

Projektiranje i izrada delta robota s vakuumskom hvataljkom

Pavlović, Vid

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:313697>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vid Pavlović

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.

Student:

Vid Pavlović

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Željku Šitumu na pruženom znanju kroz studij te na savjetima i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, rodbini i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

Zahvaljujem se tvrtkama BIBUS i Hunor na pomoći pri nabavi komponenti i savjetima o konstrukciji.

Vid Pavlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Vid Pavlović** JMBAG: 0035228634

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje i izrada delta robota s vakuumskom hvataljkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and manufacturing of delta robot with a vacuum gripper**

Opis zadatka:

Roboti s paralelnom kinematskom strukturom (delta roboti), zbog svoje konstrukcije i zatvorenog kinematskog lanca, imaju veću krutost te mogu postići veće radne brzine i ubrzanja, ali uz manji radni prostor. Ovakve vrste robota često na prihvatnici imaju vakuumsku hvataljku te se mogu koristiti za *pick-and-place* operacije. Struktura delta robota ima složeniji dinamički model te zahtijeva složenije algoritme upravljanja od uobičajeno korištenih antropomorfnih struktura robota, čije se djelovanje temelji na serijskoj kinematici. Osnovna konfiguracija delta robota ima tri stupnja slobode gibanja, a programska podrška za upravljanje gibanjem u radnom prostoru uključuje jednadžbe kinematike robota.

U radu je potrebno:

- projektirati delta robot s tri stupnja slobode gibanja koji sadrži vakuumsku hvataljku za prenošenje radnih predmeta glatkih površina
- izvesti i implementirati jednadžbe kinematike robota u upravljački algoritam za upravljanje radom svih aktuatora
- izvesti dinamički model delta robota i provesti simulaciju inverznog dinamičkog modela za provjeru potrebne snage aktuatora
- opisati korištene komponente mehaničkog, pogonskog i upravljačkog dijela sustava
- izraditi delta robot i provjeriti rad sustava u praksi.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predviđeni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Željko Šitum

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc.  Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Strukutra rada	1
1.2. Delta robot.....	1
1.3. Tipovi izvedbi Delta robota i primjene	1
2. DIREKTNA I INVERZNA KINEMATIKA DELTA ROBOTA.....	3
2.1. Opis problema i postava.....	3
2.2. Inverzni kinematički problem	9
2.3. Direktni kinematički problem	11
2.4. Ograničenja kutova zakreta sfernih zglobova	13
2.5. Radni prostor Delta robota	16
2.6. Jacobijeva matrica.....	17
3. DINAMIČKI MODEL DELTA ROBOTA.....	20
3.1. Dinamički model i pretpostavke modela	20
3.2. Proračun dinamičkog modela Delta robota.....	21
4. KONSTRUKCIJA I KOMPONENTE STVARNOG ROBOTA	25
4.1. Konstrukcija robota.....	25
4.1.1. Nosač.....	25
4.1.2. Baza.....	26
4.1.3. Nadlaktica robota	27
4.1.4. Podlaktica robota	27
4.1.5. Platforma.....	28
4.1.6. Upravljački ormar	29
4.1.7. Potpuni CAD model robota	30
4.2. Komponente robota.....	33
4.2.1. Aktuatori robota	33
4.2.2. Pneumatski i vakuumski sustav robota	34
4.2.2.1. Ejektor.....	34
4.2.2.2. Pneumatski ventil.....	35
4.2.2.3. Proračun sile hvatanja predmeta	36
4.2.3. Elektroničke komponente	38
4.2.3.1. ESP-32 mikroupravljač.....	38
4.2.3.2. Driver DRV8825 za koračne motore	40
5. SIMULACIJA DELTA ROBOTA	42

5.1. Simulacija trajektorije zadane u vanjskim koordinatama robota s kružnom provjerom kinematike.....	42
5.2. Simulacija trajektorija s trapeznim profilom brzine zadane u unutarnjim koordinatama robota	45
5.2.1. Kretanja po vertikalnoj osi.....	45
5.2.2. Kretanja u ravnini prvog člana robota	48
5.2.3. Kretanja u prostoru	51
5.3. Simulacija trajektorija s trokutnim profilom brzine zadane u unutarnjim koordinatama robota	54
6. POJAŠNENJE KODA ZA UPRAVLJANJE	59
6.1. Korištene biblioteke	59
6.1.1. Math.h biblioteka	59
6.1.2. AccelStepper biblioteka	59
6.2. Tok programa	59
7. RAČUNALNI PROGRAM ZA UPRAVLJANJE S ROBOTOM	62
8. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA.....	65
PRILOZI.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tipovi izvedbe Delta robota [2]	2
Slika 2.	Pojednostavljeni kinematski model Delta robota [2]	3
Slika 3.	Postava baze (lijevo) i platforme (desno) kinematičkog problema [2]	4
Slika 4.	Postava rješenja inverzne kinematske Delta robota [3].....	9
Slika 5.	Pomak vrha vakuumske hvataljke od kinematskog središta prihvatnice	11
Slika 6.	Postava direktnog kinematskog problema Delta robota [2]	12
Slika 7.	Kut zakreta sfernog zgloba β	14
Slika 8.	Geometrijski prikaz računanja kuta zakreta sfernih zglobova β	15
Slika 9.	Konstruktivna izvedba sfernih zglobova kod KUKA KR Delta robota [4]	15
Slika 10.	Radno područje Delta robota bez ograničenja	16
Slika 11.	Radno područje Delta robota s ograničenjem	17
Slika 12.	Pretpostavka dinamičkog modela.....	20
Slika 13.	Sile koje djeluju na platformu robota	22
Slika 14.	Slike koje djeluju na nadlakticu robota	23
Slika 15.	Nosač robota u CAD-u	25
Slika 16.	Baza robota u CAD-u	26
Slika 17.	Nadlaktica robota u CAD-u.....	27
Slika 18.	Podlaktica robota u CAD-u	28
Slika 19.	Platforma robota s vakuumskom hvataljkom u CAD-u	29
Slika 20.	Upravljački ormar.....	30
Slika 21.	CAD model Delta robota.....	31
Slika 22.	Izrađeni Delta robot.....	32
Slika 23.	Koračni motor s reduktorom [6].....	33
Slika 24.	Krivulja momenta koračnog motora [6].....	34
Slika 25.	Ejektor PIAB piINLINE MICRO Ti [7]	35
Slika 26.	Elektro-pneumatski 3/2 ventil [8].....	36
Slika 27.	Sile koje djeluju na nošeni predmet	37
Slika 28.	ESP32 mikrokontroler [9]	39
Slika 29.	Driver DRV8825 za koračne motore [10].....	40
Slika 30.	Pozicije, brzine i akceleracije trajektorije u vanjskim koordinatama robota	43
Slika 31.	Pozicije, brzine i akceleracije članova robota u unutarnjim koordinatama na zadanu trajektoriju u vanjskim koordinatama.....	43
Slika 32.	Kut zakreta sfernih zglobova β pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota.....	44
Slika 33.	Momenti članova robota i njihove komponente pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota s masom tereta od 0,4 kg.....	44
Slika 34.	Momenti reducirani na izlazno vratilo motora pri kretnji zadanoj u vanjskim koordinatama robota.....	45
Slika 35.	Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine	46
Slika 36.	Pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine.....	46
Slika 37.	Maksimalna masa tereta pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine	47
Slika 38.	Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg	47

Slika 39.	Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg	48
Slika 40.	Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u ravnini prvog člana robota s trapeznim profilom brzine	49
Slika 41.	Pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u ravnini prvog člana robota s trapeznim profilom brzine.....	49
Slika 42.	Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg	50
Slika 43.	Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine	50
Slika 44.	Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine	51
Slika 45.	Pozicije, brzine i akceleracije u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine	52
Slika 46.	Kut zakreta sfernih zglobova β pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine	52
Slika 47.	Maksimalna masa tereta pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine	53
Slika 48.	Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg	53
Slika 49.	Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine	54
Slika 50.	Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine	55
Slika 51.	Pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine	55
Slika 52.	Maksimalna masa tereta pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine.....	56
Slika 53.	Kut zakreta sfernih zglobova β pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine	56
Slika 54.	Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg	57
Slika 55.	Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine	57
Slika 56.	Dijagram toka rada mikrokontrolera	60
Slika 57.	Izgled korisničkog sučelja programa za upravljanje robotom.....	62
Slika 58.	Primjer izgleda programa u tekstualnoj datoteci	63

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Kinematski parametri robota	4
Tablica 2.	Dinamički parametri robota.....	21
Tablica 3.	Karakteristike koračnog motora [6]	33
Tablica 4.	Karakteristike PIAB ejektora [7].....	35
Tablica 5.	Karakteristike ventila [8].....	36
Tablica 6.	Usporedba Arduino Uno, Due i ESP-32 mikrokontrolera [9].....	39
Tablica 7.	Usporedba potrebnog vremena za rješavanje kinematičkih problema Arduino Uno i ESP32 mikrokontrolera	40
Tablica 8.	Karakteristike drivera DRV8825 za koračne motore [10]	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_i, B_i, P_i	m	Točke u kinematskom modelu robota
A_{vi}	m	Translatirane točke A_i za računanje direktne kinematike
A	-	Matrica
a, b, c	m	Pomoćne konstante
B	m	Točka ishodišta koordinatnog sustava baze
B	-	Matrica
d	m	Promjer vakuumske hvataljke
E_i, F_i, G_i	m	Pomoćne konstante za računanje inverzne kinematike
F_n	N	Sila uslijed inercije platforme robota
F_p	N	Maksimalna sila hvatanja
$F_{p,min}$	N	Minimalna potrebna sila hvatanja
G_n	N	Težina prihvatnice
g	m/s ²	Konstanta gravitacijskog ubrzanja
I_b	kg m ²	Moment inercije nadlaktice robota
J	-	Jacobijeva matrica
L	m	Duljina nadlaktice robota
l	m	Duljina podlaktice robota
m_b	kg	Masa nadlaktice robota
m_c	kg	Masa zgloba na kraju nadlaktice
m_{fb}	kg	Masa podlaktice robota
m_n	kg	Masa platforme robota
m_{nt}	kg	Masa platforme s masom tereta i dijelom masa podlaktica
m_{teret}	kg	Masa tereta
N	-	Prijenosni omjer remenskog prijenosa
p_{rel}	Pa	Relativni vakuum
r_{gb}	m	Pozicija centra mase nadlaktice
T	Nm	Ukupni vektor momenta članova robota
T_b	Nm	Vektor momenta uslijed inercije nadlaktice robota
T_{Gb}	Nm	Vektor momenta uslijed težine nadlaktice robota
T_{Gn}	Nm	Vektor momenta uslijed težine platforme robota
$T_{mot,i}$	Nm	Moment i-tog člana reduciran na izlazno vratilo motora
T_n	Nm	Vektor momenta uslijed inercije platforme robota
$t_{evak,70}$	s/L	Vrijeme evakuacije pri relativnom vakuumu od -70 kPa
t_{vak}	s	Vrijeme postizanja vakuuma od -70 kPa
V	cm ³	Volumen vakuumske hvataljke

w_B, u_B, s_B	m	Konstante geometrije baze robota
w_P, u_P, s_P	m	Konstante geometrije platforme robota
\mathbf{q}	rad	Vektor upravljanih koordinata robota
q_i	rad	Unutarnje koordinate robota
x, y, z	m	Vanjske koordinate robota
x_{0i}	m	Pomak po x-osi u koordinatnom sustavu i -tog člana
\mathbf{x}	m	Vektor vanjskih koordinata robota
β_i	°	Kut zakreta sfernih zglobova i -tog člana

SAŽETAK

U radu je opisan proces izrade makete Delta robota. Izvedene su jednađbe kinematike i dinamike robota. Dinamički model izvodi se pomoću principa virtualnog rada pomoću Jacobijeve matrice. Opisana je konstrukcija makete, korišteni dijelovi, te rad upravljačkog programa. Provedena je simulacija inverzne dinamike robota na nekoliko putanji i trajektorija zadanih u vanjskim i unutarnjim koordinatama robota, te se promatraju momenti potrebni za ostvarivanje kretnji, nosivost vakuumske hvataljke, kutovi zglobnih glava te pozicije, brzine i akceleracije u vanjskim koordinatama robota. Objašnjen je tok rada programa ESP 32 mikrokontrolera, princip komunikacije s robotom te strategije upravljanja robotom. Razvijena je računalna aplikacija, koja omogućava jednostavno upravljanje s robotom, te nudi mogućnost pisanja i izvođenje jednostavnih programa.

Ključne riječi: Delta robot, kinematika, dinamika, Arduino, vakuumska hvataljka

SUMMARY

The paper describes the process of making a model of the Delta robot. The equations of kinematics and dynamics of the robot are derived. The dynamic model is made using the principle of virtual work with the help of the Jacobi matrix. The design of the model, the parts used, and the operation of the control program are described. A simulation of the inverse dynamics of the robot was carried out on several paths and trajectories given in the external and internal coordinates of the robot, and the torques required to realize the movements, the load capacity of the vacuum gripper, the angles of the rod ends and the positions, speeds and accelerations in the external coordinates of the robot were observed. The work flow of the ESP 32 microcontroller program, communication with the robot and the strategies of controlling the robot are explained. A computer application was developed, which enables easy control of the robot, and offers the possibility of writing and running simple programs.

