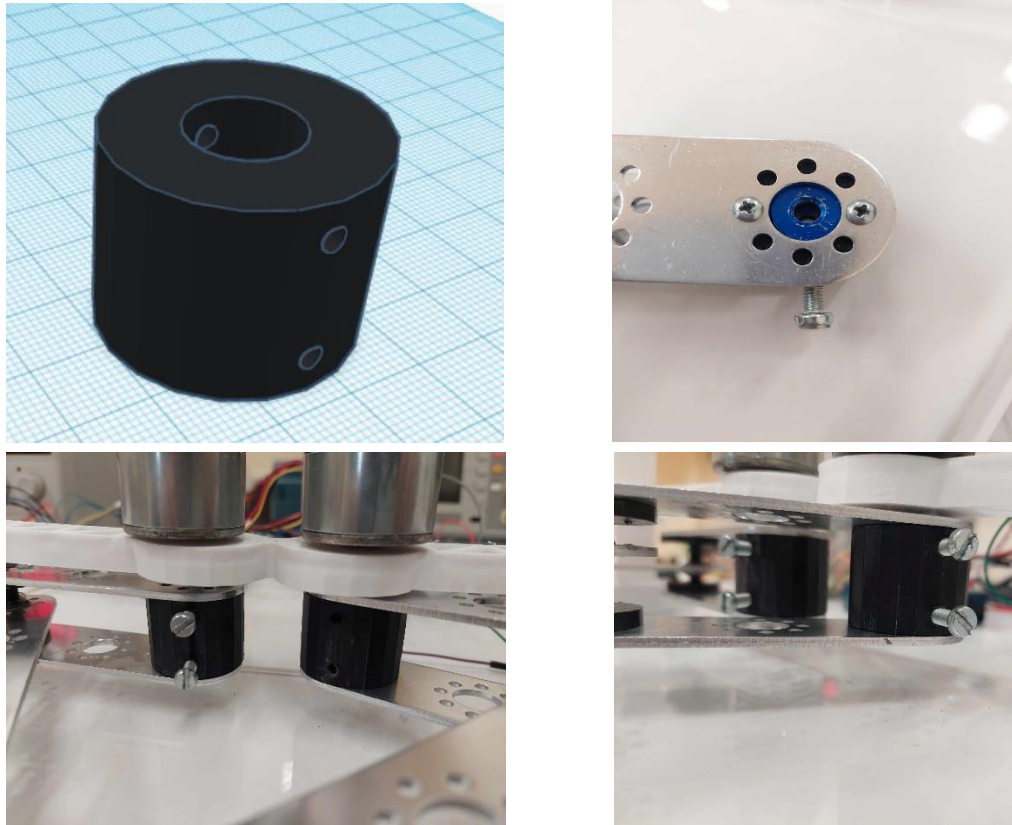


Εικόνα 33 : 3D μοντέλο



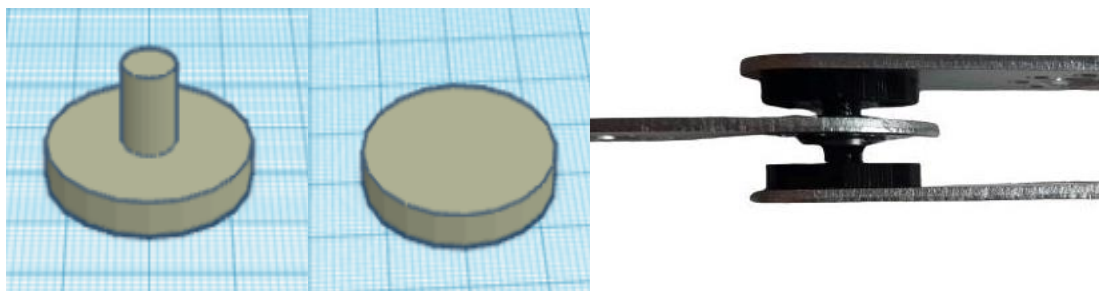
Εικόνα 34 : Εκτυπωμένο μοντέλο

Τελικά συνειδητοποιήσαμε πως και αυτός ο τρόπος δεν προσφέρει σταθερή σύνδεση μεταξύ του κινητήρα και των συνδέσμων. Για αυτόν το λόγο σχεδιάσαμε ένα νέο εξάρτημα για να το εκτυπώσουμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή (Εικόνα 35). Πρόκειται για μία προέκταση για τα υπάρχον couplers με εσοχή διαμέτρου και ύψους ίσα με το coupler και πάχος κατάλληλο για να κρατάει ενωμένα το πάνω με το κάτω bracket, ώστε να μπορεί να βιδωθεί ανάμεσα τους από τις μικρές τρύπες που έχουν. Στο εξάρτημα αυτό εφαρμόζει το coupler και με τις κατάλληλες βίδες κρατάει σταθερό τον δρομέα του κινητήρα μέσα στο coupler.



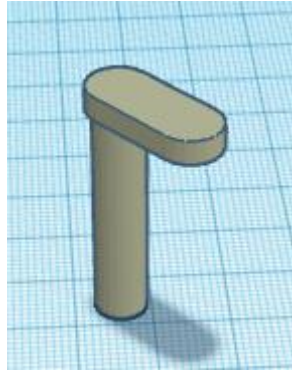
Εικόνα 35

Με παρόμοιο τρόπο έγινε και η επόμενη ένωση για το σημείο με τα 3 brackets. Στο μεσαίο bracket κολλήσαμε στην τρύπα το ρουλεμάν και έπειτα στην μέση περίπου του εξαρτήματος της Εικόνας 36. Στο εξάρτημα βιδώσαμε το κάτω bracket και τα ενώσαμε με το πάνω πάλι βιδώνοντας ένα καπάκι όπως φαίνεται στην εικόνα.



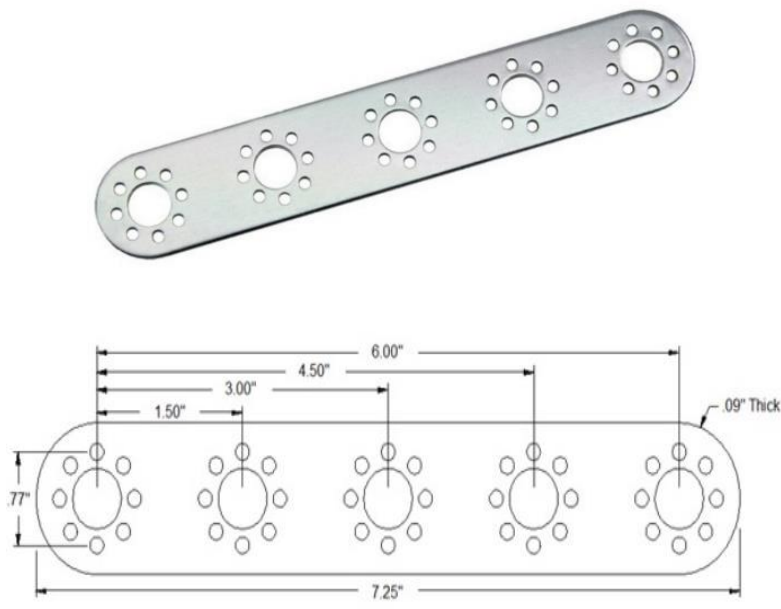
Εικόνα 37

Για για την τελική ένωση των brackets στο τελικό σημείο δράσης χρησιμοποιήσαμε 2 ρουλεμάν για το καθένα ,ώστε να εξασφαλίσουμε την περιστροφή , τα οποία κολλήσαμε μέσα στην τρύπα. Μέσα από το ρουλεμάν περάσαμε ένα εξάρτημα (Εικόνα 38 ) ,το οποίο εκτός από την ένωση των συνδέσμων ,διευκολύνει και την μετακίνηση του τελικού σημείου δράσης από το χρήστη.

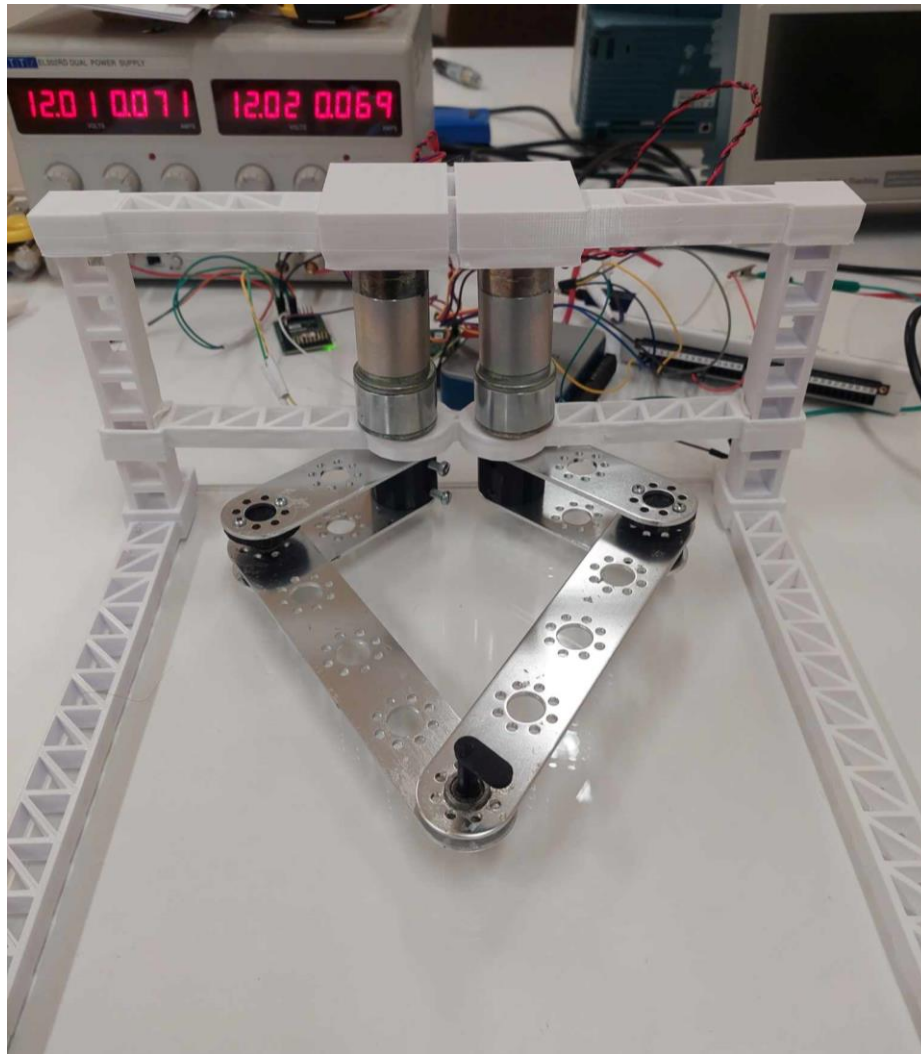


Εικόνα 38

Όσον αφορά το πρόβλημα με το περιορισμένο εύρος κίνησης του μηχανισμού, η λύση που βρήκαμε είναι τα μεγαλώσουμε του μπροστινούς συνδέσμους σε σχέση με αυτούς που είναι κουμπωμένοι στους κινητήρες. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιήθηκαν 2 flat brackets με μεγαλύτερο μήκος. Έτσι συνολικά ο μηχανισμός αποτελείται από 6 brackets.



Εικόνα 39 : Flat bracket F



Εικόνα 40 : Μηχανισμός με την παραπάνω υλοποίηση

### 6.3 Τελική Υλοποίηση

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω , αποφασίσαμε να αλλάξουμε εντελώς το design των συνδέσμων , για να αντικατασταθούν όλα τα πλαστικά κομμάτια που εκτυπώσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή με μεταλικά και αλουμινένια μέρη ,ώστε να μην υπάρχει τριβή και να γίνεται εύκολα η αποσυναρμολόγησή τους. Αρχικά, χρειάστηκε να χρησιμοποιήσουμε μόνο 4 αντί για 6 brackets, που είχε ο προηγούμενος σχεδιασμός. Έπειτα προχωρήσαμε στα 3 βασικά σημεία ενώσεων που φαίνονται στην εικόνα 41 .