Key words: Delta robot, kinematics, dynamics, Arduino, vacuum gripper

1. UVOD

1.1. Struktura rada

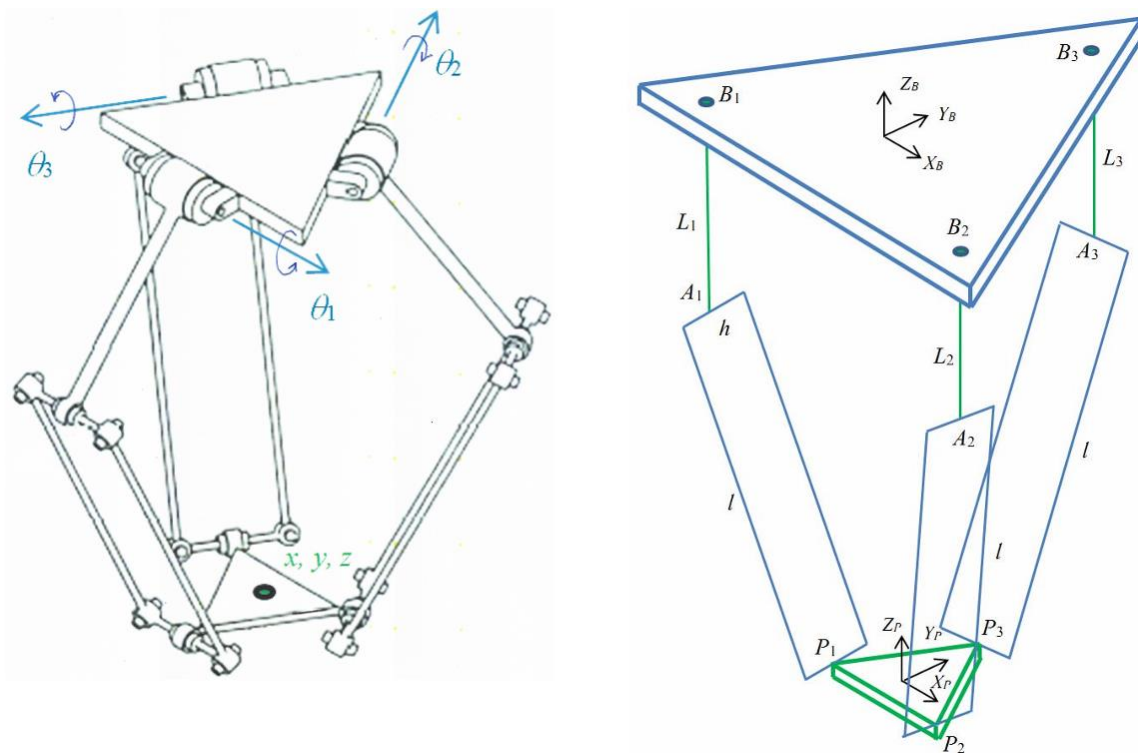
U prvom poglavlju opisane su značajke Delta robota. Drugo poglavlje sadrži rješenje direktnog i inverznog kinematskog problema Delta robota, kao i izvod Jacobijeve matrice. U trećem poglavlju izvodi se dinamika Delta robota. Četvrto poglavlje sadrži opis konstrukcije, korištene elektroničke i pneumatske komponente, te proračun vakuumske hvataljke. U petom poglavlju provodi se simulacija inverzne dinamike robota. Šesto poglavlje sadržava pojašnjenje Arduino koda i princip upravljanja robotom. U sedmom poglavlju prikazana je računalna aplikacija za upravljanje robotom.

1.2. Delta robot

Za razliku od serijskih robotskih manipulatora, gdje su članovi robota povezani u seriju, Delta robot paralelne je kinematske strukture. Kod robotskih manipulatora paralelne kinematske strukture, platforma, to jest, prihvatnica, povezana je s bazom s najmanje dva neovisna kinematska lanca, gdje uglavnom jedan aktuator upravlja jednim kinematskim lancem (članom robota), te je aktuator smješten na bazi robota. Jedno od najvećih otkrića paralelnih robota i mehanizama pojavilo se 1960-ih godina pod nazivom Stewart-ova platforma, manipulator koji se koristio za simulatore leta aviona. Izum Delta robota pojavio se 1980-ih godina od tima istraživača koje je vodio Raymond Clavel na École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švicarska. Predstavljena je ideja korištenja paralelograma za stvaranje robota paralelne kinematske strukture s tri translacijska i jednim rotacijskim stupnjem slobode gibanja. Mehanizam paralelograma omogućava da dvije stranice paralelograma imaju istu orijentaciju. Time se dobivaju tri translacijska stupnja slobode gibanja Delta robota, dok se rotacija postiže postavljanjem aktuatora na platformu. Zbog male mase nadlaktica i podlaktica robota, uz aktuatora koji su smješteni na bazi robota, omogućuju da Delta robot postiže velike akceleracije na platformi, te uobičajeno ima manju nosivost [1].

1.3. Tipovi izvedbi Delta robota i primjene

Postoje razne izvedbe i tipovi paralelnih robota. Kod Delta robota najčešće su izvedbe s rotacijskim nadlakticama. Slika 1. prikazuje dva tipa izvedbe Delta robota.



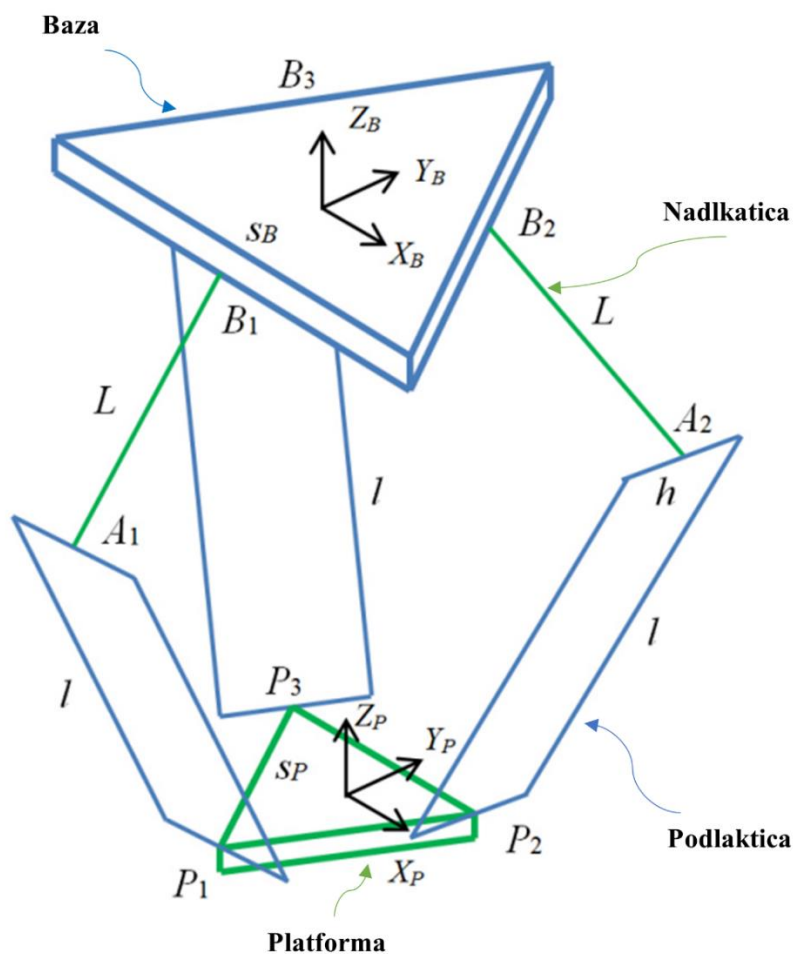
Slika 1. Tipovi izvedbe Delta robota [2]

Na slici 1. lijevo može se vidjeti izvedba Delta robota s rotacijskim nadlakticama, koja se najčešće koristi kod industrijskih Delta robota. Na slici 1. desno može se vidjeti izvedba Delta robota koji umjesto rotacijskih nadlaktica koristi linearne prizmatične zglbove/aktuatore koji su najčešći kod 3D printera Delta strukture. Rješenje inverzne i direktne kinematike pojednostavljuje se za slučaj s prizmatičnim zglobovima.

2. DIREKTNA I INVERZNA KINEMATIKA DELTA ROBOTA

2.1. Opis problema i postava

Kako bi se odredio položaj platforme ili vrha alata robota u odnosu na bazu robota, potrebno je riješiti inverzni i direktni kinematički problem. Direktnom kinematikom dobiva se položaj i orijentacija prihvatnice u vanjskim koordinatama robota x , y i z za zadane unutarnje koordinate robota q_1 , q_2 i q_3 , što su u ovom slučaju kutovi zakreta motora. Inverzna kinematika vraća unutarnje koordinate robota za zadane vanjske koordinate robota. Za robote s više stupnjeva slobode gibanja, osim pozicije u prostoru, može se zadati ili tražiti i orijentacija alata, koja je najčešće definirana Eulerovim kutovima. U ovom radu, konfiguracija Delta robota ima 3 stupnja slobode gibanja, to jest, može translirati po tri osi. Slika 2. prikazuje pojednostavljeni kinematski model Delta robota.



Slika 2. Pojednostavljeni kinematski model Delta robota [2]

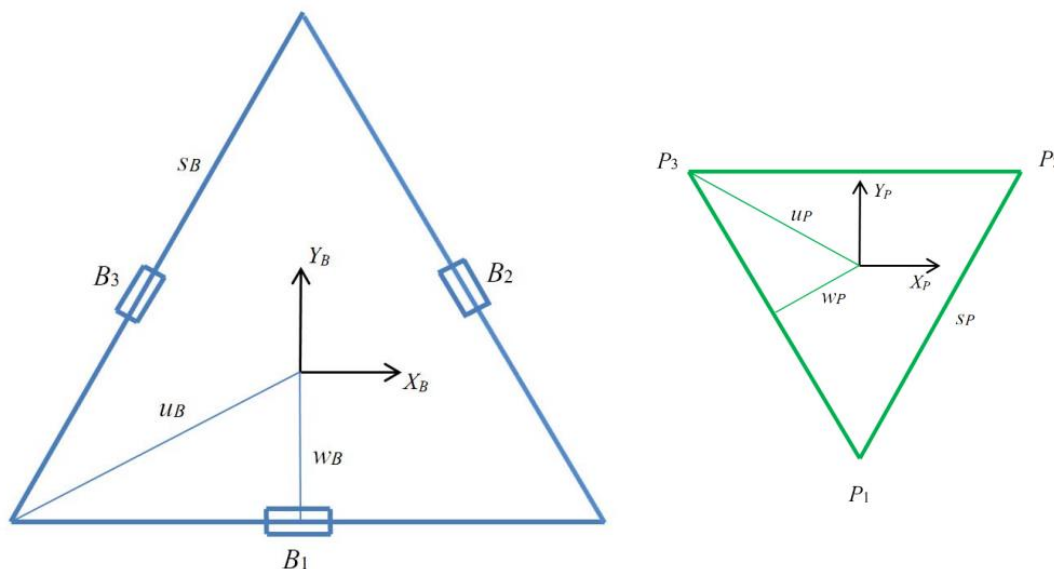
Zglobovi s oznakom B_i rotiraju oko osi koje čine stranice jednakostraničnog trokuta baze, dok zglobovi s oznakom A_i i P_i su sferni zglobovi, to jest, zglobne glave, koje mogu rotirati oko tri osi. Zglobne glave mogu slobodno rotirati oko jedne osi, te uobičajeno imaju ograničenje zakreta od otprilike 20° oko ostale dvije osi, što je bitno kod inverzne i direktne kinematike, kao i kod računanja radnog područja robota. Tablica 1. prikazuje bitne kinematske parametre robota.

Tablica 1. Kinematski parametri robota

Oznaka	Vrijednost	Opis
L	230 mm	Duljina nadlaktice
l	544 mm	Duljina podlaktice
w_B	141 mm	Radius upisane kružnice baze
w_P	26,25 mm	Radius upisane kružnice platforme

U tablici 1. mogu se vidjeti parametri na kojima se zasniva proračun inverznog i direktnog kinematskog problema, uz parametre unutarnjih i vanjskih koordinata robota. Sljedeće jednačbe za direktni i inverzni kinematički problem Delta robota preuzete su iz [2].

Slika 3. prikazuje postavu pomoćnih varijabli kod jednakostraničnih trokuta baze i platforme.