Εικόνα 41 : Σημεία ενώσεων

1. Το σημείο 1 αντιπροσωπεύει το σημείο ένωσης των συνδέσμων με τον κινητήρα. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω είναι ένα σημείο, το οποίο πρέπει να είναι σταθερό πάνω στο δρομέα του κινητήρα για να περιστρέφεται μαζί με αυτόν. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήσαμε ένα screw hub (εικόνα 42) , το οποίο τοποθετείται στη μεγάλη εσωχή του bracket και βιδώνεται σε αυτό. Μέσα από την κεντρική του τρύπα περάσαμε μία βίδα που σφηνώθηκε με τη μικρή βίδα που περιέχει το εξάρτημα και με ένα coupler θα την συνδέσουμε με τον κινητήρα ,όπως έχει ήδη περιγραφεί παραπάνω.



Εικόνα 42 : screw hub

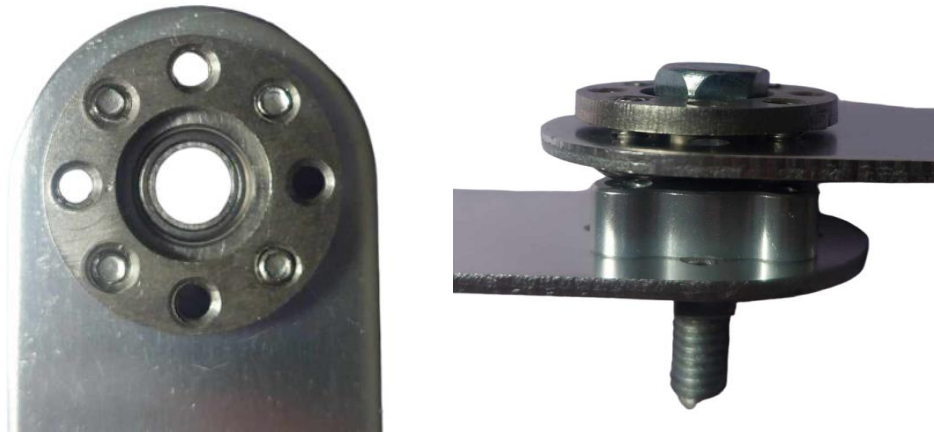
2. Το σημείο 2 είναι ένα σημείο που περιστρέφεται , επομένως χρειάστηκε να βρούμε ένα καλύτερο τρόπο για να τοποθετήσουμε το ρουλεμάν. Χρησιμοποιήσαμε το εξάρτημα της εικόνας 43 , το οποίο είναι κατάλληλο για τα brackets και βιδώνει πάνω τους για να κρατάει σταθερό το ρουλεμάν μέσα στο bracket. Για την σύνδεση μεταξύ των δύο brackets χρησιμοποιήσαμε πάλι το screw hub, το βιδώσαμε στο ένα από τα δύο brackets για κρατάει σταθερή τη βίδα της ένωσης. Πρόκειται για μία εξάγωνη βίδα που έχει διάμετρο ίδια με το ρουλεμάν και το screw hub , την



οποία σταθεροποιήσαμε με ένα παξιμάδι και τρία λαστιχάκια στα σημεία των ενώσεων για να μην υπάρχει επαφή μεταξύ των εξαρτημάτων και δημιουργούνται τριβές.

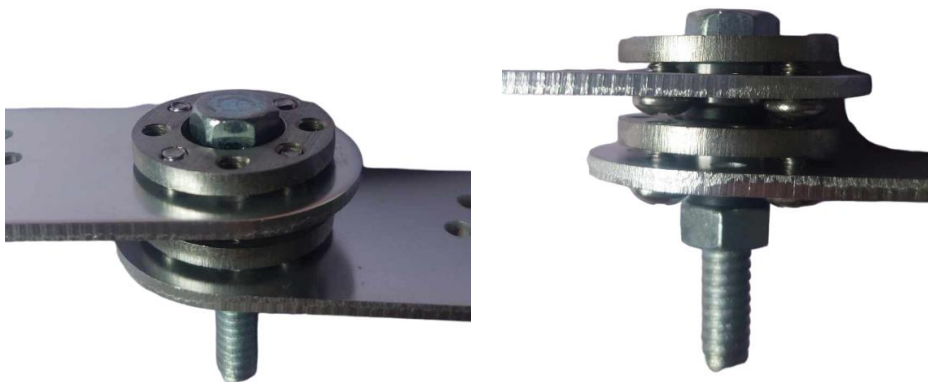


Εικόνα 43 : Round Screw Plate



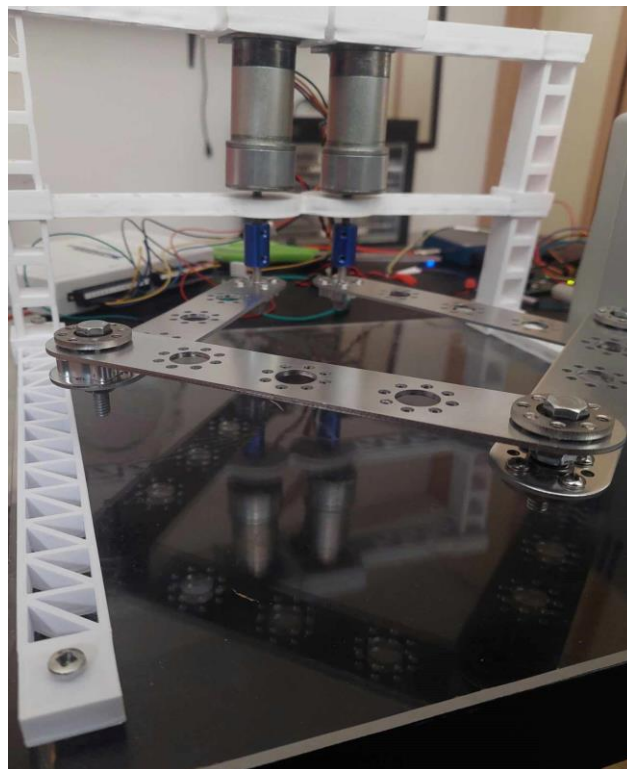
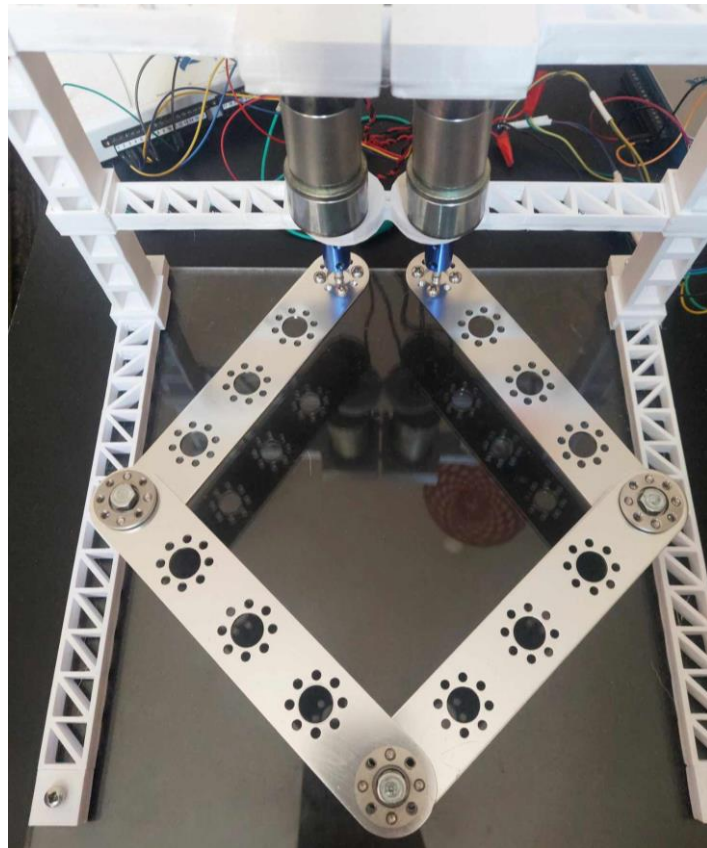
Εικόνα 44 : Round Screw Plate βιδωμένο με το ρουλεμάν και η τελική ένωση

3. Το σημείο 3 είναι το τελικό σημείο δράσης, το οποίο και αυτό περιστρέφεται. Για να συνδέσουμε τα δύο brackets ,χρησιμοποιήσαμε δύο από τα εξαρτήματα της εικόνα 43 για να είναι σταθερά τα ρουλεμάν που τοποθετήσαμε μέσα σε κάθε bracket. Έπειτα η ένωση έγινε με μία βίδα , όπως και στο σημείο 2.



Εικόνα 45: Ένωση στο σημείο

#### 6.4 Τελική Κατασκευή



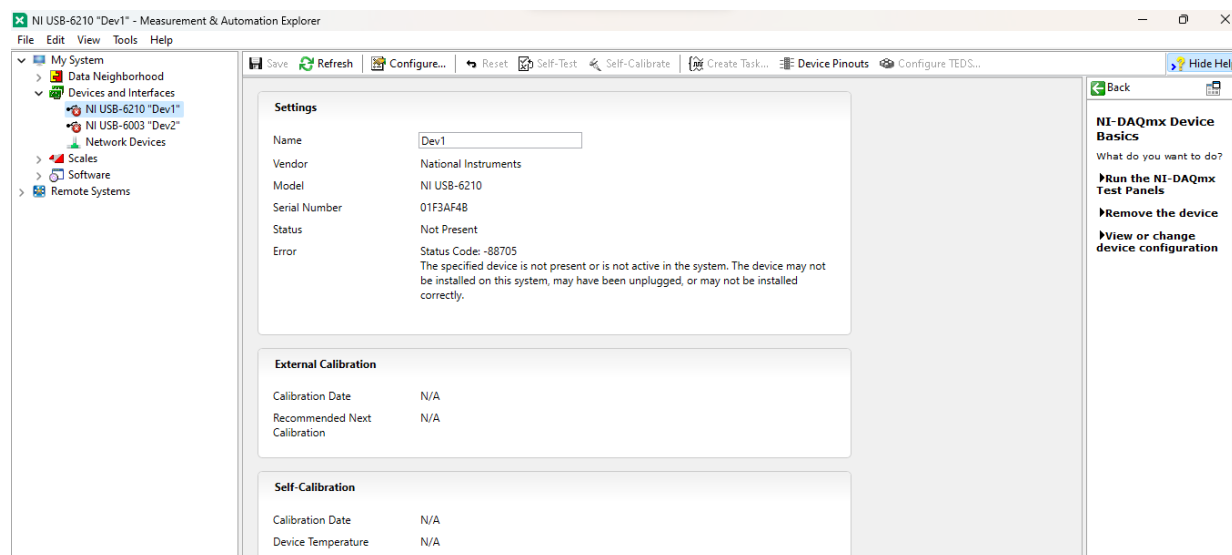
Εικόνα 46 : Τελική κατασκευή μηχανισμού

## Κεφάλαιο 7. Προγραμματισμός μηχανήματος

Αρχικά ξεκινήσαμε χρησιμοποιώντας τον ένα από τους δύο κινητήρες και την κάρτα σημάτων NI-6210 , ώστε να κατανοήσουμε τη λειτουργία του encoder και το πως αυτός θα ενημερώνει κατάλληλα την NI-6210 και έπειτα η κάρτα τον υπολογιστή μας.

Το πρώτο πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί ήταν ο τρόπος σύνδεσης της κάρτας με τον υπολογιστή . Για τον παραπάνω λόγο κρίθηκε αναγκαία η εγκατάσταση του πακέτου NI MAX από την ιστοσελίδα της National Instruments.

Το NI MAX είναι ένα εργαλείο που παρέχει διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης και του ελέγχου προγραμματιστικού εξοπλισμού (drivers), της διαχείρισης συσκευών, και της παρακολούθησης των ρυθμίσεων των συσκευών. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάγνωση και την επίλυση προβλημάτων. (Εικόνα 47)



Εικόνα 47 : NI MAX

Αφού έγινε με επιτυχία η σύνδεση με τον υπολογιστή έπρεπε να κατανοήσουμε το είδος των δεδομένων που μας παρέχει ο encoder και να βρούμε τον τρόπο που θα τα συλλέγουμε από αυτόν.