Slika 3. Postava baze (lijevo) i platforme (desno) kinematičkog problema [2]

Na slici 3. može se vidjeti kinematski model baze i platforme robota. Točke B_1 , B_2 i B_3 predstavljaju aktuatora, to jest, zglobove vratila nadlaktice robota. Na slici 3. mogu se vidjeti i točke P_1 , P_2 i P_3 , koje predstavljaju sferne zglobove na platformi. Uz ulazne parametre iz Tablica 1., dobivaju se sljedeći pomoćni parametri koji opisuju geometriju baze i platforme robota:

$$s_B = \frac{6}{\sqrt{3}} w_B, \quad (1)$$

$$u_B = 2w_B, \quad (2)$$

$$s_P = \frac{6}{\sqrt{3}} w_P, \quad (3)$$

$$u_P = 2w_P. \quad (4)$$

Koordinate točaka B_i u koordinatnom sustavu baze B dobivaju se vektorima:

$${}^B \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^B \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} w_B \\ \frac{1}{2} w_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^B \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} w_B \\ \frac{1}{2} w_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Koordinate točaka P_i u koordinatnom sustavu platforme P proizlaze iz vektora:

$${}^P \mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -u_P \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^P \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} \frac{s_P}{2} \\ 2 \\ w_P \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^P \mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{s_P}{2} \\ w_P \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Kao što prikazuje Slika 2., vrijede sljedeće tri jednačbe zatvorene vektorske petlje [2]:

$$\{ {}^B \mathbf{B}_i \} + \{ {}^B \mathbf{L}_i \} + \{ {}^B \mathbf{1}_i \} = \{ {}^B \mathbf{P}_P \} + \{ {}^P \mathbf{P}_i \}. \quad (11)$$

Tri jednačbe ograničenja osiguravaju da podlaktice imaju konstantnu duljinu, pa se dobije:

$$L_i = \left\| \{ {}^B \mathbf{1}_i \} \right\| = \left\| \{ {}^B \mathbf{P}_P \} + \{ {}^P \mathbf{P}_i \} - \{ {}^B \mathbf{B}_i \} - \{ {}^B \mathbf{L}_i \} \right\|, \quad (12)$$

te se jednačba (12) također može zapisati u sljedećem obliku:

$$L_i^2 = \left\| \{ {}^B \mathbf{1}_i \} \right\|^2 = L_{ix}^2 + L_{iy}^2 + L_{iz}^2. \quad (13)$$

Vektori od točaka B_i do točaka A_i glase:

$${}^B \mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -L \cos(q_1) \\ -L \sin(q_1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^B \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos(q_2) \\ \frac{1}{2} L \cos(q_2) \\ -L \sin(q_2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^B \mathbf{L}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} L \cos(q_3) \\ \frac{1}{2} L \cos(q_3) \\ -L \sin(q_3) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Može se vidjeti da vektori u jednadžbama (14), (15) i (16) ovise o unutarnjim koordinatama robota q_1 , q_2 i q_3 . Točka P . to jest, vektor ${}^B \mathbf{P}_P$, predstavlja koordinatu platforme u koordinatnom sustavu baze B , koja glasi:

$${}^B \mathbf{P}_P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Uvrštavanjem prethodnih izraza u jednadžbu (11), dobiju se vektori od točkaka A_i do točkaka P_i :

$$\{ {}^B \mathbf{I}_1 \} = \begin{bmatrix} x \\ y + L \cos(q_1) + a \\ z + L \sin(q_1) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\{ {}^B \mathbf{I}_2 \} = \begin{bmatrix} x - \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos(q_2) + b \\ y - \frac{1}{2} L \cos(q_2) + c \\ z + L \sin(q_2) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\{ {}^B \mathbf{I}_3 \} = \begin{bmatrix} x + \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos(q_3) - b \\ y - \frac{1}{2} L \cos(q_3) + c \\ z + L \sin(q_3) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

gdje su pomoćne varijable:

$$a = w_B - u_P, \quad (21)$$

$$b = \frac{s_P}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} w_B, \quad (22)$$

$$c = w_P - \frac{1}{2}w_B. \quad (23)$$

Time se dobivaju tri jednačbe ograničenja Delta robota [2] :

$$2L(y+a)\cos q_1 + 2zL\sin q_1 + x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 = 0, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} -L(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\cos q_2 + 2zL\sin q_2 + x^2 + \\ y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2xb + 2yc - l^2 = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} L(\sqrt{3}(x-b) - y-c)\cos q_3 + 2zL\sin q_3 + x^2 + \\ y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - 2xb + 2yc - l^2 = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

S jednačbama (24), (25) i (26) formira se rješenje inverznog i direktnog kinematskog problema. Točke A_i u koordinatnom sustavu baze dobiju se preko jednačbe:

$${}^B \mathbf{A}_i = {}^B \mathbf{B}_i + {}^B \mathbf{L}_i, \quad (27)$$

gdje su:

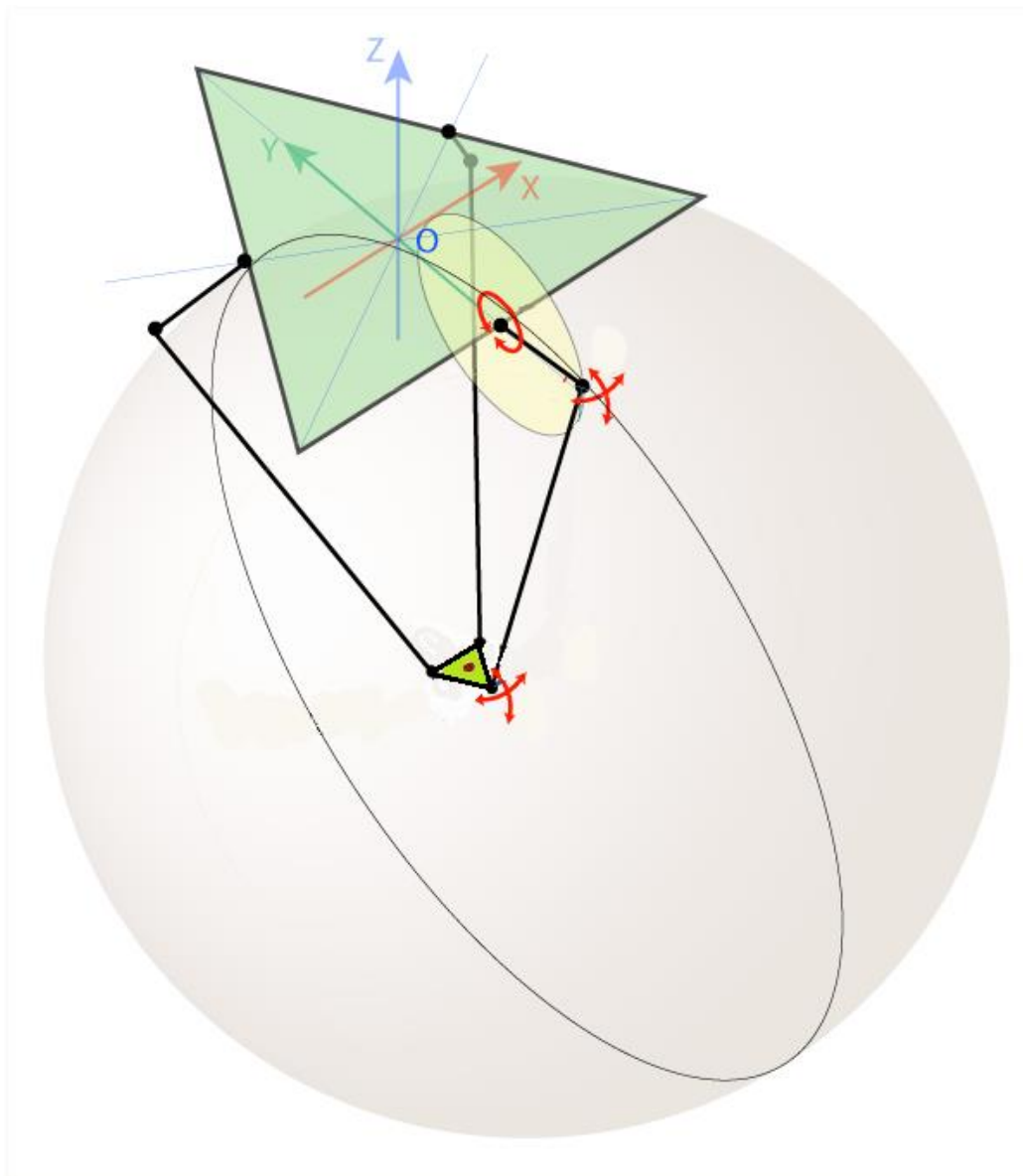
$${}^B \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B - L\cos(q_1) \\ -L\sin(q_1) \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$${}^B \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L\cos(q_2)) \\ \frac{1}{2}(w_B + L\cos(q_2)) \\ -L\sin(q_2) \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$${}^B \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L\cos(q_3)) \\ \frac{1}{2}(w_B + L\cos(q_3)) \\ -L\sin(q_3) \end{bmatrix}, \quad (30)$$

2.2. Inverzni kinematički problem

Ishodište koordinatnog sustava baze nalazi se u sredini jednakostraničnog trokuta baze. Ravnina jednakostraničnog trokuta baze robota u stvarnoj konstrukciji nalazi se u ravnini u kojoj leže središta ležajeva zglobova B_i . Rješenje inverznog kinematičkog problema dobiva se traženjem sjecišta dviju kružnica: prva kružnica s centrom u točki B_i i radijusom L , te druga kružnica koja se nalazi u sferi s centrom u točki P_i , te radijusom l . Slika 4. prikazuje postavu rješenja inverzne kinematike.



Slika 4. Postava rješenja inverzne kinematske Delta robota [3]

Na slici 4. može se vidjeti da je rješenje inverznog kinematskog problema sjecište kružnice koja se nalazi na sferi i kružnice koja predstavlja rotaciju nadlaktice robota. Rješenje inverznog kinematskog problema može se dobiti za svaki član robota zasebno, te je jednostavnije od direktnog kinematskog problema. Tri neovisne skalarne jednačbe za rješenje inverznog kinematičkog problema proizlaze iz jednačbi (24), (25) i (26), te glase [2] :

$$E_i \cos(q_i) + F_i \sin(q_i) + G_i = 0, \quad (31)$$

za $i = 1,2,3$, gdje su pomoćne varijable:

$$E_1 = 2L(y + a), \quad (32)$$

$$F_1 = 2zL, \quad (33)$$

$$G_1 = x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2, \quad (34)$$

$$E_2 = -L(\sqrt{3}(x+b) + y + c), \quad (35)$$

$$F_2 = 2zL, \quad (36)$$

$$G_2 = x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(xb + yc) - l^2, \quad (37)$$

$$E_3 = L(\sqrt{3}(x-b) - y - c), \quad (38)$$

$$F_3 = 2zL, \quad (39)$$

$$G_3 = x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(-xb - yc) - l^2. \quad (40)$$

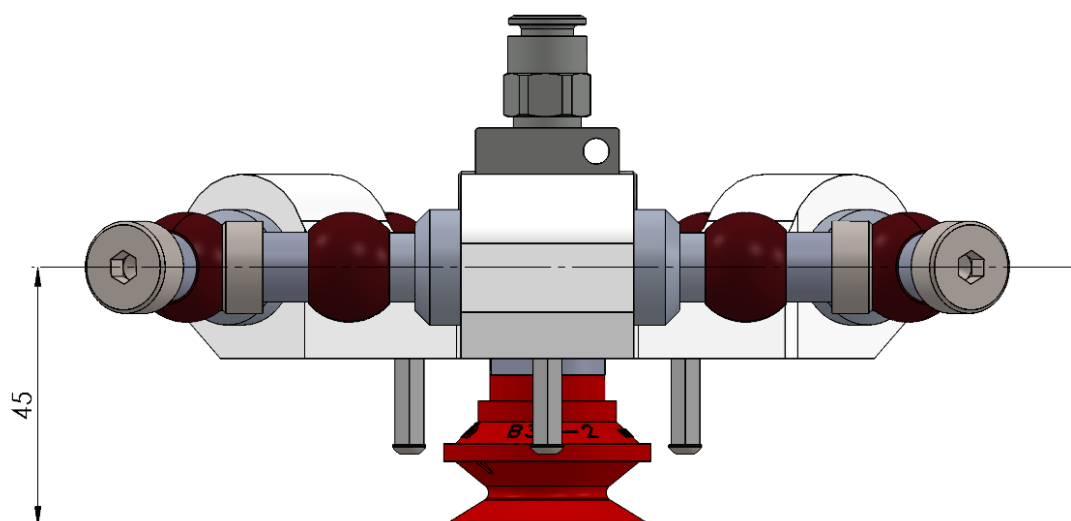
Koristeći zamjenu tangensa polukuta, dobiva se kvadratna jednačba [2]:

$$t_{i,2} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i}, \quad (41)$$

čija se rješenja uvrštavaju u konačnu jednačbu za rješenje inverznog kinematskog problema:

$$q_i = 2 \tan(t_i)^{-1}. \quad (42)$$

Za svaki od članova robota dobiju se dva rješenja kuta zakreta aktuatora. Odabire se rješenje koje je unutar dopuštenih kutova zakreta, to jest, kut pri kojem su točke A_i svih članova robota izbočene [2]. Rješenje inverznog kinematičkog problema nije konačno rješenje za poziciju vrha alata robota. Slika 5. prikazuje pomak vrha vakuumske hvataljke od točke P .

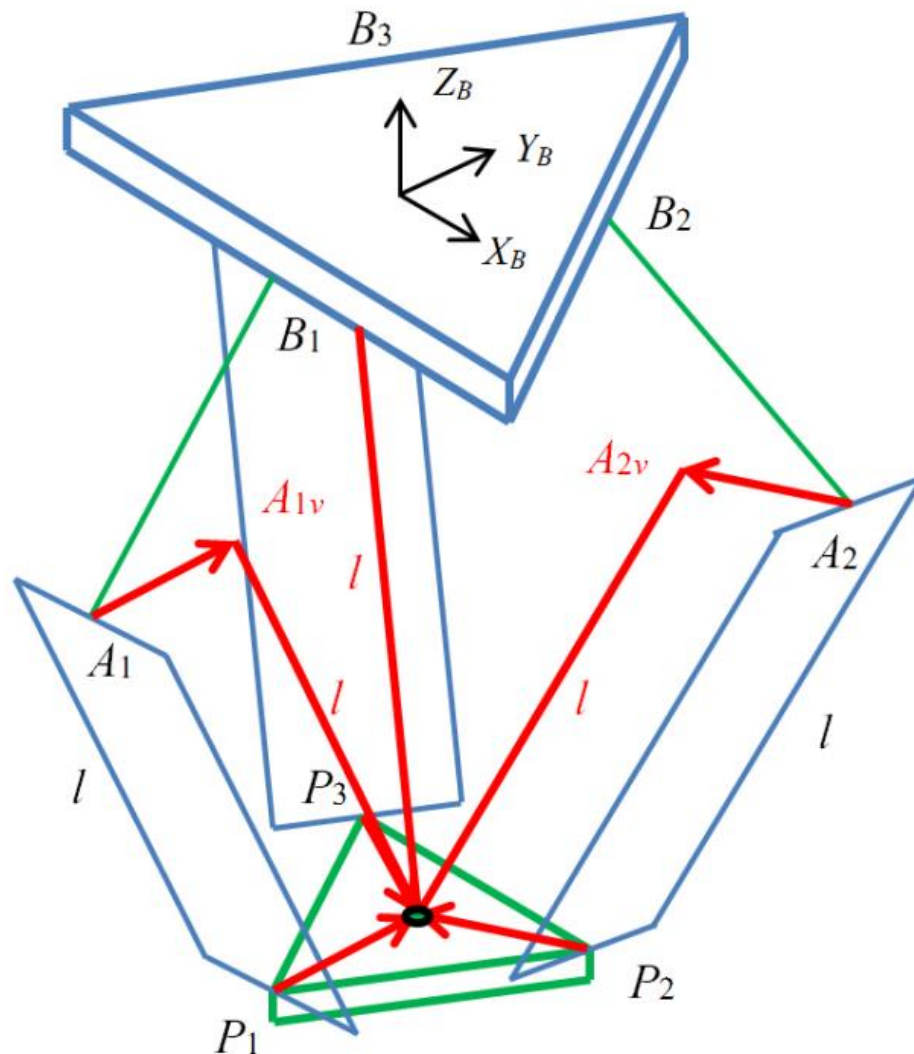


Slika 5. Pomak vrha vakuumske hvataljke od kinematskog središta prihvatnice

Na slici 5. može se vidjeti da se točke P i P_i nalaze u ravnini prihvatnice kod sfernih zglobova, to jest, navojnih cjevčica na kojima su pričvršćene kuglice sfernih zglobova. Vrh alata robota je na kraju vakuumske hvataljke. Pri rješavanju inverznog kinematičkog problema za željenu točku u vanjskim koordinatama robota, od z koordinate željene točke dodaje se razlika između točke P kod postavljenog problema inverzne kinematike i vrha alata prihvatnice. Također, u slučaju kad robot drži predmet pomoću vakuumske hvataljke, potrebno je obratiti pažnju na deformaciju vakuumske hvataljke, gdje se vakuumska hvataljka uvlači u pozitivnom smjeru z osi.