Η γλώσσα προγραμματισμό που επιλέξαμε είναι η python ,καθώς είναι μια από τις υποστηριζόμενες γλώσσες από την National Instruments για τη χρήση της συσκευής και πιο ευέλικτη στην προσθήκη νέων λειτουργιών και στην επικοινωνία με κάποιο γραφικό περιβάλλον ,όπως για παράδειγμα το Unity.

Έπειτα για να μας παραχωρηθεί η πρόσβαση στις εξιδεικευμένες λειτουργίες του υλικού έπρεπε να γίνει η εγκατάσταση της βιβλιοθήκης nidaqmx μέσω της εντολής `install nidaqmx` σε ένα τερματικό του υπολογιστή. [25]



Αφού έγινε με επιτυχία η σύνδεση με τον υπολογιστή έπρεπε να κατανοήσουμε το είδος των δεδομένων που μας παρέχει ο encoder και να βρούμε τον τρόπο που θα τα συλλέγουμε από αυτόν.

Η γλώσσα προγραμματισμού που επιλέξαμε είναι η python ,καθώς είναι μια από τις υποστηριζόμενες γλώσσες από την National Instruments για τη χρήση της συσκευής και πιο ευέλικτη στην προσθήκη νέων λειτουργιών και στην επικοινωνία με κάποιο γραφικό περιβάλλον ,όπως για παράδειγμα το Unity.

Έπειτα για να μας παραχωρηθεί η πρόσβαση στις εξιδεικευμένες λειτουργίες του υλικού έπρεπε να γίνει η εγκατάσταση της βιβλιοθήκης nidaqmx μέσω της εντολής pip install nidaqmx σε ένα τερματικό του υπολογιστή.

## 7.1 Πειράματα

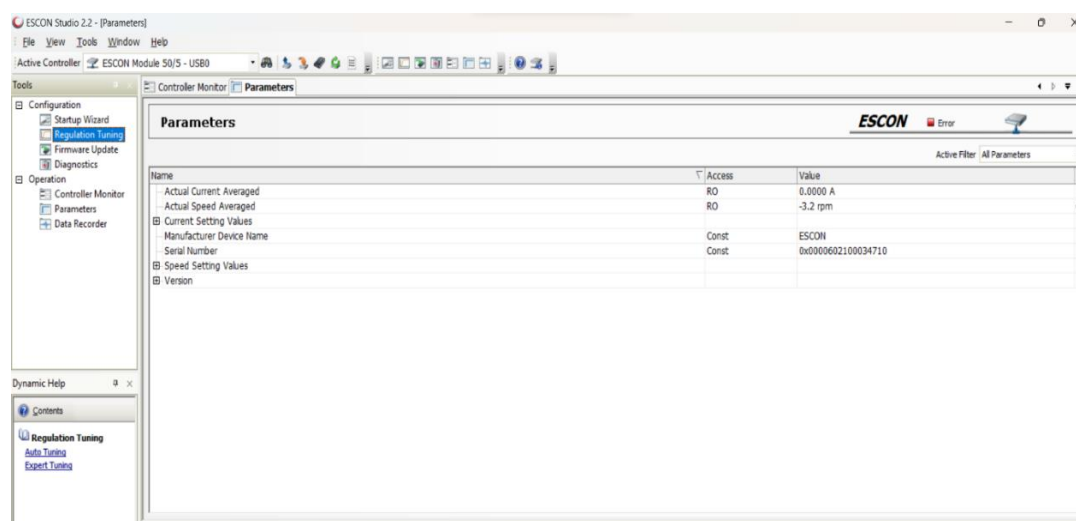
Πριν γίνει ο υπολογισμός των ροπών κρίθηκε απαραίτητο να γίνουν μικρά πειράματα ,ώστε να βεβαιωθούμε πως η επικοινωνία μεταξύ των οδηγών κινητήρων, της κάρτα σημάτων NI USB-6003 , των κινητήρων και του υπολογιστή λειτουργεί σωστά.

Αρχικά βεβαιωθήκαμε ότι η κάρτα σημάτων NI USB-6003 διαβάζεται από το περιβάλλον του πακέτου NI MAX και το όνομα της συμφωνεί με αυτό που έχουμε χρησιμοποιήσει στον κώδικα μας.

Τα σήματα που στέλνει η κάρτα σημάτων NI USB-6003 στους οδηγούς κινητήρων για να κινήσουν τους κινητήρες έχουν τη μορφή τάσης (Voltage) , επομένως το πρώτο πείραμα που έγινε είναι να μετρήσουμε με ένα πολύμετρο εάν η τάση που στέλνουμε από τον υπολογιστή μέσω της NI USB-6003 είναι ίδια με αυτή που δέχονται οι οδηγοί κινητήρων από την κάρτα σημάτων.

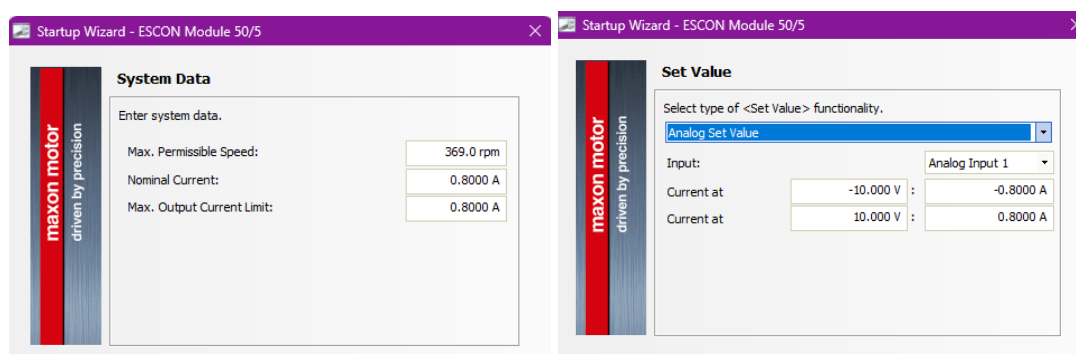
Αφού έγινε αυτό χρησιμοποιήσαμε το περιβάλλον Escon Studio για να ρυθμίσουμε τους οδηγούς κινητήρων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του μηχανισμού μας.

Το Escon Studio (Εικόνα 48) είναι μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) για τη διαμόρφωση και παρακολούθηση των ελεγκτών κίνησης ESCON της Maxon. Παρέχει μια απλή διεπαφή για την ρύθμιση των παραμέτρων του driver, την παρακολούθηση των μετρήσεων του κινητήρα τη δημιουργία και αποθήκευση προγραμμάτων ελέγχου.



Εικόνα 48 : Escon Studio

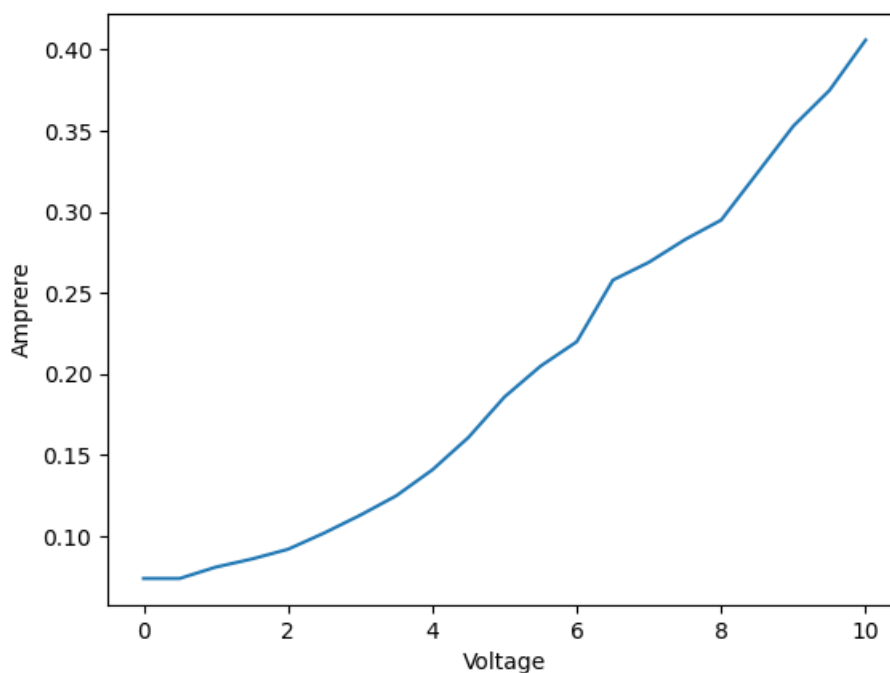
Οι αλλαγές που έγιναν στο Escon Studio αφορούν το εύρος της τάσης που δέχονται οι οδηγοί κινητήρων από την NI USB 6003 , η οποία είναι μεταξύ -10 και + 10 Volt (σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή της κάρτας) και της μέγιστης τιμής ρεύματος εισόδου του κινητήρα που είναι στα 0.8 Ampere, όπως φαίνεται στην εικόνα 49. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή για το ρεύμα είναι για να περιορίσουμε το μέγεθος της ροπής που ασκούν οι κινητήρες , ώστε να αποφύγουμε βλάβες στον μηχανισμό.



Εικόνα 49 : Ρυθμίσεις στο Escon Studio

Το επόμενο πείραμα που πραγματοποιήσαμε σχετίζεται με την κίνηση του κινητήρα. Αυτό που χρειαζόταν να διαπιστώσουμε είναι πως αν αυξήσουμε σταδιακά την τάση ( -10 έως 10 Volt) είναι ανάλογη και η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα αλλά και η αλλαγή στη φορά περιστροφής όταν η τάση έχει αρνητικές τιμές.

Στο γράφημα της εικόνας 50 φαίνεται η σχέση του ρεύματος με την τάση που εφαρμόζουμε στους κινητήρες.



Εικόνα 50: Σχέση Τάσης - Ρεύματος

## 7.2 Περιγραφή κώδικα

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των βασικών λειτουργιών του κώδικα

```
def initiate_acquisition_task(task_number):
    task_name = 'input_task_1' if task_number == 1 else 'input_task_2'
    channel = 'Dev1/ctr0' if task_number == 1 else 'Dev1/ctr1'
    source = 'PFI0' if task_number == 1 else 'PFI2'
    deg = 0 if task_number == 1 else 180

    acquisition_task = Task(task_name)

    acquisition_task.ci_channels.add_ci_ang_encoder_chan(counter=channel, decoding_type=constants.EncoderType.X_4,
                                                         initial_angle=np.deg2rad(deg),
                                                         units=constants.AngleUnits.TICKS, pulses_per_rev=1024)
    acquisition_task.timing.cfg_samp_clk_timing(source=source, rate=1000, samps_per_chan=10000000,
                                                sample_mode=constants.AcquisitionType.CONTINUOUS)
    print("created new task: ", task_name)

    return acquisition_task
```

Εικόνα 51 : Συνάρτηση initiate\_acquisition\_task

Η εικόνα 51 περιγράφει τη συνάρτηση **initiate\_acquisition\_task**, η οποία δημιουργεί ένα Task εισόδου από τους encoders και η βιβλιοθήκη `nidaxmx` πετυχαίνει την επικοινωνία με την συσκευή NI USB-6210. Έπειτα με την εντολή **acquisition\_task.ci\_channels.add\_ci\_ang\_encoder\_chan** πραγματοποιείται η επικοινωνία με τον encoder, αυτή η εντολή δημιουργεί έναν αισθητήρα γωνίας στο κανάλι εισόδου της συσκευής **Dev1** (το όνομα της συσκευής NI USB-6210 το οποίο φαίνεται στην εφαρμογή NI MAX), χρησιμοποιώντας τον τύπο encoder X4 με αρχική γωνία 0, μονάδες μέτρησης τα ticks και οι παλμοί ανά περιστροφή που παράγει ο encoder. Η εντολή **acquisition\_task.timing.cfg\_samp\_clk\_timing** ρυθμίζει το ρολόι δειγματοληψίας σε μια συχνότητα, την είσοδο του μετρητή της κάρτας ως πηγή ρολογιού και εκτελώντας συνεχή δειγματοληψία.