2.3. Direktni kinematički problem

Kod direktnog kinematičkog problema traži se pozicija robota u vanjskim koordinatama robota x , y i z za zadane unutarnje koordinate robota q_1 , q_2 i q_3 . Kod Delta robota, direktni kinematički problem kompliciraniji je od inverznog kinematskog problema. Slika 6. prikazuje postavu direktnog kinematičkog problema.



Slika 6. Postava direktnog kinematskog problema Delta robota [2]

Na slici 6. može se vidjeti da se iz točaka A_i translira prema središtu koordinatnog sustava baze B , paralelno s ravninom prihvatnice, čime je sjecište sfera sa središtem u točkama A_{iv} konačno rješenje za poziciju točke P . Točke A_{iv} u koordinatnom sustavu baze glase:

$${}^B \mathbf{A}_{iv} = \begin{bmatrix} 0 \\ -w_B - L \cos(q_1) + u_p \\ -L \sin(q_1) \end{bmatrix}, \quad (43)$$

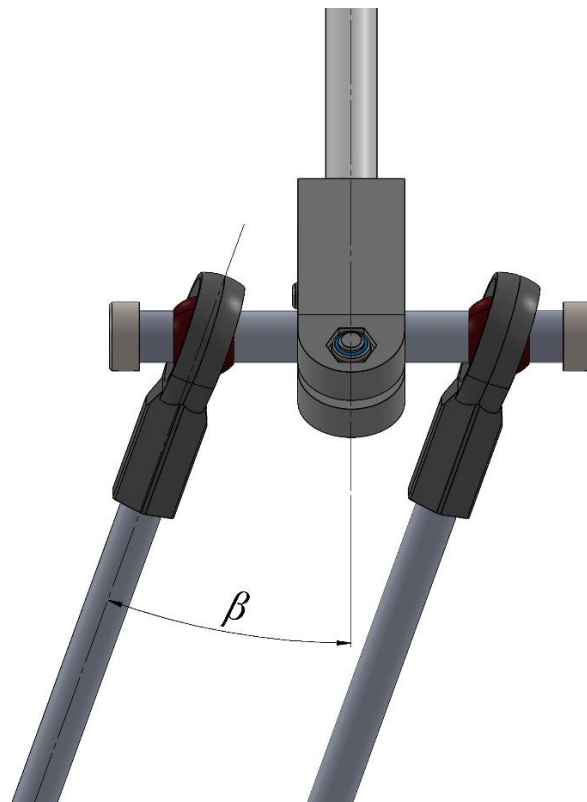
$${}^B \mathbf{A}_{2v} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L \cos(q_2)) - \frac{s_P}{2} \\ \frac{1}{2}(w_B + L \cos(q_2)) - w_P \\ -L \sin(q_2) \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$${}^B \mathbf{A}_{3v} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}(w_B + L \cos(q_3)) + \frac{s_P}{2} \\ \frac{1}{2}(w_B + L \cos(q_3)) - w_P \\ -L \sin(q_3) \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Rješenje direktnog kinematskog problema je presjek triju sfera sa središtem u točkama A_{iv} i radijusom l [2]. Odabire se točno rješenje, gdje je položaj platforme ispod baze robota. Za zadane koordinate u inverznom kinematskom problemu, direktni kinematski problem mora vratiti iste koordinate.

2.4. Ograničenja kutova zakreta sfernih zglobova

Kao što je prije spomenuto, sferni zglobovi A_i i P_i imaju ograničenje svih kutova zakreta oko dvije osi iznosa 20° . Iako zbog malo manjeg promjera koljena kod kuglice zglobne glave, sferni zglob može postići i nešto veće kutove zakreta, ali se zbog sigurnosti pretpostavlja da je maksimalni iznos kuta jednak 20° . Prilikom računanja inverzne kinematike, provjerava se kut β , te ako je iznos kuta veći od dopuštenog, robot bi mogao doći u krivu poziciju ili oštetiti zglobove. Slika 7. prikazuje kut zakreta sfernog zgloba β .

Slika 7. Kut zakreta sfernog zgloba β

Kut β dobiva se preko relacije:

$$\beta_i = \arcsin\left(\frac{x_{0i}}{l}\right) \quad (46)$$

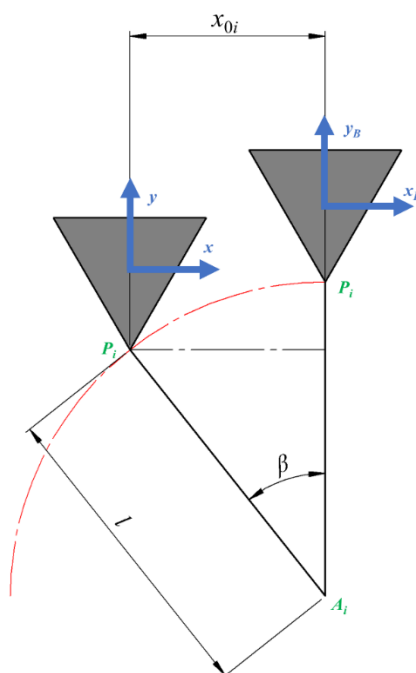
za $i = 1, 2, 3$, gdje su:

$$x_{01} = x, \quad (47)$$

$$x_{02} = x \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + y \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right), \quad (48)$$

$$x_{03} = x \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + y \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right), \quad (49)$$

gdje x_{0i} predstavlja pomak po x-osi lokalnog koordinatnog sustava člana robota. Slika 8. predstavlja geometrijski prikaz računanja kuta zakreta sfernih zglobova β .



Slika 8. Geometrijski prikaz računanja kuta zakreta sfernih zglobova β

Središte sfere je točka A_i s radijusom l , te se pomak od središta koordinatnog sustava baze može dobiti preko x koordinate u rotiranom koordinatnom sustavu točaka A_i . Radi jednostavnosti, zglobovi A_i i P_i izvedeni su kao zglobne glave, koji su standardne komponente. Kako bi se povećao dopušteni kut β , postoje različite moguće konstrukcijske preinake. Slika 9. prikazuje konstrukcijsku izvedu sfernih zglobova kod Kuka KR Delta robota.

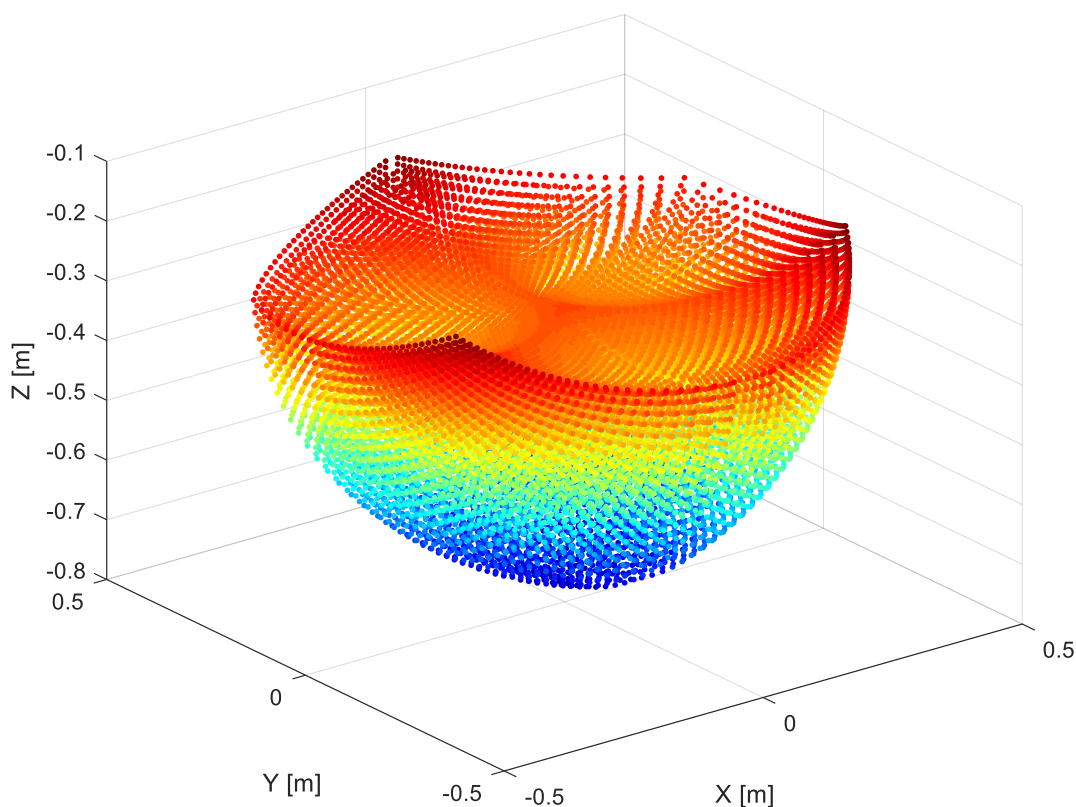


Slika 9. Konstrukcijska izvedba sfernih zglobova kod KUKA KR Delta robota [4]

Na slici 9. može se vidjeti da se pozicija kuglice i kućišta sfernog zgloba održavaju pomoću dodirne sile koju stvara opruga koja povezuje podlaktice Delta robota, te se time omogućuje puno veći kut zakreta sfernih zglobova. Drugo rješenje bilo bi povećati duljinu podlaktica ili zglobne glave zamijeniti sa zglobom kardana.

2.5. Radni prostor Delta robota

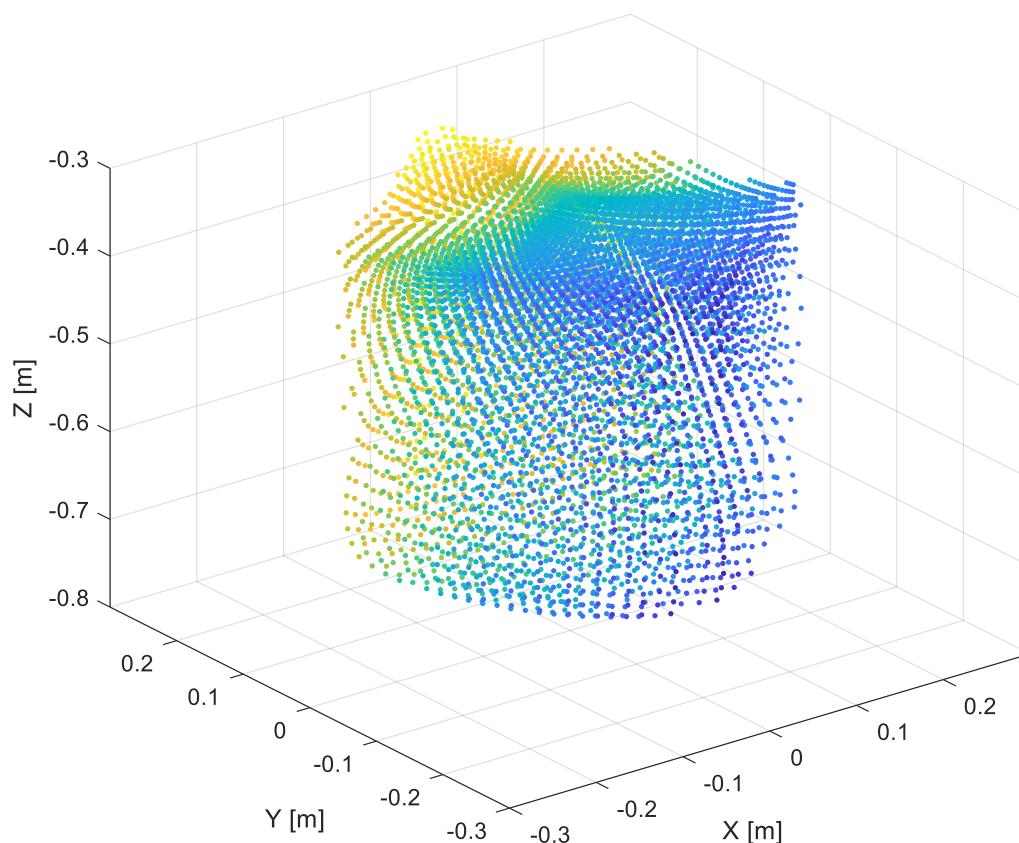
Kako bi se pozicija robota u prostoru za zadanu operaciju mogla odrediti, potrebno je poznavati radno područje robota. Radno područje Delta robota u ovom slučaju određuje se pomoću MATLAB funkcije koja pomoću direktne kinematike iterira kroz kutove zakreta motora q_i od -60° do 90° po koraku od 5° za sve članove Delta robota. Slika 10. prikazuje radno područje Delta robota bez ograničenja.