- **PFI0** και **PFI2** : Οι είσοδοι του μετρητή της κάρτας NI USB-6210 για κάθε encoder.
- **Dev1/ctr0** και **Dev1/ctr1** : Κανάλι εισόδου της κάρτας για κάθε encoder.
- **deg = 0** ή **deg = 180** : Αρχική γωνία για κάθε κινητήρα (0 μοίρες για το σημείο A και 180 μοίρες για το σημείο E)

```
def initiate_output_task(task_number):
    task_name = 'output_task_1' if task_number == 1 else 'output_task_2'
    channel = 'Dev2/ao0' if task_number == 1 else 'Dev2/ao1'

    output_task = Task(task_name)
    output_task.ao_channels.add_ao_voltage_chan(channel, min_val=-10, max_val=10)
    print("created new task: ", task_name)

    return output_task
```

Εικόνα 52 : Συνάρτηση initiate\_output\_task

Η συνάρτηση `initiate_output_task(task_number)` ,δημιουργεί ένα αναλογικό κανάλι εξόδου τάσης μέσω της κάρτας NI USB\_6003 για κάθε κινητήρα . Το επιτρεπτό όριο τάσης είναι  $\pm 10$  Volt , σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της κάρτας.

- **Dev2/ao0** και **Dev2/ao1** : Το όνομα της κάρτας NI USB\_6003 (το οποίο φαίνεται στην εφαρμογή NI MAX) και η αναλογικές είσοδοι της .

```
while True:

    try:
        read_value_2 = acquisition_task_1.read(number_of_samples_per_channel=20, timeout=5)[0]
        print("rv2", read_value_2)
        position2 = signedNum(read_value_2, counterNBits: 32)
        degrees2 = (position2 / PPR) * 180
        curr_ang2 = -degrees2[0]
    except Exception as e:
        # print(e)
        curr_ang2 = previous_ang2
        pass

    try:
        read_value_1 = acquisition_task_2.read(number_of_samples_per_channel=20, timeout=5)[0]
        print("rv1:", read_value_1)
        position1 = signedNum(read_value_1, counterNBits: 32)
        degrees1 = (position1 / PPR) * 180
        curr_ang1 = -degrees1[0] + 180
```

Εικόνα 53 : Κομμάτι κώδικα της main για την ανάγνωση των παλμών του encoder

Ο κάθε encoder παρέχει 19968 παλμούς ανά περιστροφή στον τελικό άξονα περιστροφής, επομένως χρησιμοποιώντας την παραπάνω πληροφορία θα μετρήσουμε τη γωνία που περιστρέφεται ο δρομέας του κινητήρα σε μοίρες.

Σε ένα συνεχόμενο βρόγχο:

- **read\_value\_1=acquisition\_task\_1.read(number\_of\_samples\_per\_channel=20,timeout=5)[0]** : Με την εντολή αυτή διαβάζονται 20 δείγματα ανά 5 δευτερόλεπτα , για να μην γεμίζει ο buffer και προκαλούνται καθυστερήσεις.
- **Position2 = signedNum(read\_value\_1, 32)** : Με την εντολή αυτή διαβάζουμε την είσοδο, η τιμή της οποίας είναι προσημασμένη και δεν δίνει αρνητικές τιμές, για αυτό το λόγο έπρεπε να υλοποιήσουμε την συνάρτηση `signedNum()`, η οποία δέχεται σαν είσοδο μια τιμή και έναν αριθμό bit, σε αυτή τη περίπτωση το 32, μιας και η κάρτα χρησιμοποιεί σύστημα αρίθμησης των 32-bit.

**Σημείωση:** Ο κινητήρας που μας δίνει το `position2` είναι αυτός που έχει συνδεθεί στις θέσεις PF1 και PF2 της κάρτας NI-6210 και αντίστοιχα το `position1` στις θέσεις PF3 και PF4 ο άλλος κινητήρας.

- **Degrees2 = -(position2 / PPR) \* 180** : Μετατρέπουμε την τιμή που διαβάζουμε σε μοίρες διαιρώντας την με τους παλμούς ανά περιστροφή και πολλαπλασιάζοντας με το 180 , γιατί ο δρομέας δεν κάνει πλήρη περιστροφή.

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι οι κινητήρες είναι τοποθετημένοι ανάποδα , έτσι έχουμε σωστή αρίθμηση των γωνιών με τη φορά που θέλουμε.

```

def signedNum(x, counterNBits):
    signedThreshold = 2 ** (counterNBits - 1)
    if isinstance(x, float):
        signedData = np.array([x])
    else:
        signedData = x[:, 0]
    signedData[signedData > signedThreshold] -= 2 ** counterNBits
    return signedData

def calculate_x_y(curr_ang1, curr_ang2):
    ang1, ang2 = symbols(names='ang1 ang2', real=True)

    xb = a1 * cos(ang2) + a0
    yb = a1 * sin(ang2)
    xd = a1 * cos(ang1)
    yd = a1 * sin(ang1)

    xb = xb.subs({ang2: np.deg2rad(curr_ang2)}).evalf()
    yb = yb.subs({ang2: np.deg2rad(curr_ang2)}).evalf()
    xd = xd.subs({ang1: np.deg2rad(curr_ang1)}).evalf()
    yd = yd.subs({ang1: np.deg2rad(curr_ang1)}).evalf()

    d1 = sqrt((xb - xd) * (xb - xd) + (yb - yd) * (yb - yd))
    d2 = d1 / 2
    d3 = sqrt(Abs(a2 ** 2 - d2 ** 2))

    xp = xb + ((d2 / d1) * (xd - xb))
    yp = yb - ((d2 / d1) * (yb - yd))

    x = xp + (d3 / d1 * (yd - yb))
    y = yp - (d3 / d1 * (xd - xb))

    return x, y

```

Εικόνα 54: Συνάρτηση calculate\_x\_y

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις κινηματικής θα υπολογίσουμε τη θέση του τελικού σημείου δράσης. Ο άξονας που είναι κάθετος στη θέση που τοποθετήθηκαν οι κινητήρες είναι ο  $\mathbf{y'y}$  και ο άξονας πάνω στον οποίο είναι κινητήρες είναι ο  $\mathbf{x'x}$ . Για να γίνει αυτό φτιάξαμε μία συνάρτηση την **calculate\_x\_y(curr\_ang1, curr\_ang2)** που δέχεται ως ορίσματα τη θέση του τελικού σημείου δράσης σε μοίρες, δηλαδή τη γωνία και  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$ . Με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης sympy μπορούμε να ορίσουμε συμβολικά πακέτα και να κάνουμε συμβολικούς υπολογισμούς. Οπότε θέσαμε ως μεταβλητές ang1 και ang2 τις 2 γωνίες και γράψαμε τις εξισώσεις κινηματικής συναρτήσεως των γωνιών. Η συνάρτηση υπολογίζει τις τιμές των μεταβλητών  $x_b, y_b, x_d, y_d$  αντικαθιστώντας τις συμβολικές τιμές με τη συνάρτηση **subs()** και γίνεται ο υπολογισμός της ισότητας με τη συνάρτηση **evalf()**. Τέλος ξέροντας τις τιμές των παραπάνω μεταβλητών γίνεται ο υπολογισμός του τελικού σημείου  $\mathbf{x,y}$ .

```

def calculate_t1_t2(curr_ang1, curr_ang2, y_val):

    ang1, ang2 = symbols( names= 'ang1 ang2', real=True)
    xb = a1 * cos(ang1) + a0
    yb = a1 * sin(ang1)
    xd = a1 * cos(ang2)
    yd = a1 * sin(ang2)

    d1 = sqrt((xb - xd) * (xb - xd) + (yb - yd) * (yb - yd))
    d2 = d1 / 2
    d3 = sqrt(Abs(a1 ** 2 - d2 ** 2))

    xp = xb + ((d2 / d1) * (xd - xb))
    yp = yb + ((d2 / d1) * (yd - yb))

    x = xp + (d3 / d1 * (yd - yb))
    y = yp - (d3 / d1 * (xd - xb))

    dxg_dang2 = diff(x, *symbols: ang2)
    dyg_dang2 = diff(y, *symbols: ang2)
    dyg_dang1 = diff(y, *symbols: ang1)
    dxg_dang1 = diff(x, *symbols: ang1)

    force = (y_val - 16) * KAPPA / (-40)

    t1 = dxg_dang1 * force + dyg_dang1 * force
    t2 = dxg_dang2 * force + dyg_dang2 * force

    t1_rep = t1.subs({ang1: np.deg2rad(curr_ang1), ang2: np.deg2rad(curr_ang2)})
    t1_val = t1_rep.evalf()
    t2_rep = t2.subs({ang1: np.deg2rad(curr_ang1), ang2: np.deg2rad(curr_ang2)})
    t2_val = t2_rep.evalf()

    return -t1_val, -t2_val

```

Εικόνα 55 : Συνάρτηση calculate\_t1\_t2

Η συνάρτηση **calculate\_t1\_t2(curr\_ang1, curr\_ang2,y\_val)** δέχεται ως ορίσματα τη θέση του τελικού σημείου δράσης σε μοίρες , δηλαδή τη γωνία και  $\vartheta_1$  και  $\vartheta_2$  και τη θέση στον άξονα  $y$  .Με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης `sympy` μπορούμε να ορίσουμε συμβολικά πακέτα και να κάνουμε συμβολικούς υπολογισμούς. Οπότε θέσαμε ως μεταβλητές `ang1` και `ang2` τις 2 γωνίες και υπολογίσαμε συμβολικά με χρήση της συνάρτησης `diff()` τις μερικές παραγώγους του τελικού σημείου δράσης ως προς τις γωνίες αυτές.

Η τιμή της μεταβλητής **force** υπολογίζεται κάνοντας χρήση της εξίσωσης ελατηρίου (Νόμος Hooke) . Σύμφωνα με τον Νόμο του Hooke , η δύναμη ισούται με την απόκλιση του ελατηρίου από τη θέση ισορροπίας επί τη σταθερά ελατηρίου KAPPA. Για τις δικές μας ανάγκες , η απόκλιση αυτή ισούται με τη θέση στον άξονα  $y$  αφαιρώντας τη σταθερή θέση  $y = 16$  , η οποία συμβολίζει ένα εικονικό ελατήριο.

Έπειτα χρησιμοποιώντας την εξίσωση της στατικής για κάθε γωνία (**t1,t2**), υπολογίστηκαν οι ροπές **t1\_val, t2\_val**, αντικαθιστώντας τις συμβολικές τιμές με τη συνάρτηση **subs()** και γίνεται ο υπολογισμός της ισότητας με τη συνάρτηση **evalf()**.

```

write_value_1 = 0
write_value_2 = 0
if y >= 16:

    t1, t2 = calculate_t1_t2(curr_ang1, curr_ang2, y)
    max_t = 1.096 # N*cm
    # print("t1", t1, " ", "t2", t2)
    #kinitiras deksia
    if t1 < -max_t:
        print("w1max: case1")
        write_value_1 = 10
    elif t1 > max_t:
        print("w1max: case2")
        write_value_1 = 10
    else:
        print("w1nonmax")
        print("t1:", t1)
        t_ratio = t1 / max_t

    if t1 > 0:
        print("w1nonmax: case 1")
        write_value_1 = t_ratio * 10
    else:
        print("w1nonmax: case 2")
        write_value_1 = -t_ratio * 10

    if t2 < -max_t:
        print("w2max: case1")
        write_value_2 = -10
    elif t2 > max_t:
        print("w2max: case2")
        write_value_2 = -10
    else:
        print("w2nonmax")
        print("t2:", t2)
        t_ratio = t2 / max_t

    if t2 > 0:
        print("w2nonmax: case 1")
        write_value_2 = -t_ratio * 10
    else:
        print("w2nonmax: case 2")
        write_value_2 = t_ratio * 10

    # print("wr1:", write_value_1)
    # print("wr2:", write_value_2)
    output_task_1.write(write_value_1)
    output_task_2.write(write_value_2)

```

Εικόνα 56 : Μετατροπή ροπής σε τάση

Στην Εικόνα 56 περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των ροπών στη main . Μέσα σε μία συνθήκη ελέγχουμε αν η θέση του τελικού σημείου δράσης στον άξονα y βρίσκεται στο εμπόδιο. Έπειτα καλούμε τη συνάρτηση **calculate\_t1\_t2**. Η μεταβλητή **max\_t** συμβολίζει τη μέγιστη ροπή των κινητήρων, βάση της σταθεράς ροπής του κατασκευαστή, έτσι ώστε να γνωρίζουμε πόσα Nm/Ampere ροπής έχουν την δυνατότητα να ασκούν οι κινητήρες. Η μέγιστη ροπή του κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση  $T_{max} = I_{max} * K_T = 1.096 \text{ N*m}$  , αν το  $I = 0.8 \text{ A}$  . Στη συνέχεια χρειάζεται να μετατρέψουμε τις ροπές σε τάση , καθώς η κάρτα NI USB-6003 επιστρέφει τάση. Δεδομένου ότι η κάρτα έχει τάση εξόδου  $\pm 10 \text{ Volt}$  και ο κινητήρας μέγιστη ροπή  $T_{max}$  και αφού έχουμε υπολογίσει τις ροπές για κάθε κινητήρα μέσω της ιακωβιανής, ψάχνουμε να βρούμε το ποσοστό της ροπής που υπολογίστηκε σε σχέση με τη μέγιστη ροπή. Ο υπολογισμός αυτός θα γίνει από τη σχέση **write\_value = t\_ratio \* ( $\pm 10$ ) =  $\frac{t}{max\_t} * (\pm 10) \text{ Volt}$** . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πρέπει να δοθεί σημασία στο πρόσημο , διότι αυτό εξαρτάται από τη συνδεσμολογία των κινητήρων με τους οδηγούς κινητήρων και καθορίζει την επιθυμητή φορά της κίνησης του εκάστοτε κινητήρα.



### 7.3 Εικονικό Περιβάλλον

Ο μηχανισμός προσομοιώνεται σε ένα εικονικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα , στο εικονικό περιβάλλον υπάρχει ένα αντικείμενο που δέχεται τις συντεταγμένες του τελικού σημείου δράσης μέσω sockets ,ώστε να κινείται ένα αντικείμενο. Επίσης , υπάρχει ένα εμπόδιο με το οποίο μπορεί να συγκρουστεί. Από τη σύγκρουση παράγεται μία δύναμη  $F$  , η οποία μετατρέπεται σε ροπή ,όπως περιγράφεται παραπάνω. Η απόλυτη τιμή της δύναμης αυτής μαζί με τις συντεταγμένες του διανύσματος δύναμης επιστρέφονται πάλι μέσω sockets.

Επομένως , η αλλαγές που γίνονται στον κώδικα για τη σωστή επικοινωνία και λειτουργία της προσομοίωσης περιγράφονται παρακάτω.

```
data = "1,2,3"
force = 0
anglex = 0
angley = 0
sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
sock.connect((host, port))
```

Εικόνα 50 : Δημιουργία socket για επικοινωνία

```
x, y = calculate_x_y(curr_ang1, curr_ang2)

x1 = round(x/10, 3)
y1 = round(y/10, 3)
data = str(x1) + "," + str(y1) + ",-0.54"
sock.sendall(data.encode("utf-8"))
res = sock.recv(1024).decode("utf-8")

str_force, str_anglex, str_angley = res.split(",")
global force, anglex, angley

force = float(str_force)
anglex = float(str_anglex)
angley = float(str_angley)
```

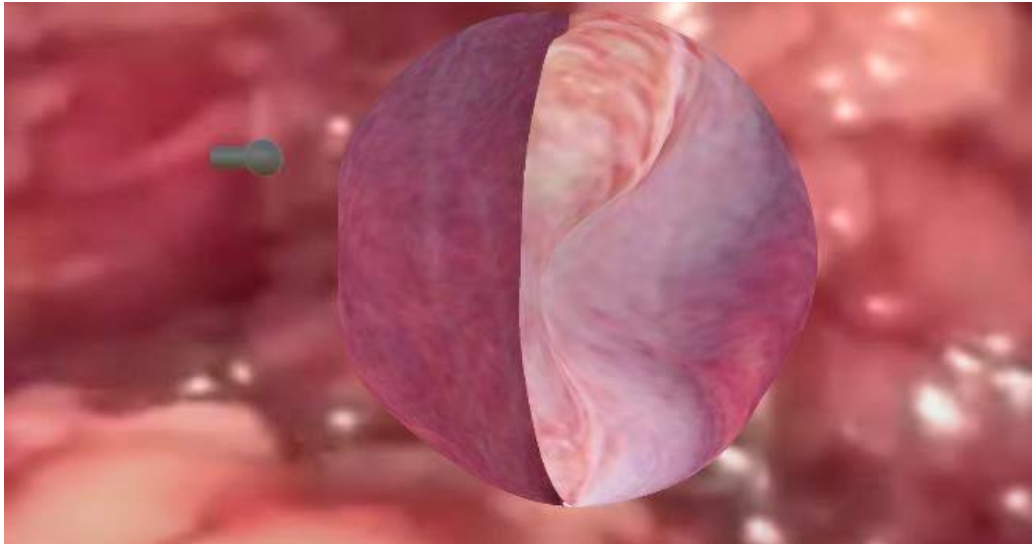
Εικόνα 57 : Δεδομένα αποστολής και λήψης

```
t1 = dxg_dang1 * force * sin(anglex) + dyg_dang1 * force * cos(angley)
t2 = dxg_dang2 * force * sin(anglex) + dyg_dang2 * force * sin(anglex)
```

Εικόνα 58: Αλλαγή των μεταβλητών

Στην Εικόνα 57 , ορίζουμε τη μεταβλητή force σύμφωνα με την τιμή που δεχόμαστε . Όπως και για τις μεταβλητές  $\alpha n g l e x$  και  $\alpha n g l e y$  , που αναφέρονται στις συντεταγμένες του διανύσματος την δύναμης.

Στην Εικόνα 58 , έχει γίνει αλλαγή των μεταβλητών  $t1$  και  $t2$  , ώστε να υπολογίζονται από τις παραπάνω μεταβλητές.



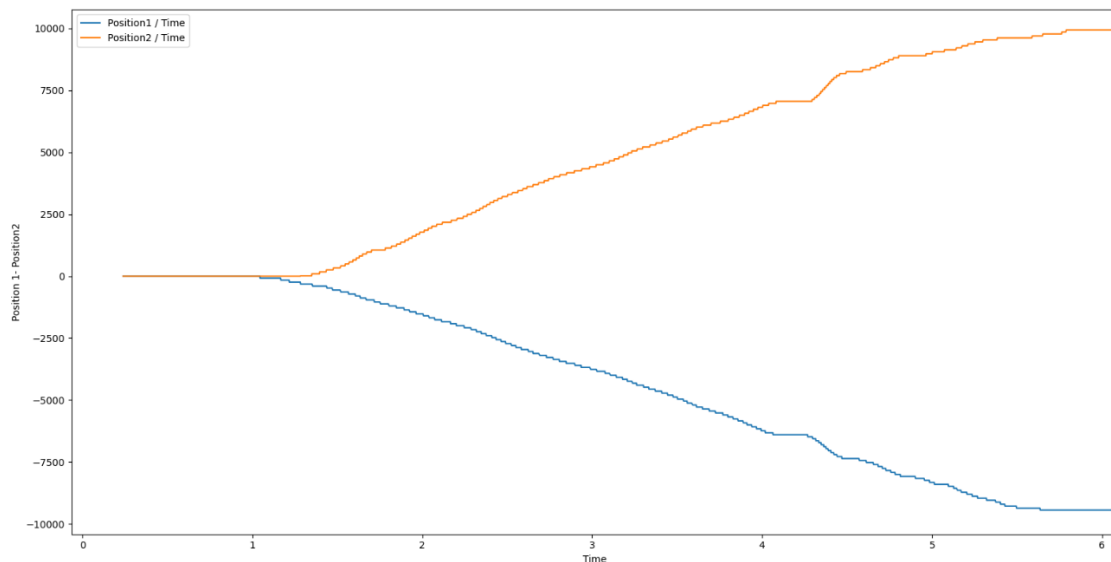
Εικόνα 59 : Εικονικό περιβάλλον

## 7.4 Μηχανισμός σε Λειτουργία

Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται η λειτουργία του μηχανισμού σε σχέση με τον χρόνο. Όλα τα γραφήματα αφορούν την κίνηση του μηχανισμού από την αρχική του θέση σε μία ευθεία έως την πλήρη έκταση των συνδέσμων.

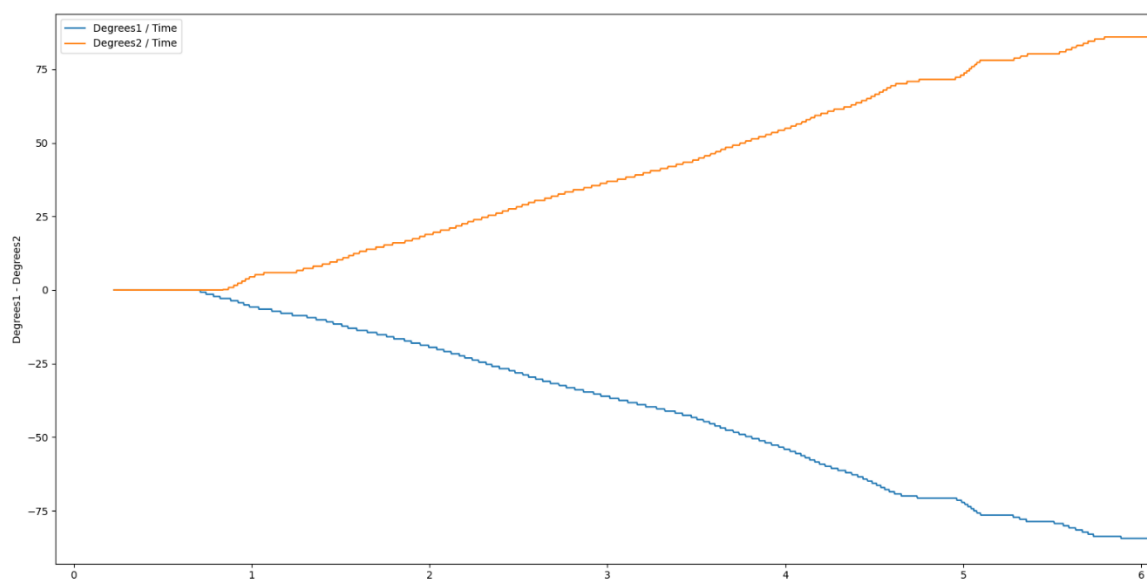
### 7.41 Λειτουργία με την πρώτη υλοποίηση συνδέσμων

Στην εικόνα 60 φαίνεται το γράφημα των παλμών που διαβάζονται από τους encoders των κινητήρων σε σχέση με το χρόνο.