Slika 10. Radno područje Delta robota bez ograničenja

Kao što prikazuje Slika 10., radno područje Delta robota u oba smjera x i y osi dostiže vrijednosti do 450 mm, te vrijednosti od -200 mm do -760 mm u smjeru z osi. Mijenjanjem kinematskih parametra iz Tablice 1., moguće je mijenjati radni prostor. Kad se uvedu

ograničenja kutova zakreta β , prostor se smanjuje. Slika 11. prikazuje radni prostor Delta robota s ograničenjima.



Slika 11. Radno područje Delta robota s ograničenjem

Na slici 11. može se vidjeti da se radni prostor drastično smanjio. Radni prostor s ograničenjem ima oblik šesterokuta s promjerom upisane kružnice od 370 mm, te je z os ograničena od približno -350 mm do -750 mm.

2.6. Jacobijeva matrica

Jacobijeva matrica predstavlja vezu između brzina i/ili akceleracija u vanjskim koordinatama i brzina/akceleracija u unutarnjim koordinatama robota. Koristeći jednadžbe ograničenja Delta robota koja povezuje vanjske i unutarnje koordinate može se dobiti Jacobijeva matrica. Derivirajući jednadžbe (24), (25) i (26) po vremenu, dobije se:

$$2L\dot{y} \cos q_1 - 2L(y+a)\dot{q}_1 \sin q_1 + 2L\dot{z} \sin q_1 + 2Lz\dot{q}_1 \cos q_1 + 2x\dot{x} + 2(y+a)\dot{y} + 2z\dot{z} = 0, \quad (50)$$

$$-L(\sqrt{3}\dot{x} + \dot{y}) \cos q_2 + L(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\dot{q}_2 \sin q_2 + 2L\dot{z} \sin q_2 + 2Lz\dot{q}_2 \cos q_2 + 2(x+b)\dot{x} + 2(y+c)\dot{y} + 2z\dot{z} = 0, \quad (51)$$

$$L(\sqrt{3}\dot{x} - \dot{y}) \cos q_3 - L(\sqrt{3}(x-b) - y-c)\dot{q}_3 \sin q_3 + 2L\dot{z} \sin q_3 + 2Lz\dot{q}_3 \cos q_3 + 2(x-b)\dot{x} + 2(y+c)\dot{y} + 2z\dot{z} = 0 \quad (52)$$

Kad se jednažbe (50), (51) i (52) zapišu u obliku matrica:

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} \quad (53)$$

gdje su matrice \mathbf{A} i \mathbf{B} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x & y+a+L\cos q_1 & z+L\sin q_1 \\ 2(x+b)-\sqrt{3}L\cos q_2 & 2(y+c)-L\cos q_2 & 2(z+L\sin q_2) \\ 2(x-b)+\sqrt{3}L\cos q_3 & 2(y+c)-L\cos q_3 & 2(z+L\sin q_3) \end{bmatrix}, \quad (54)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix}, \quad (55)$$

Pri čemu su koeficijenti matrice \mathbf{B} jednaki:

$$b_{11} = L[(y+a)\sin q_1 - z\cos q_1], \quad (56)$$

$$b_{22} = -L[(\sqrt{3}(x+b) + y+c)\sin q_2 + 2z\cos q_2], \quad (57)$$

$$b_{33} = L[(\sqrt{3}(x-b) - y-c)\sin q_3 - 2z\cos q_3]. \quad (58)$$

Jacobijeva matrica \mathbf{J} dobije se preko sljedećeg izraza:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}. \quad (59)$$

Deriviranjem izraza (50), (51) i (52) još jednom po vremenu, dobije se veza između akceleracija u vanjskim koordinatama i unutarnjim koordinatama:

$$\dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{A}\ddot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{B}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{q}} \quad (60)$$

gdje su matrice $\dot{\mathbf{A}}$ i $\dot{\mathbf{B}}$ jednake:

$$\dot{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} - L\sin(q_1)\dot{q}_1 & \dot{z} + L\cos(q_1)\dot{q}_1 \\ 2\dot{x} + \sqrt{3}L\sin(q_2)\dot{q}_2 & 2\dot{y} + L\sin(q_2)\dot{q}_2 & 2\dot{z} + L\cos(q_2)\dot{q}_2 \\ 2\dot{x} - \sqrt{3}L\sin(q_3)\dot{q}_3 & 2\dot{y} + L\sin(q_3)\dot{q}_3 & 2\dot{z} + L\cos(q_3)\dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$\dot{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \dot{b}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{b}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{b}_{33} \end{bmatrix} \quad (62)$$

Pri čemu su:

$$\dot{b}_{11} = L((a + y)\cos(q_1)\dot{q}_1 + z\sin(q_1)\dot{q}_1 + \sin(q_1)\dot{y} - \cos(q_1)\dot{z}). \quad (63)$$

$$\dot{b}_{22} = -L\left[(\sqrt{3}\dot{x} + \dot{y})\sin(q_2)\dot{q}_2 + (c + \sqrt{3}(b + x) + y)\cos(q_2)\dot{q}_2 - 2z\sin(q_2)\dot{q}_2 + 2\cos(q_2)\dot{z}\right] \quad (64)$$

$$\dot{b}_{33} = L\left[(\sqrt{3}\dot{x} - \dot{y})\sin(q_3) + (-c + \sqrt{3}(-b + x) - y)\cos(q_3)\dot{q}_3 + 2z\sin(q_3)\dot{q}_3 - 2\cos(q_3)\dot{z}\right] \quad (65)$$

Jednadžba (60) može se zapisati kao:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^{-1}(-\dot{\mathbf{A}}\mathbf{J} + \dot{\mathbf{B}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}}, \quad (66)$$

gdje je $\dot{\mathbf{J}}$ matrica koja se množi s vektorom brzina $\dot{\mathbf{q}}$, i \mathbf{J} je matrica koja se množi s vektorom akceleracija $\ddot{\mathbf{q}}$.

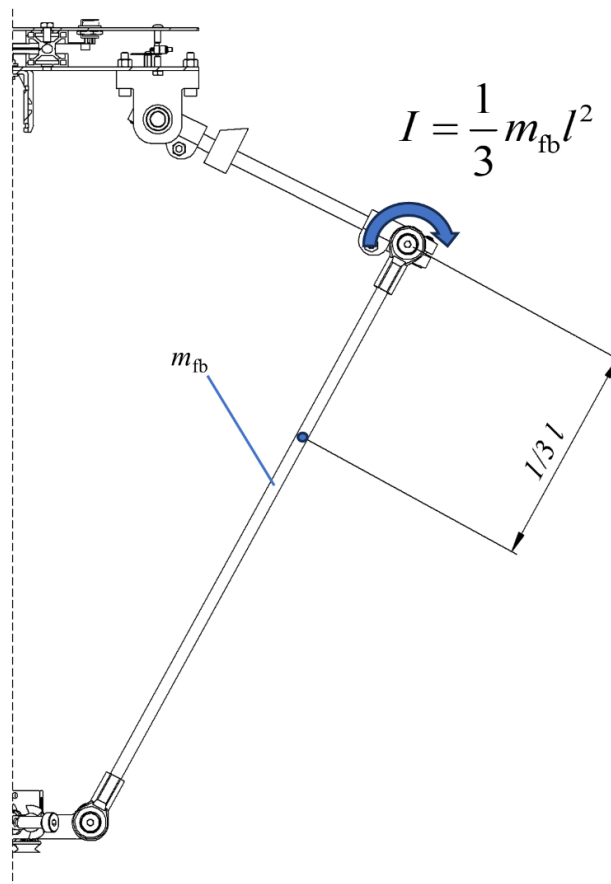
3. DINAMIČKI MODEL DELTA ROBOTA

3.1. Dinamički model i pretpostavke modela

Dinamika robota i mehanizma najčešće se računa s tri različite metode: Newton-Eulerova metoda, Langrangian metoda, te metoda virtualnog rada. Dinamika paralelnih manipulatora kompleksna je zbog zatvorenih kinematskih lanaca, te njihovih ograničenja i izvođenje jednadžbi gibanja sa skupom neovisnih generaliziranih koordinata postaje kompliciranija [1].

Jednadžbe i dinamički model temelje se na [5].

Kako bi se model pojednostavio, uvode se tri pretpostavke. Prva pretpostavka je da se inercija uslijed rotacije podlaktice robota zanemaruje. Slika 12. prikazuje pretpostavku dinamičkog modela.



Slika 12. Pretpostavka dinamičkog modela

Na slici 12. može se vidjeti jedna od osi oko koje podlaktica robota rotira (plava strijelica).

Utjecaj težine podlaktica robota ne smije se zanemariti. Na slici 12. može se vidjeti izraz za

moment tromosti krute šipke. U drugoj pretpostavci masa šipke dijeli se na dvije komponente, gdje nadlaktica robota preuzima 2/3 mase podlaktice, dok platforma preuzima 1/3 mase podlaktice. Time se dinamika robota smanjuje na četiri tijela: platforma i tri nadlaktice robota. Treća pretpostavka je da u sustavu nema trenja, te se gubici zanemaruju [5]. S navedenim pretpostavkama ne unose se značajne greške modeliranja.

Princip virtualnog rada je rad koji rezultira od stvarnih sila kroz virtualni pomak ili virtualnih sila kroz stvarni pomak, gdje pomak može biti translacija ili rotacija, a sila može biti sila ili moment. U području robotike, jednakost virtualnog rada u različitim koordinatnim sustavima glasi [5]:

$$\tau^T \delta \theta = \tau_n^T \delta X_n, \quad (67)$$

gdje je τ sila i/ili moment koji odgovara virtualnom pomaku u unutarnjim koordinatama robota $\delta \theta$, te je τ_n sila ili moment koja djeluje kroz virtualni pomak δX_n u vanjskim koordinatama robota. Koristeći Jacobijevu matricu, koja daje vezu između brzina i akceleracija u unutarnjim i vanjskim koordinatama robota, sile ili momenti u vanjskim koordinatama robota mogu se prebaciti u unutarnje koordinate robota [5]:

$$\tau = \mathbf{J}^T \tau_n. \quad (68)$$

3.2. Proračun dinamičkog modela Delta robota

Mase dijelova stvarnog robota su dobivene mjerenjem. Tablica 2. prikazuje dinamičke parametre stvarnog robota.

Tablica 2. Dinamički parametri robota

Oznaka	Opis i mjerna jedinica	Iznos
m_n	Masa platforme [kg]	0,350
m_{teret}	Masa tereta [kg]	0,4
m_{fb}	Masa podlaktica robota (dvije podlaktice) [kg]	0,204
m_b	Masa nadlaktice robota [kg]	0,308
m_c	Masa zgloba na kraju nadlaktice robota [kg]	0,062

U tablici 2. mogu se vidjeti parametri bitni za dinamiku robota. Za masu podlaktice bitno je uzeti u obzir masu dvije šipke. Uz masu same platforme, za masu platforme također se dodaje masa tereta, te trećine masa podlaktica članova robota, kako je objašnjeno u pretpostavkama dinamičkog modela. Tada je ukupna masa prihvatnice m_{nt} jednaka:

$$m_{nt} = m_n + m_{teret} + 3 \left(\frac{1}{3} \right) m_{fb} \quad (69)$$

Pozicija centra mase nadlaktice robota r_{Gb} dobije se:

$$r_{Gb} = L \left(\frac{\frac{1}{2} m_b + m_c + \frac{2}{3} m_{fb}}{m_{br}} \right), \quad (70)$$

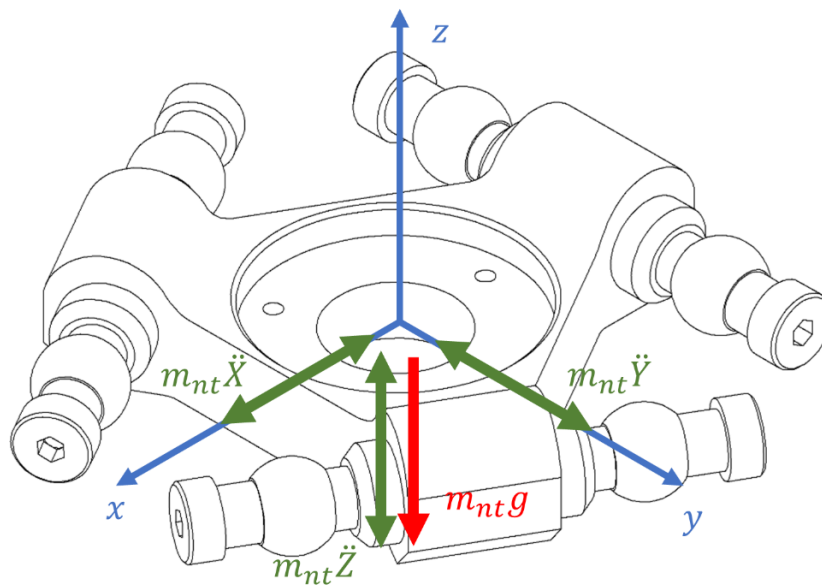
gdje je:

$$m_{br} = m_b + m_c + \frac{2}{3} m_{fb}. \quad (71)$$

Moment inercije nadlaktice I_b suma je inercija masa nadlaktice, dijelova masa podlaktice i masa zglobova:

$$I_b = L^2 \left(\frac{m_b}{3} + m_c + \frac{2}{3} m_{fb} \right). \quad (72)$$

Slika 13. prikazuje sile koje djeluju na platformu robota.