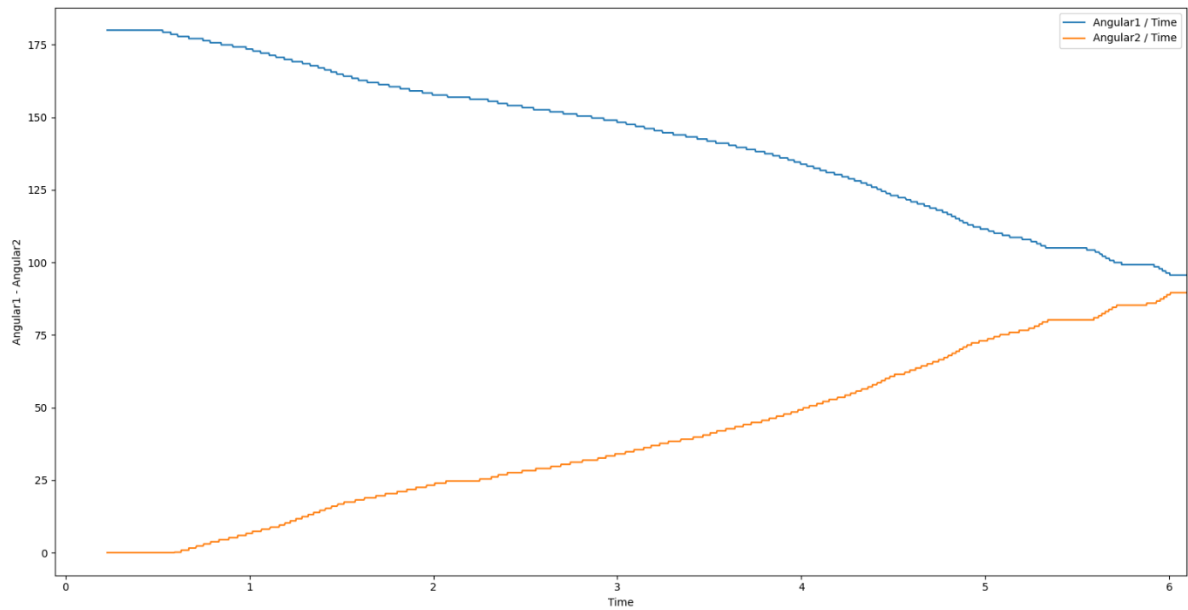
Εικόνα 60 : Plot Position1-Position2-Time

Στην εικόνα 61 φαίνεται το γράφημα των παλμών μετετρεμμένων σε μοίρες σε σχέση με το χρόνο.



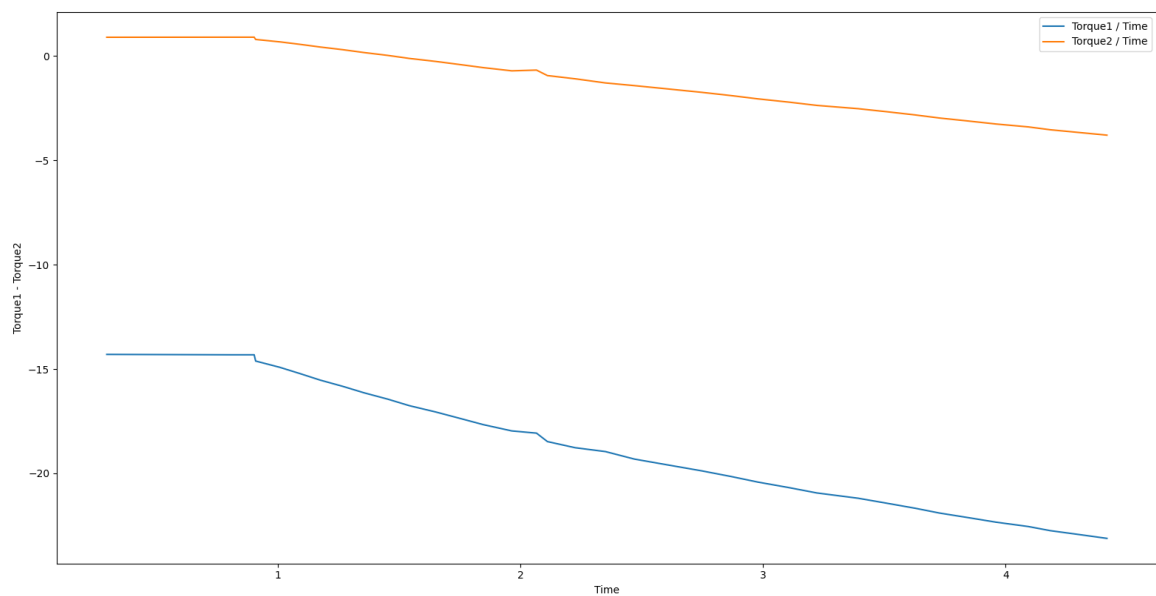
Εικόνα 61 : Plot Degrees1-Degrees2-Time

Στην εικόνα 62 φαίνεται το γράφημα των γωνιών από την αρχική τους θέση σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 62 : Plot Angular1-Angular2-Time

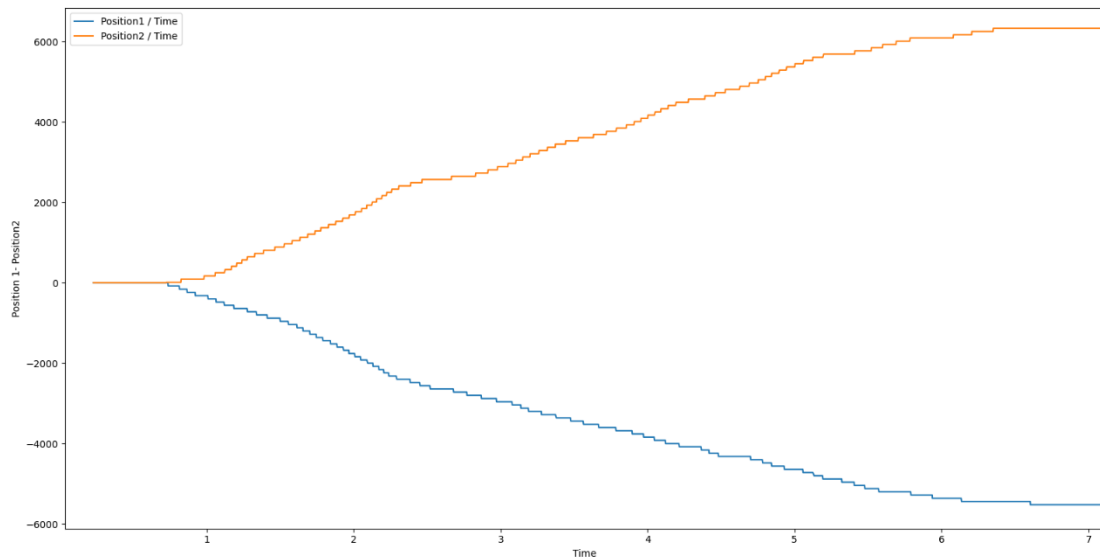
Στην εικόνα 63 φαίνεται το γράφημα των ροπών που εφαρμόζουν οι κινητήρες σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 63: Plot Torque1-Torque2-Time

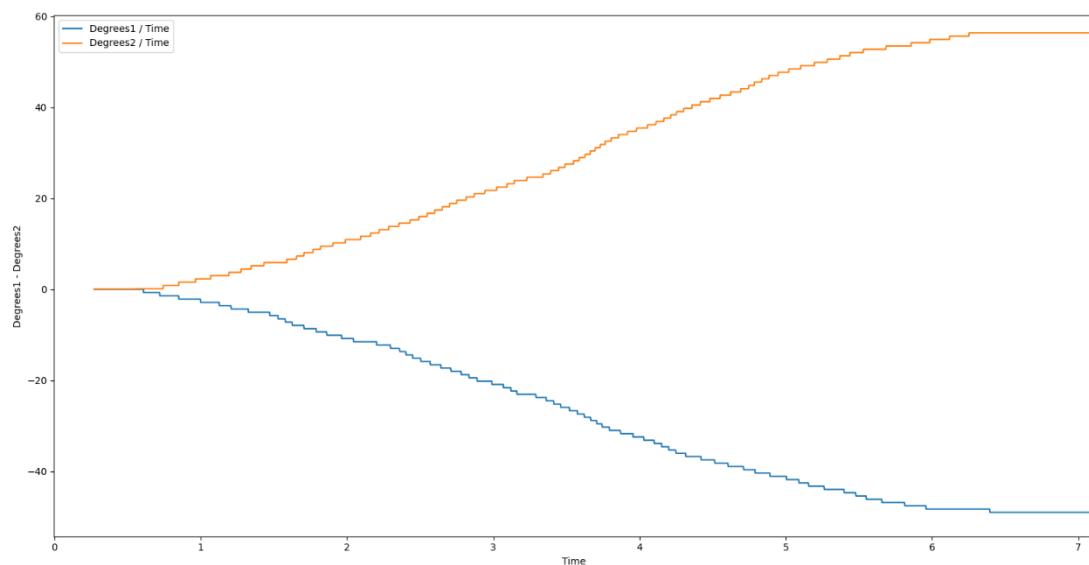
## 7.42 Λειτουργία με την τελική υλοποίηση συνδέσμων

Στην εικόνα 64 φαίνεται το γράφημα των παλμών που διαβάζονται από τους encoders των κινητήρων σε σχέση με το χρόνο.



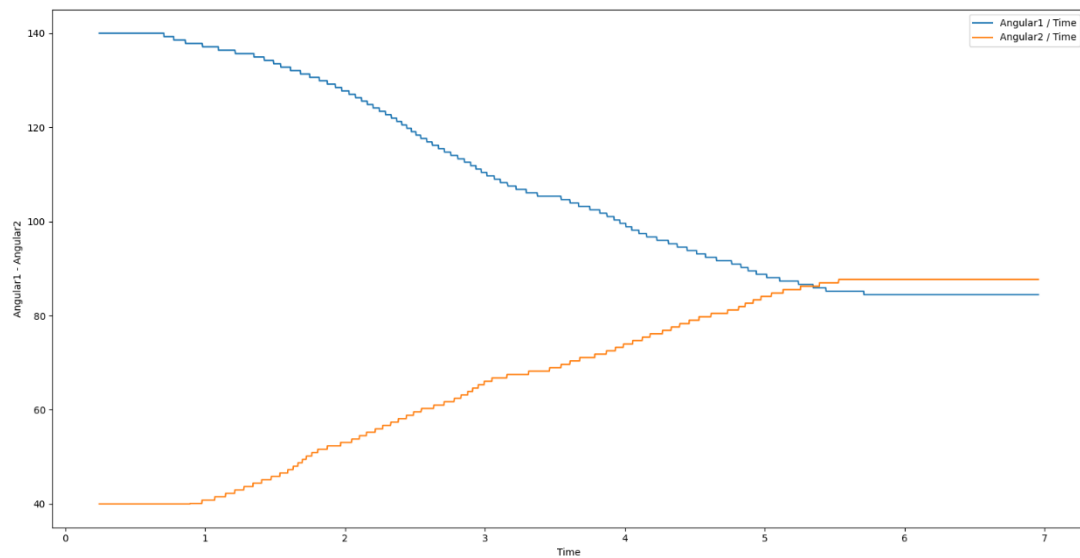
Εικόνα 64 : Plot Position1-Position2-Time

Στην εικόνα 65 φαίνεται το γράφημα των παλμών μετετρεμμένων σε μοίρες σε σχέση με το χρόνο.



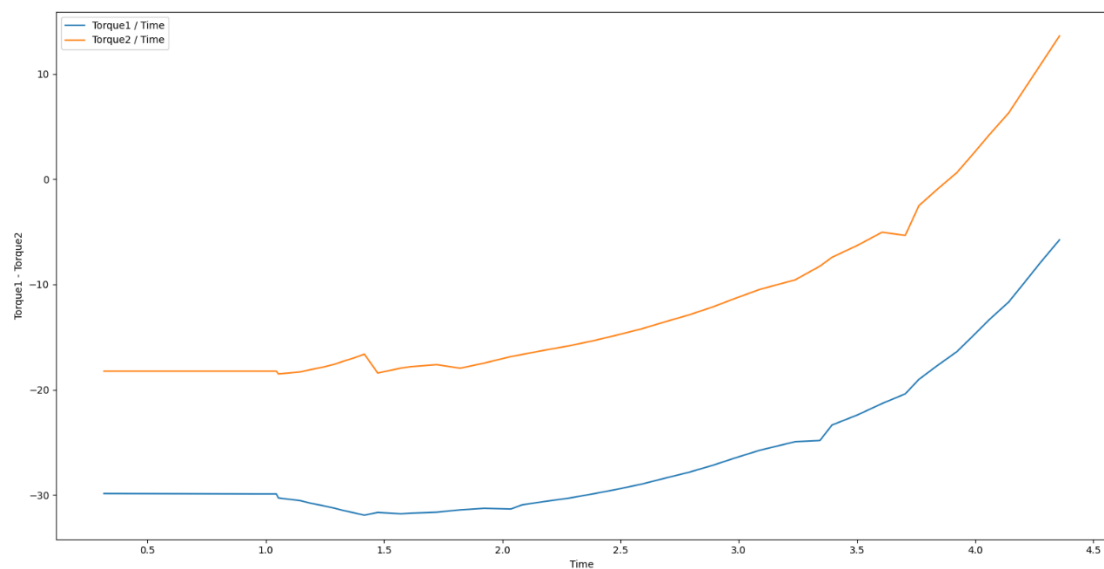
Εικόνα 65 : Plot Degrees1-Degrees2-Time

Στην εικόνα 66 φαίνεται το γράφημα των γωνιών από την αρχική τους θέση σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 66 : Plot Angular1-Angular2-Time

Στην εικόνα 67 φαίνεται το γράφημα των ροπών που εφαρμόζουν οι κινητήρες σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 67: Plot Torque1-Torque2-Time

## 7.5 Σύγκριση των δύο υλοποιήσεων συνδέσμων

Για τις δύο διαφορετικές υλοποιήσεις των συνδέσμων, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα δυναμόμετρο (Εικόνα 68) για να δούμε την τριβή που υπάρχει σε κάθε υλοποίηση. Όπως είναι λογικό η πρώτη με τα πλαστικά εξαρτήματα ένωσης των συνδέσμων εφαρμόζει μεγαλύτερη τριβή πάνω στον μηχανισμό.

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφήματα της σχέσης των παλμών που διαβάζεται από τους κινητήρες και της δύναμης που μετράμε με το δυναμόμετρο. Τα γραφήματα αναφέρονται και στις 2 υλοποιήσεις για την ίδια κίνηση του μηχανισμού και επιβεβαιώνουν το παραπάνω συμπέρασμα.