Slika 13. Sile koje djeluju na platformu robota

Na slici 13. mogu se vidjeti da na platformu robota djeluju dvije sile, sila uslijed težine cijele platforme s teretom G_n i d'Alembert-ova sila inercije platforme i tereta F_n , te one glase [5]:

$$\mathbf{G}_n = m_{nt} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}, \quad (73)$$

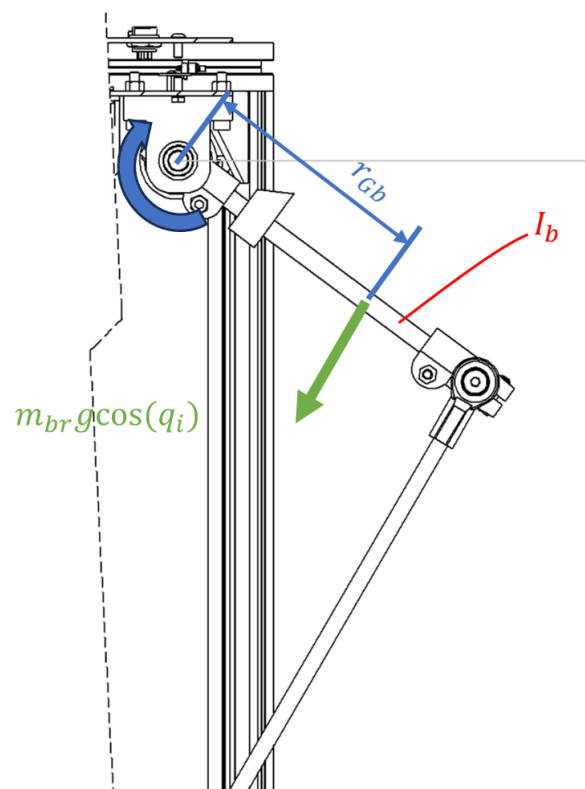
$$\mathbf{F}_n = m_{nt} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = m_{nt} \ddot{\mathbf{x}}. \quad (74)$$

Potom se sile ovisne o vanjskim koordinatama pretvaraju u momente ovisne o unutarnjim koordinatama robota. Koristeći Jacobijevu matricu, potom se dobije:

$$\mathbf{T}_n = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_n = \mathbf{J}^T m_{nt} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \mathbf{J}^T m_{nt} \ddot{\mathbf{x}}, \quad (75)$$

$$\mathbf{T}_{G_n} = \mathbf{J}^T \mathbf{G}_n = \mathbf{J}^T m_{nt} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}. \quad (76)$$

Slika 14. prikazuje sile koje djeluju na nadlakticu robota.



Slika 14. Slike koje djeluju na nadlakticu robota

Na slici 14. može se vidjeti da na nadlaktice robota djeluju dvije sile, to jest, dva momenta. Moment T_{Gb} djeluje uslijed težine nadlaktice robota u središtu mase r_{Gb} , te moment T_b djeluje uslijed inercije nadlaktice robota. Momenti T_{Gb} i T_b jednaki su:

$$\mathbf{T}_{Gb} = r_{Gb} m_{br} g \begin{pmatrix} \cos(q_1) \\ \cos(q_2) \\ \cos(q_3) \end{pmatrix}, \quad (77)$$

$$\mathbf{T}_b = \begin{bmatrix} I_b & 0 & 0 \\ 0 & I_b & 0 \\ 0 & 0 & I_b \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{pmatrix}. \quad (78)$$

Prema d'Alembert-ovom principu, suma razlika svih inercijskih i neinercijskih sila u sustavu jednaka je nuli [5]. Time se dobije:

$$\mathbf{T} + \mathbf{T}_{Gn} + \mathbf{T}_{Gb} = \mathbf{T}_b + \mathbf{T}_n \quad (79)$$

Kad se prethodno izračunati momenti uvrste u jednadžbu (79), te se sredi izraz, dobije se jednadžba za ukupni moment članova robota:

$$\mathbf{T} = (\mathbf{I}_b + m_{nt} \mathbf{J}^T \mathbf{J}) \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{J}^T m_{nt} \dot{\mathbf{J}}) \dot{\mathbf{q}} - (\mathbf{T}_{Gn} + \mathbf{T}_{Gb}). \quad (80)$$

Kako bi se lakše dimenzionirali motori, to jest, provjerila snaga motora za zadane kretnje, moment reduciran na izlazno vratilo motora glasi:

$$T_{mot,i} = \frac{T_i}{N} \quad (81)$$

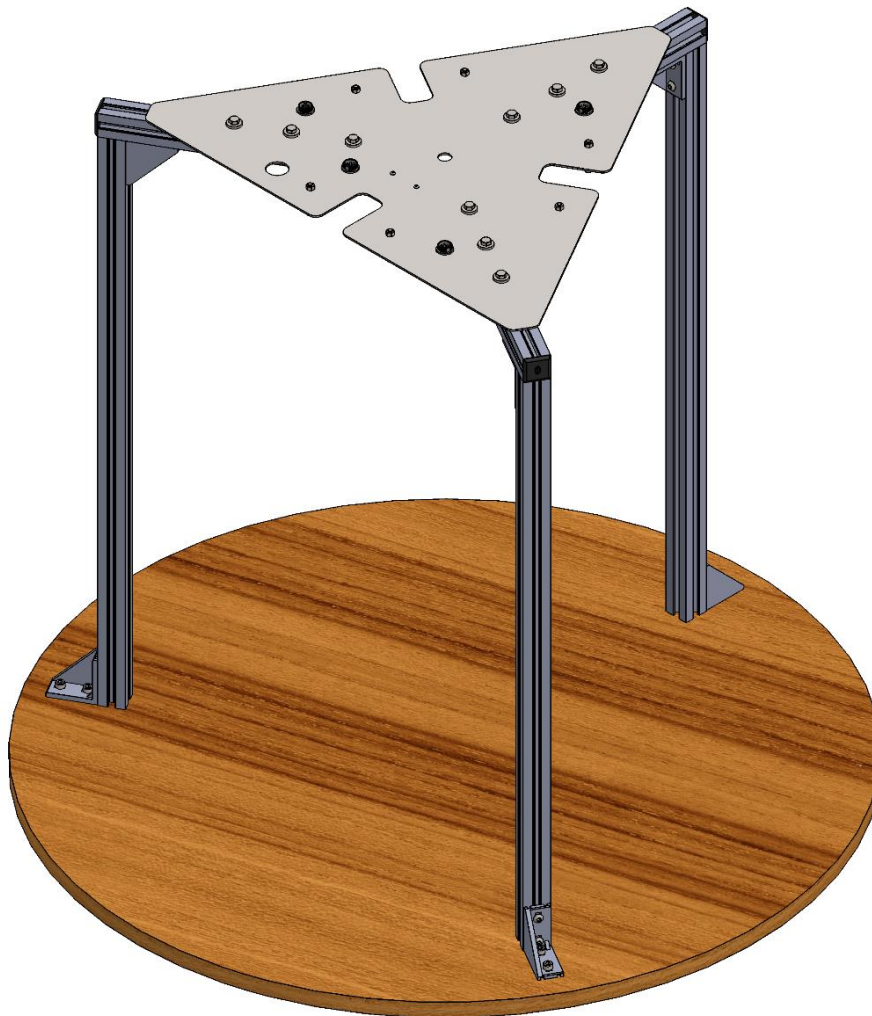
gdje je N prijenosni omjer remenskog prijenosa.

4. KONSTRUKCIJA I KOMPONENTE STVARNOG ROBOTA

4.1. Konstrukcija robota

4.1.1. Nosač

Nosač robota izveden je pomoću aluminijskih pravokutnih profila širine 30 mm. Slika 15. prikazuje nosač robota.

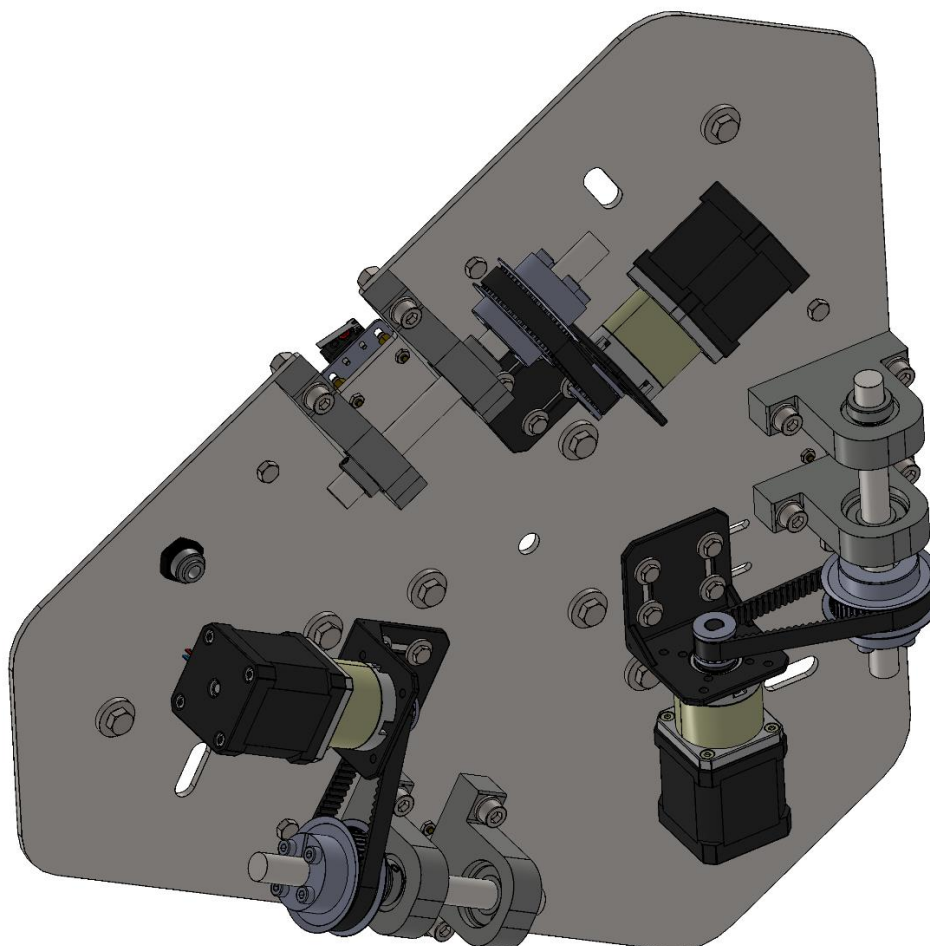


Slika 15. Nosač robota u CAD-u

Na slici 15. mogu se vidjeti aluminijski profili, te gornji čelični lim debljine 2 mm, koji spaja aluminijske profile, te se na njemu nalaze konektori za motore i granične prekidače, kako bi se robot jednostavno i brzo spojio s upravljačkom kutijom. Nosač je na tlu pričvršćen drvenom pločom.

4.1.2. Baza

Baza robota sastoji se od čelične ploče debljine 3 mm, aktuatora, te ležajeva i vratila, na koje su spojeni gornji članovi robota. Slika 16. prikazuje bazu robota u CAD-u.



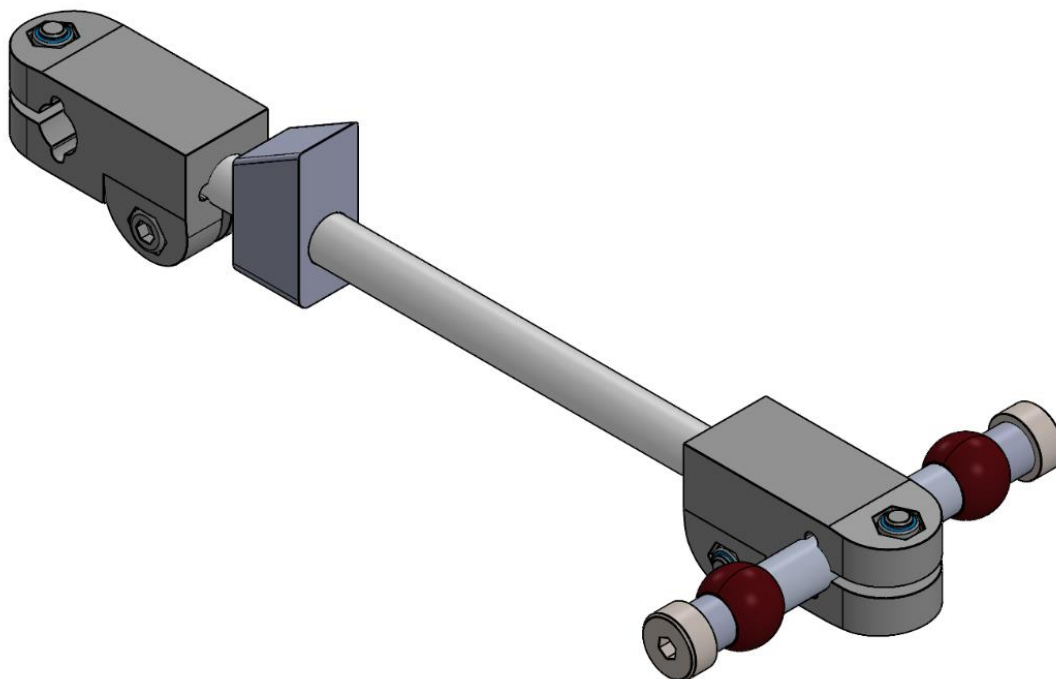
Slika 16. Baza robota u CAD-u

Na slici 16. može se vidjeti da se prijenos snage s koračnih motora na vratilo koje pogoni nadlaktice robota ostvaruje remenskim prijenosom. Pogonska remenica ima utor D oblika, koji odgovara obliku vratila na izlazu reduktora koračnog motora. Gonjena remenica pričvršćena je i prenosi snagu pomoću stezne ljsuske. Prijenosni omjer remenskog prijenosa N iznosi 1,76. Pozicija gonjenog vratila osigurana je prstenima sa zatičnim vijkom, kako ne bi došlo do aksijalnog pomicanja vratila na ležajevima, što bi rezultiralo većim trošenjem remena. Motori s reduktorom pričvršćeni su za nosače. Na ploči baze nalaze se utori, pomoću kojih se motori mogu pomicati u jednom smjeru kako bi se postigla dovoljna sila natezanja remena. Remenskim

prijenosom povećava se moment, te se prenosi na drugo vratilo, čime se izbjegava opterećivanje vratila motora.

4.1.3. Nadlaktica robota

Slika 17. prikazuje nadlakticu robota u CAD-u.



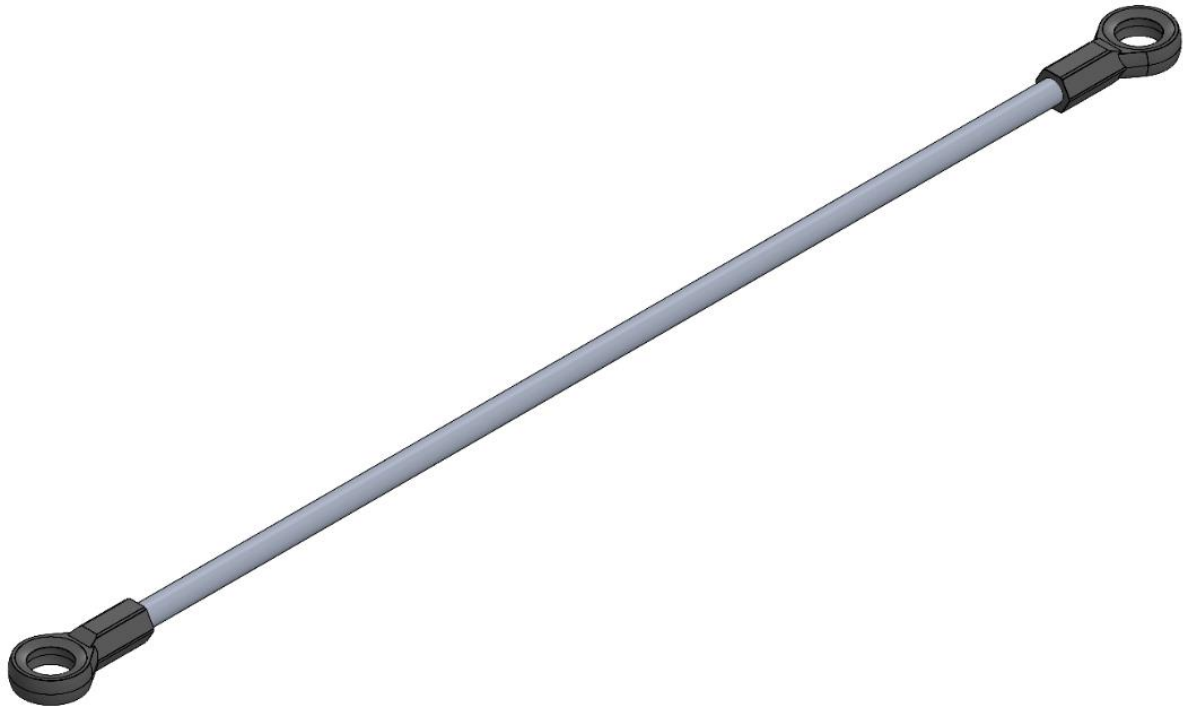
Slika 17. Nadlaktica robota u CAD-u

Na slici 17. može se vidjeti aluminijska cijev promjera 12 mm i debljine stijenke 1 mm, koja pruža dovoljnu krutost uz malu masu. Na krajevima cijevi stoje stezni elementi. Na jednoj strani je aluminijska navojna cjevčica, na koju se spajaju zglobne glave podlaktice robota. Kuglica zglobne glave leži na ramenskom vijku, te je glava vijka s jedne strane odmaknuta s košuljicom ležaja, kako se kretanja zglobne glave ne bi ograničavala.

4.1.4. Podlaktica robota

Zbog većih akceleracija i brzina, bitno je da podlaktice robota budu što kruće i lakše. U većini slučajeva kod izvedbe industrijskih Delta robota, podlaktice se izvode kao cijevi napravljene

od karbonskih vlakna, kako bi se smanjila masa i povećala krutost. U ovom radu, donji članovi napravljeni su od aluminijskih cijevi promjera 10 mm, te debljine stijenke od 2 mm. Na cijevima urezan je vanjski M10 navoj, na koji se stavljaju plastične IGUS zglobne glave. Slika 18. prikazuje podlakticu robota u CAD-u.

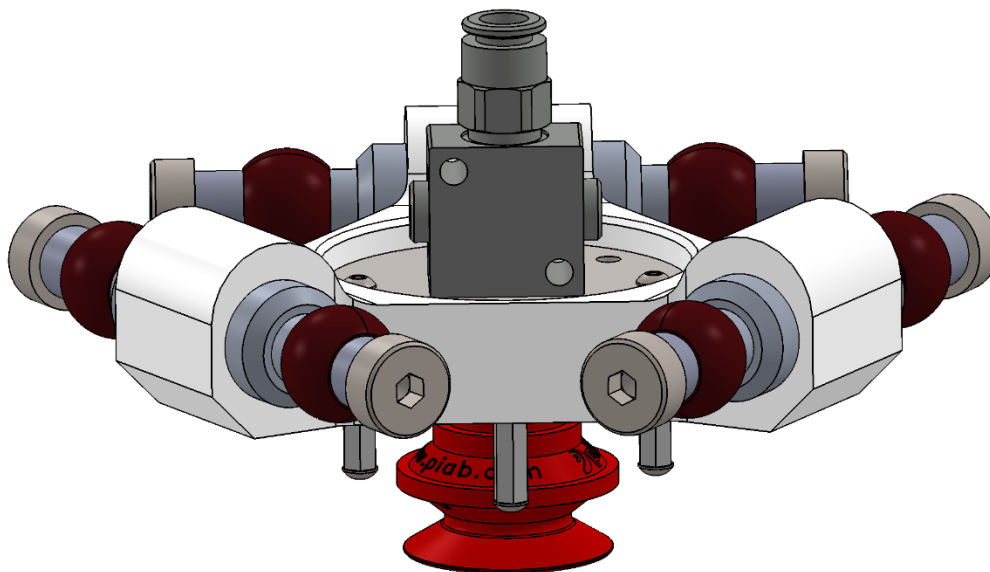


Slika 18. Podlaktica robota u CAD-u

Na slici 18. može se vidjeti podlaktica, sastavljena od aluminijske cijevi s dvije zglobne glave. Između zglobnih glava i navoja cijevi, stavlja se Loctite ljepilo te kontra matica.

4.1.5. Platforma

Platforma robota napravljena je od ABS plastike. Slika 19. prikazuje platformu robota s vakuumskom hvataljkom u CAD-u.

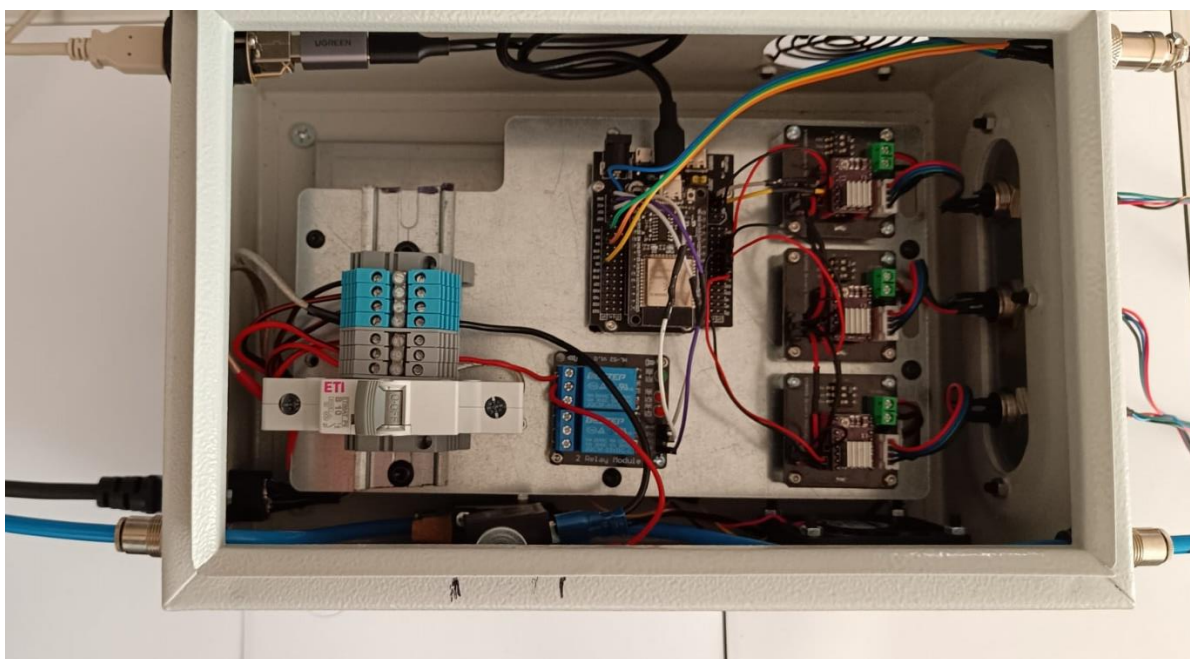


Slika 19. Platforma robota s vakuumskom hvataljkom u CAD-u

Na slici 19. može se vidjeti cijeli sklop platforme robota s vakuumskom hvataljkom. Alati se spajaju s četiri M3 vijka i zatikom na gornjoj strani prihvatnice, kako bi se osigurala pozicija alata, te kako se navojni umetci ne bi opterećivali. Pozicija aluminijskih navojnih cjevčica osigurana je pomoću aluminijskih prstenova sa zatičnim vijcima, kako ne bi došlo do pomaka cjevčica. Vakuumska hvataljka spojena je na aluminijski pneumatski blok. Na ulaz u blok stavljen je ejektor, kako bi se smanjilo vrijeme evakuacije i postizanja punog vakuuma. Iako se kuglice sa zglobnih glava ne mogu odvojiti, u CAD-u su postavljene zasebno kako bi se provjerio kinematski model. S donje strane platforme oko vakuumske hvataljke postavljeni su odstojnici na koje se nošeni predmet nasloni i stabilizira kad se vakuumska hvataljka uvuče, kako ne bi došlo do njihanja predmeta u toku rada.

4.1.6. Upravljački ormar

Većina elektroničkih komponenti smještena je u upravljačkom ormaru. Slika 20. prikazuje upravljački ormar.

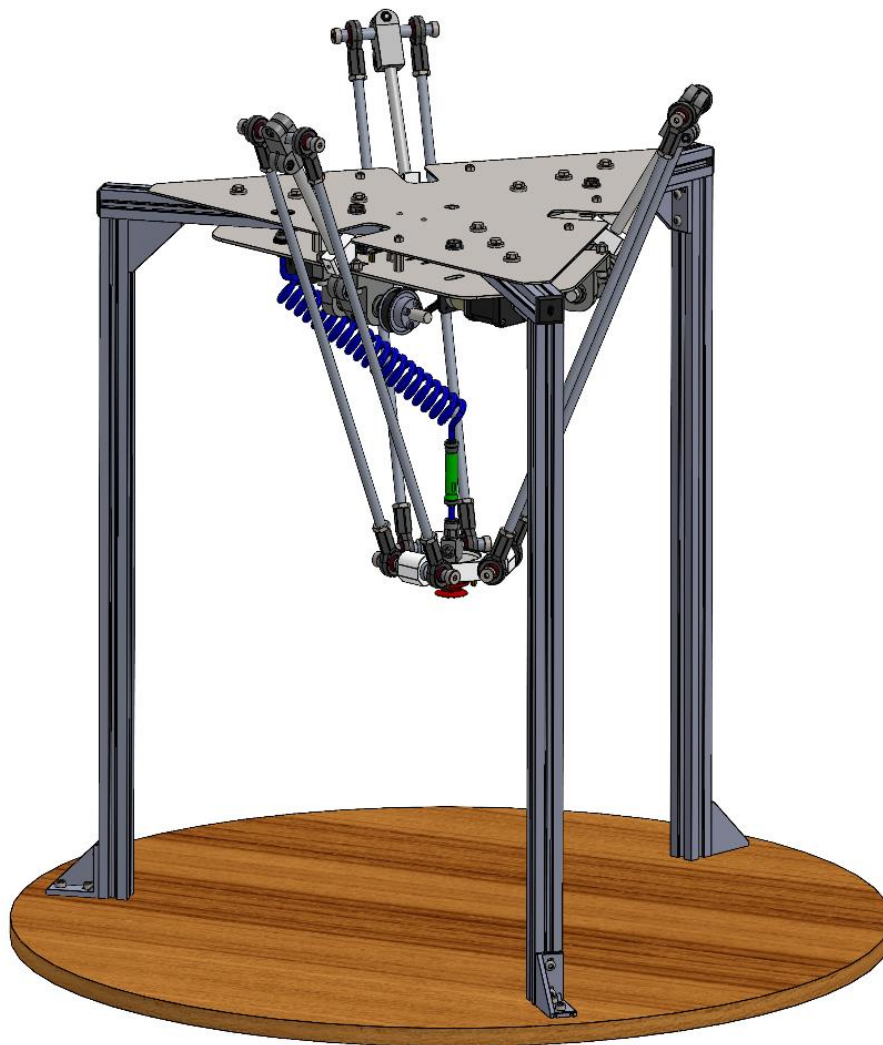


Slika 20. Upravljački ormar

Na donjoj strani upravljačkog ormara smješten je USB konektor, priključak za zrak, te naponski konektor. S gornje strane postavljeno je pet konektora, tri za upravljanje koračnim motorima, jedan za signale graničnih prekidača, te konektor za pneumatsko crijevo. Na bočne stranice ugrađene su zaštitne mreže za ventilatore, te jedan ventilator koji služi za hlađenje driver-a koračnih motora. Napajanje je smješteno ispod ploče na kojoj se nalazi glavna elektronika, te je ventil smješten na bočnoj stranici. Zrak s kompresora preko priključka za crijevo dolazi do ventila. Ventil je upravljan relejima.