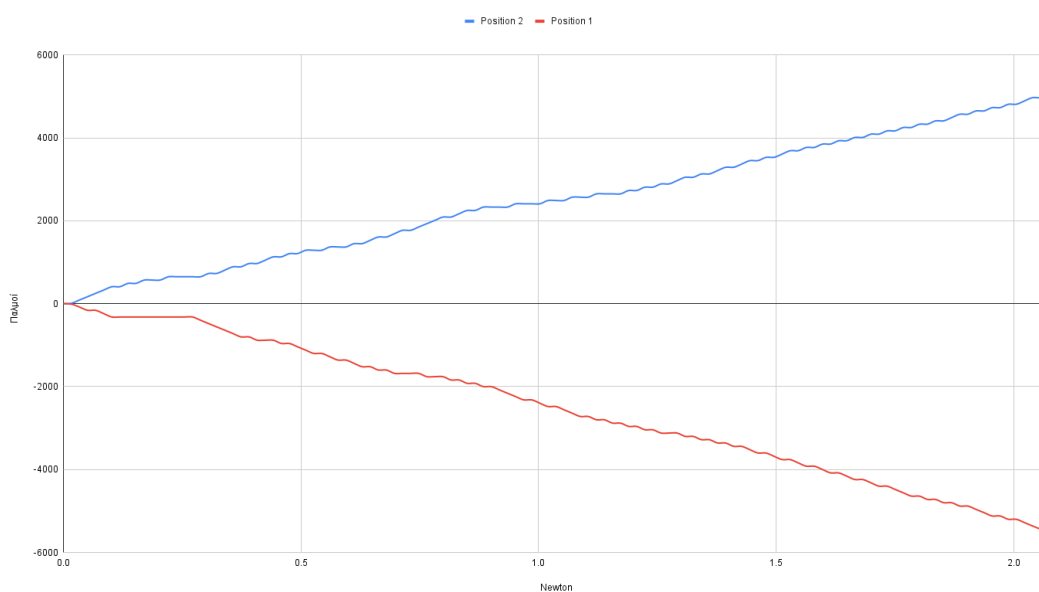


Εικόνα 68: Δυναμόμετρο

- **Κίνηση Μπροστά**

### Πρώτη Υλοποίηση

Κίνηση Μπροστά

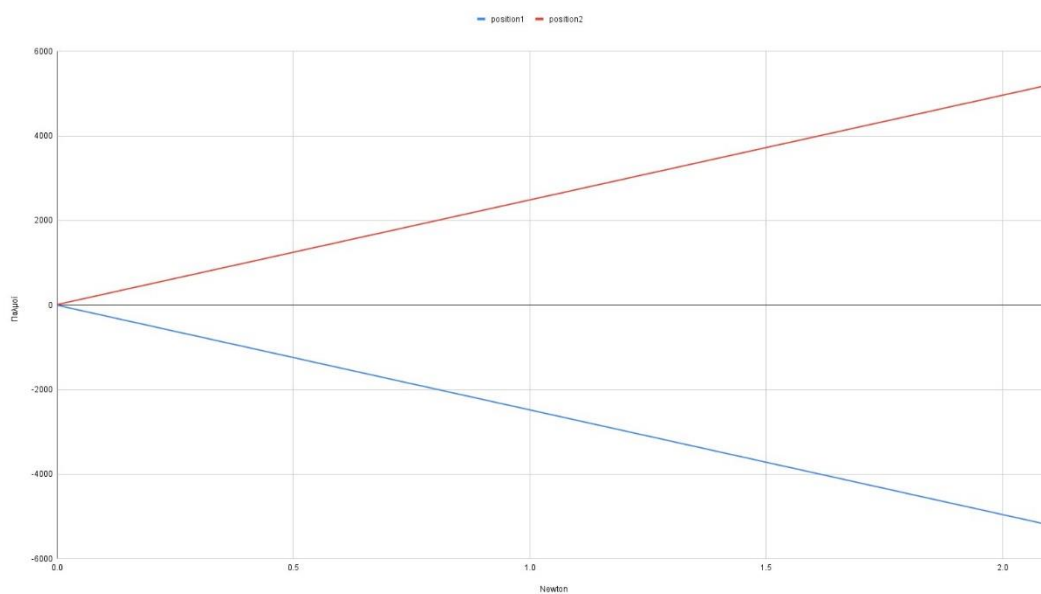


Εικόνα 69



## Δεύτερη Υλοποίηση

Μπροστά Κίνηση

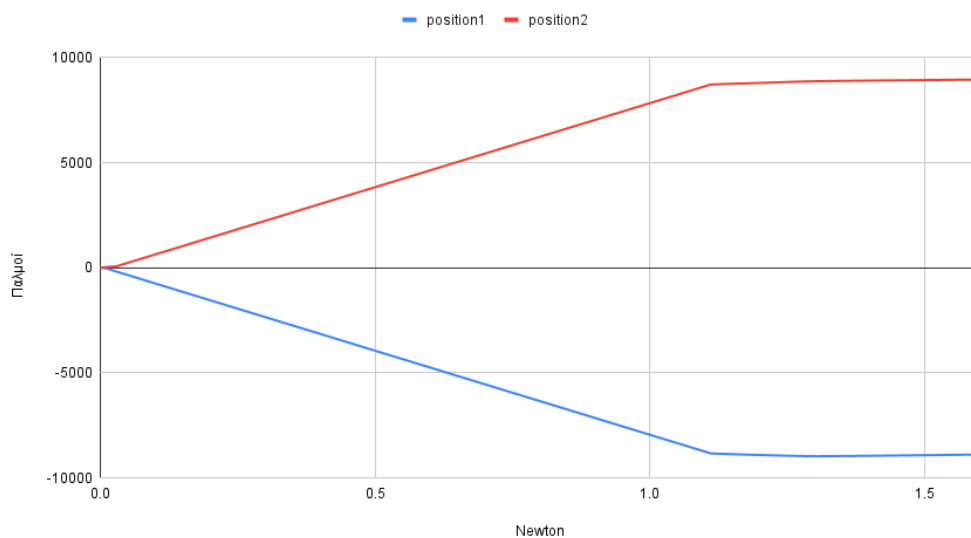


Εικόνα 70

- Κίνηση Πίσω

## Πρώτη Υλοποίηση

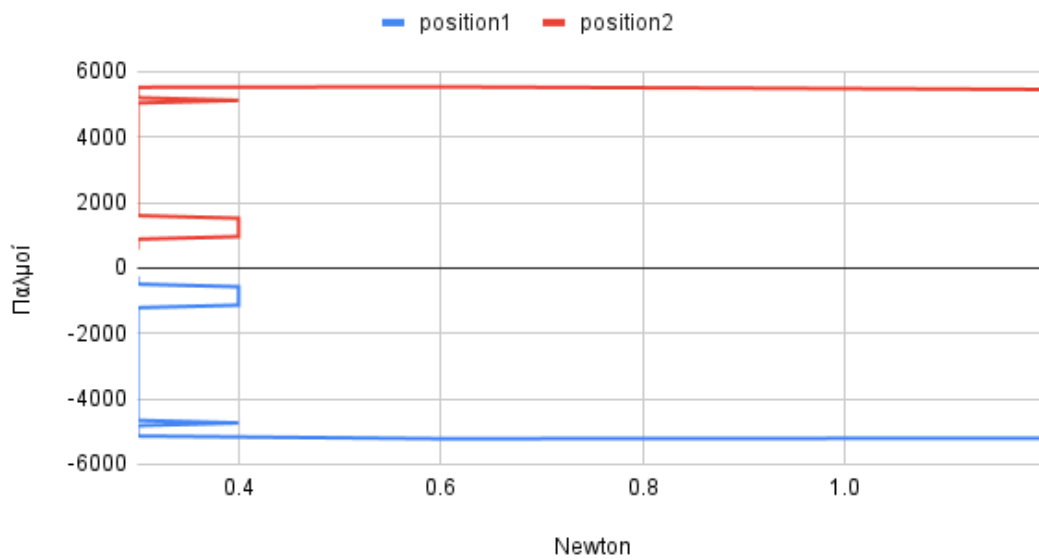
Κίνηση Πίσω



Εικόνα 71

## Δεύτερη Υλοποίηση

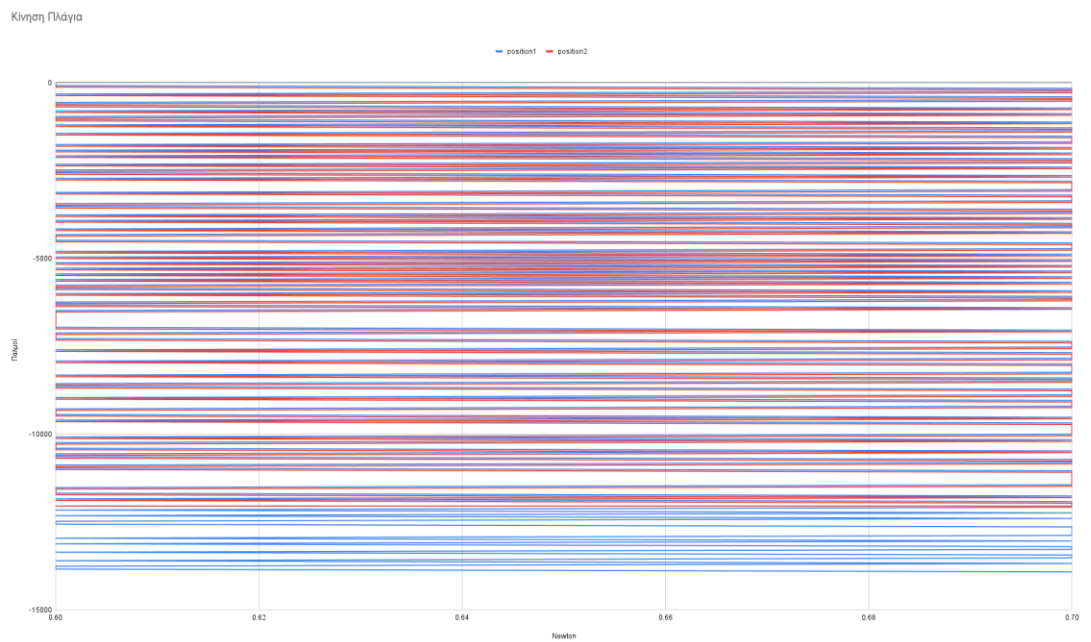
### Κίνηση Πίσω



Εικόνα 72

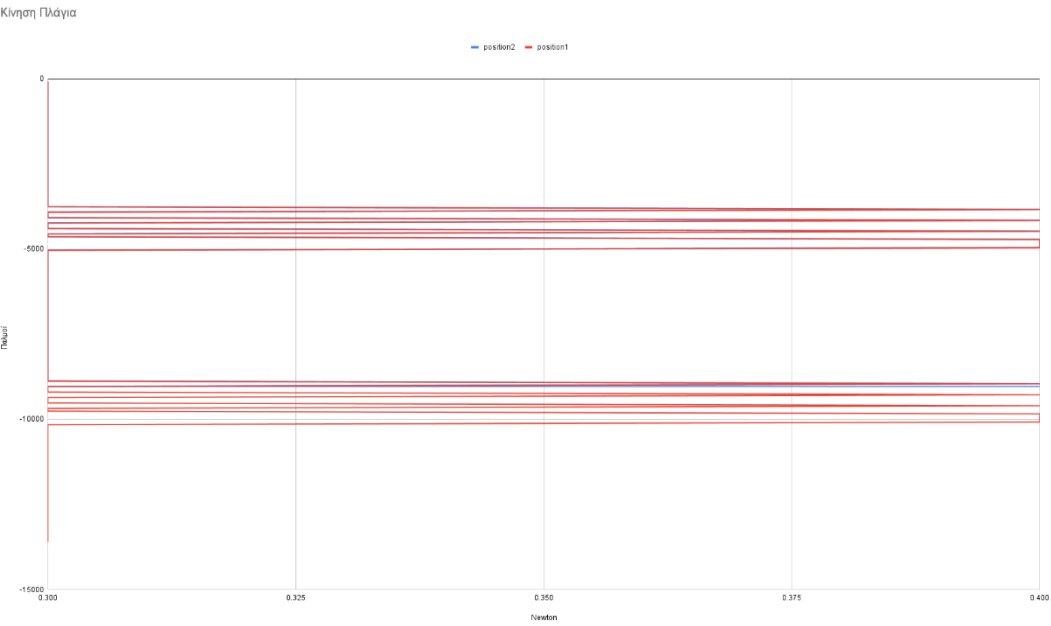
- Κίνηση Πλάγια

## Πρώτη Υλοποίηση



Εικόνα 73

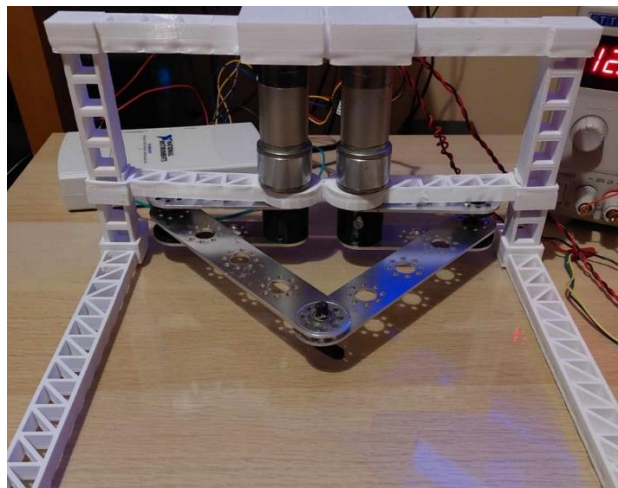
# Δεύτερη Υλοποίηση



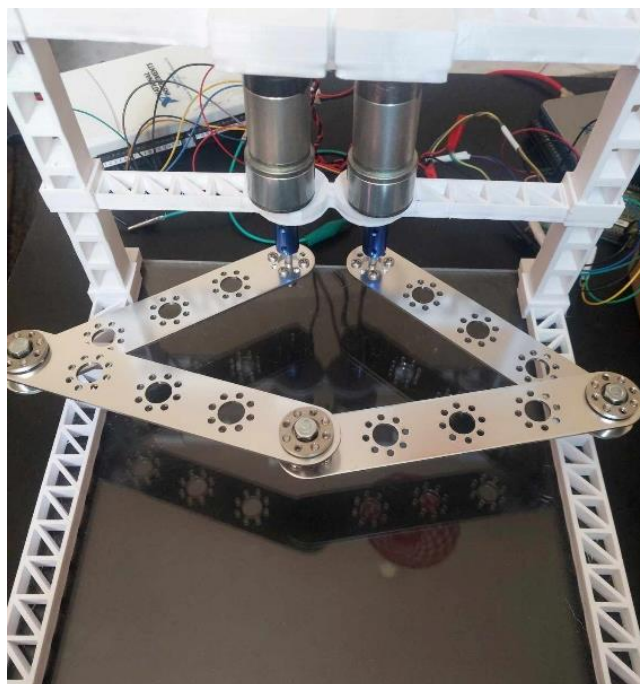
Εικόνα 74

## Κεφάλαιο 8. Οδηγίες χρήσης του μηχανισμού

- Τοποθετούμε τους συνδέσμους στην αρχική θέση, όπως φαίνεται στην εικόνα 54 , αν χρησιμοποιηθούν αυτοί οι σύνδεσμοι ή όπως στην εικόνα αν χρησιμοποιηθούν οι σύνδεσμοι της εικόνας (αρχική θέση στις 60 μοίρες και στις 120 μοίρες για κάθε κινητήρα)



Εικόνα 55 : Αρχική θέση συνδέσμων



Εικόνα : Αρχική θέση

- Συνδέουμε τις κάρτες σημάτων με τον υπολογιστή μέσω USB
- Ανοίγουμε το τροφοδοτικό
- Εκτελούμε το πρόγραμμα pytho
- Πιάνουμε το τελικό σημείο δράσης και χρησιμοποιούμε τον μηχανισμό.

## Κεφάλαιο 9. Επίλογος

### 9.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω , ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας , δηλαδή η βελτίωση τόσο της κατασκευής ενός απτικού μηχανισμού 2 βαθμών ελευθερίας όσο και του προγραμματιστικού του μέρους έγινε αρκετά ικανοποιητικά. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η pythοn, το Escon Studio, το Tinkercad, οι οδηγοί κινητήρων Escon Module 50/5, οι κινητήρες Ametek Pittman GM8212D142, ο τρισδιάστατος εκτυπωτής της σχολής και οι κάρτες σημάτων της National Instruments USB-6210 και USB-6003. Η pythοn προσφέρει μεγάλη ευελιξία και βιβλιογραφία για την δημιουργία, τον προγραμματισμό και τον έλεγχο ρομποτικών μηχανισμών. Το Escon Studio δίνει την δυνατότητα να προγραμματίσουμε γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια οδηγούς κινητήρων. Οι κινητήρες Ametek Pittman GM8212D142 παρόλο που προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και καλή απόδοση ανταποκρίθηκαν σε όλες μας τις ανάγκες, εκτός από την δυνατότητα να προσφέρουν μια ομαλή κίνηση χωρίς κραδασμούς, οι οποίοι οφείλονται στη σχέση μετάδοσης μέσω του γραναζώματος πριν από τον τελικό άξονα. Οι συγκεκριμένοι οδηγοί κινητήρων είναι πολύ ευέλικτοι και φιλικοί προς τον χρήστη, επίσης είχαν την δυνατότητα να εκτελέσουν τις επιθυμητές κινήσεις με μεγάλη ακρίβεια. Οι κάρτες σημάτων ανταποκρίνονται πλήρως στις ανάγκες υλοποίησης παρόμοιων εφαρμογών και η βιβλιοθήκη της pythοn βοηθάει αρκετά σε αυτό. Τέλος η κατασκευή των συνδέσμων με αλουμινένια brackets, πρόσφερε στιβαρότητα και καλύτερη κίνηση στον μηχανισμό με λιγότερες τριβές.

### 9.2 Μελλοντικές Αλλαγές

Ο μηχανισμός που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι λειτουργικός και ανταποκρίνεται στους στόχους που είχαμε θέσει. Ωστόσο τα περιθώρια βελτίωσης υπάρχουν και αφορούν τόσο τους κινητήρες όσο και την κατασκευή . Βασικό θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικούς κινητήρες, όπου η μετάδοση γίνεται άμεσα χωρίς τη χρήση γραναζώματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τις τριβές και να εξαλείψουμε τις ανεπιθύμητες δυνάμεις που ασκούνται εξαιτίας αυτού. Επίσης μελλοντικά χρήσιμη είναι η προσθήκη μίας δεύτερης κάρτας NI USB-6210 για multiprocessing, ώστε τα reads από τους encoders να γίνονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτό θα λύσει το πρόβλημα ότι η NI USB-6210 περιορίζει τη δημιουργία ίδιου τύπου task σε διαφορετικά processes. Χρήσιμο θα ήταν να γίνει και αλλαγή στο υλικό της βάσης στήριξης με αλουμίνιο ή ανθρακόνημα , παρόλο που η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μία πιο οικονομική λύση , υστερεί σε σταθερότητα.

## Αναφορές

- [1] [https://www.wikiwand.com/en/Haptic\\_technology](https://www.wikiwand.com/en/Haptic_technology)
- [2] <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=122927>
- [3] [https://teslasuit.io/blog/haptic\\_feedback/](https://teslasuit.io/blog/haptic_feedback/)
- [4] [https://www.spectratech.gr/en/product/51042/ForceDimension\\_omega.7?path=00](https://www.spectratech.gr/en/product/51042/ForceDimension_omega.7?path=00)
- [5] <https://hapticstech.wordpress.com/a-brief-history/>
- [6] [https://www.researchgate.net/figure/The-Tactile-Television-by-Paul-Bach-y-Rita-et-al\\_fig1\\_334897142](https://www.researchgate.net/figure/The-Tactile-Television-by-Paul-Bach-y-Rita-et-al_fig1_334897142)
- [7] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6874260/>
- [8] <https://www.astore.in/products/motorola-startac-130-flip-phone-antique-retro-original?variant=46792507556118>
- [9] <https://www.electronicdesign.com/technologies/components/article/21798404/whats-the-difference-between-haptics-now-and-then>
- [10] <https://teslasuit.io/blog/history-haptic-technology/>
- [11] <https://www.novint.com/the-nintendo-64s-rumble-pack-making-games-feel-more-real/>
- [12] <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=122927#ref20>
- [13] <https://www.evl.uic.edu/documents/ventriculostomysim.pdf>
- [14] [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067223000469?fbclid=IwAR2qbn9jFB7Glj3RYVjypsJiaqvacPAa\\_0omCybc55\\_Z1bNgPZZMo5Wl5Y](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067223000469?fbclid=IwAR2qbn9jFB7Glj3RYVjypsJiaqvacPAa_0omCybc55_Z1bNgPZZMo5Wl5Y)
- [15] [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Automation\\_and\\_Robotics/Haptic\\_Devices](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Automation_and_Robotics/Haptic_Devices)
- [16] <https://www.playstation.com/el-gr/accessories/dualsense-wireless-controller/>
- [17] <https://haptx.com/robotics/>
- [18] <https://www.yumpu.com/en/document/view/36409480/the-pantograph-mk-ii-a-haptic-instrument-cim-mcgill-university>
- [19] [CHARM LAB ME327/Jared And Sam \(stanford.edu\)](https://charm-lab-me327.github.io/JaredAndSam/)
- [20] [https://www.dynapar.com/technology/encoder\\_basics/quadrature\\_encoder/](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/quadrature_encoder/)
- [21] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/incremental-encoder>
- [22] <https://www.thegeekpub.com/245407/how-rotary-encoders-work-electronics-basics/>
- [23] [https://ni.scene7.com/is/image/ni/07100702\\_1204\\_960x1034?\\$ni-card-lg\\$](https://ni.scene7.com/is/image/ni/07100702_1204_960x1034?$ni-card-lg$)
- [24] <https://www.electronics-tutorials.ws/systems/closed-loop-system.html>
- [25] [NI-DAQmx Python Tutorial — nspyre 0.6.0 documentation](https://nspyre.org/docs/)