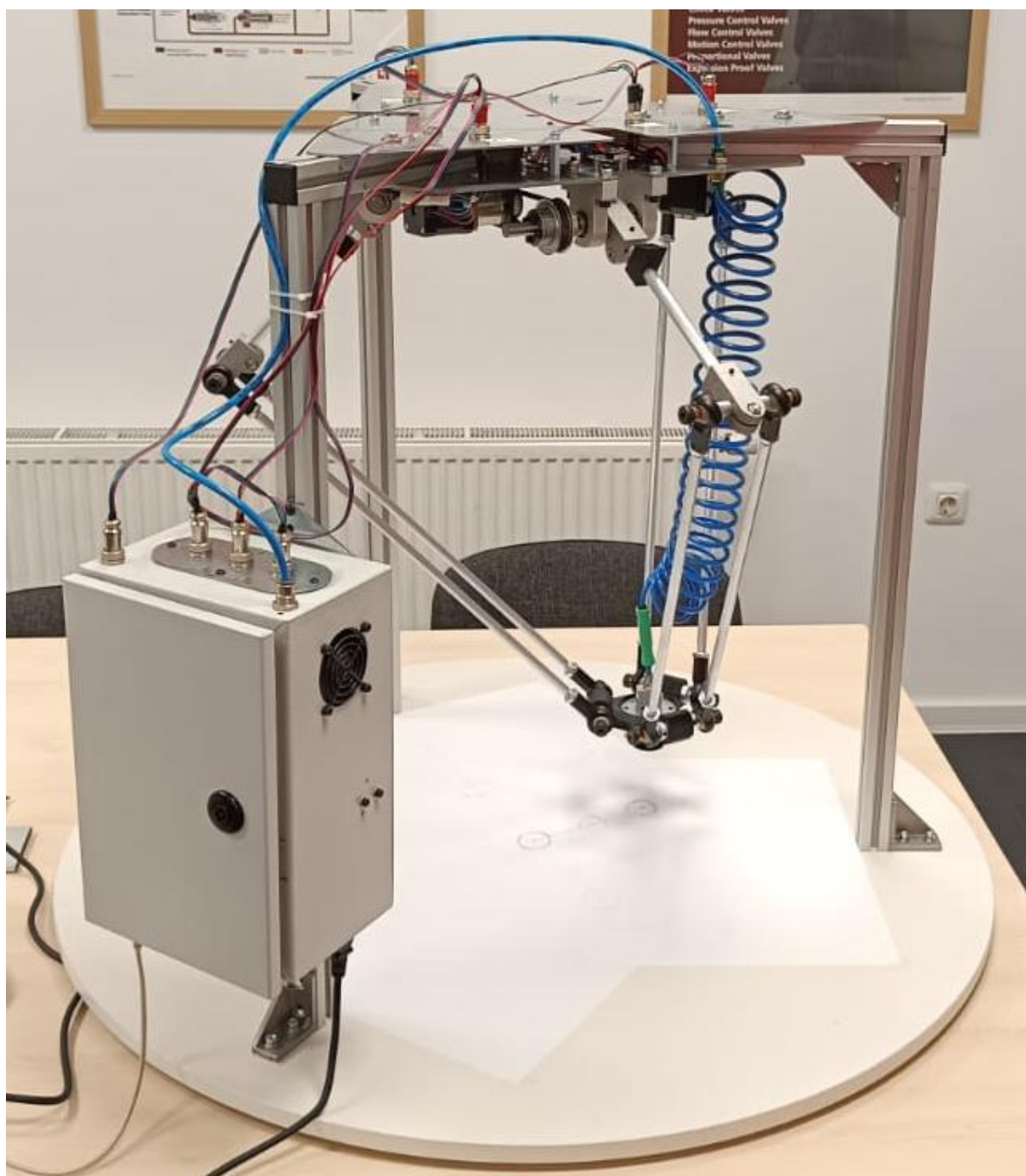
4.1.7. Potpuni CAD model robota

Slika 21. prikazuje CAD model Delta robota.



Slika 21. CAD model Delta robota

Na slici 21. može se vidjeti cijeli sklop robota. Vakuumska hvataljka na platformi spojena je s ejektorom, te je ejektor spojen sa spiralnim crijevom na bazu robota. Na gornju ploču nosača spajaju se konektori za motore i granične prekidače, kao i pneumatsko crijevo za dovod zraka. Robot na slici postavljen je u poziciju gdje bi granični prekidači trebali biti aktivirani. Slika 22. prikazuje izrađeni Delta robot.



Slika 22. Izrađeni Delta robot

Na slici 22. može se vidjeti robot u radu. Na aluminijskom profilu pričvršćena je upravljačka kutija.

4.2. Komponente robota

4.2.1. Aktuatori robota

Kao aktuatore Delta robota koriste se koračni motori oznake 17HS19-1684S-PG14, proizvođača StepperOnline. Slika 23. prikazuje koračni motor s reduktorom.



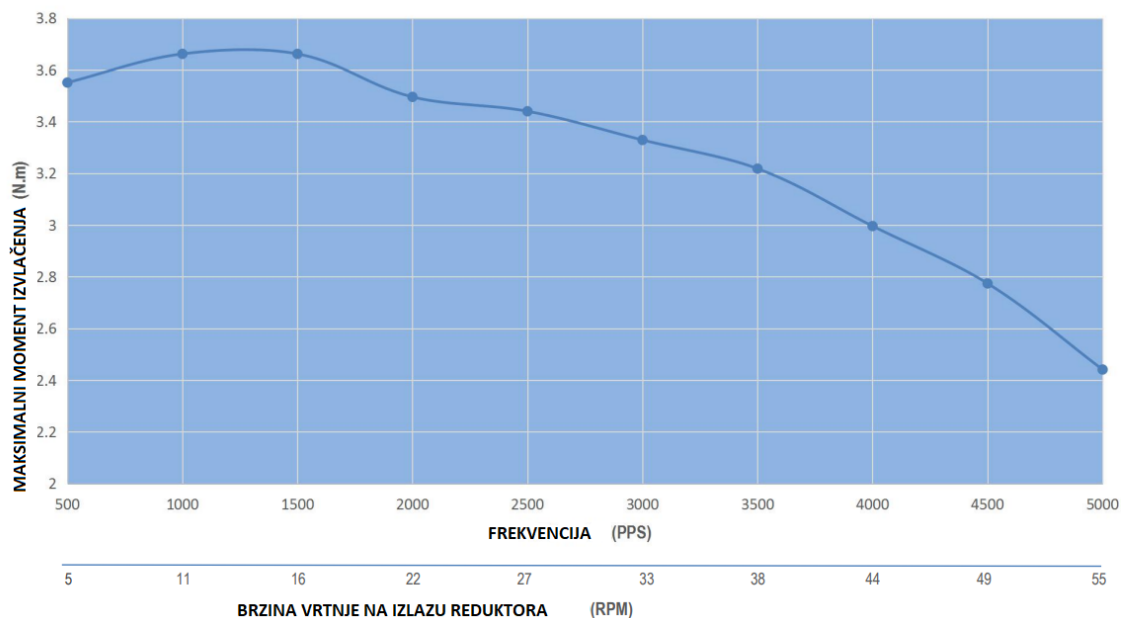
Slika 23. Koračni motor s reduktorom [6]

Tablica 3. prikazuje karakteristike koračnog motora.

Tablica 3. Karakteristike koračnog motora [6]

Korak	1,8 °
Nazivna struja po fazi	1,68 A
Otpor po fazi	1,8 Ω
Induktivitet po fazi	3,2 mH
Masa	0,560 kg
Moment držanja bez reduktora	0,52 Nm
Prijenosni omjer reduktora	13,73

U tablici 3. mogu se vidjeti karakteristike koračnog motora. Kako bi se motor mogao dimenzionirati, potrebno je znati karakteristiku momenta pri različitim brzinama vrtnje motora. Slika 24. prikazuje krivulju momenta koračnog motora.



Slika 24. Krivulja momenta koračnog motora [6]

Na slici 24. može se vidjeti moment na izlazu vratila reduktora koračnog motora. Navedeni moment vrijedi za struju od 1,7 A, te rezolucijom od 1/2 koraka.

4.2.2. Pneumatski i vakuumski sustav robota

Pneumatski i vakuumski sustav robota sastoji se od kompresora, to jest, izvora stlačenog zraka, elektropneumatskog ventila, ejektora, te vakuumske hvataljke.

4.2.2.1. Ejektor

Odabrani ejektor oznake je piINLINE MICRO Ti proizvođača PIAB. Slika 25. prikazuje ejektor piINLINE MICRO Ti.



Slika 25. Ejektor PIAB piINLINE MICRO Ti [7]

Ejektor se postavlja što bliže vakuumskoj prihvatnici kako bi se smanjilo vrijeme evakuacije.

Tablica 4. prikazuje karakteristike PIAB piINLINE MICRO Ti ejektora.

Tablica 4. Karakteristike PIAB ejektora [7]

Maksimalni tlak na ulazu ejektora	7 bar
Maksimalni relativni vakuum pri tlaku od 6 bar	- 0,79 bar
Protok pri relativnom vakuumu od -70 kPa	0,023 L/s
Vrijeme evakuacije do relativnog vakuuma od -70 kPa	6,54 s/L
Vrijeme evakuacije do relativnog vakuuma od -60 kPa	3,7 s/L

U tablici 4. može se vidjeti velika razlika u vremenu evakuacije između postizanja dvije različite razine vakuuma.

4.2.2.2. Pneumatski ventil

Odabran je elektro-pneumatski 3/2 ventil oznake 338-015-02 proizvođača Camozzi. Slika 26. prikazuje 3/2 ventil oznake 338-015-02.



Slika 26. Elektro-pneumatski 3/2 ventil [8]

Tablica 5. prikazuje karakteristike ventila.

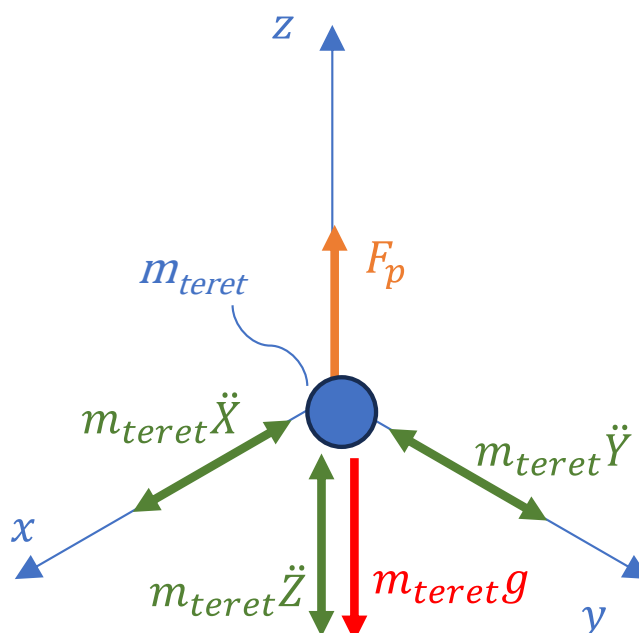
Tablica 5. Karakteristike ventila [8]

Funkcija	3/2 normalno zatvoreni (NC) ventil
Protok ventila	700 l/min
Radni tlak	2,5 – 10 bar

Ventil radi na naponu od 24V, te je upravljan pomoću releja. Kod odabira ventila za jednostavni vakuum sustav, potrebno je obratiti pažnju da protok ventila bude dovoljno visok.

4.2.2.3. Proračun sile hvatanja predmeta

Kako bi se poznavala maksimalna masa predmeta kojeg vakuumska hvataljka drži, kao i potrebna sila za držanje predmeta u dinamičkom opterećenju, prvo se računa maksimalna teoretska ostvariva sila vakuumske hvataljke. Slika 27. prikazuje sile koje djeluju na nošeni predmet.



Slika 27. Sile koje djeluju na nošeni predmet

Na slici 27. može se vidjeti da osim težine tereta, koja djeluje u negativnom smjeru z osi, javlja se i sila uslijed akceleracije mase u smjeru z osi, te sile uslijed akceleracije mase u smjeru x i y osi koja se prenosi na vakuumsku hvataljku preko trenja. Potrebno je izračunati minimalnu silu za držanje predmeta pomoću vakuumske hvataljke. Sila potrebna za hvatanje predmeta $F_{p,\min}$ dobije se jednadžbom:

$$F_{p,\min} = S \cdot m_{\text{teret}} \left(g + \ddot{z} + \frac{1}{\mu} (|\ddot{x} + \ddot{y}|) \right) \quad (82)$$

gdje je m_{teret} masa predmeta kojeg vakuumska hvataljka drži, g je konstanta ubrzanja sile teže, μ faktor trenja između vakuumske prihvatnice i predmeta, dok je S faktor sigurnosti. Za dimenzioniranje i simulaciju odabran je faktor sigurnosti S iznosa 2. Pretpostavlja se da vakuumska hvataljka nosi glatke metalne predmete, te se faktor trenja μ pretpostavlja da je iznosa 0,4. Tablica 4. pokazuje maksimalni vakuum pri ulaznom tlaku od 6 bar, koji iznosi -0,79 bar, no u proračunu se pretpostavlja relativni vakuum od -0,70 bar. Maksimalna sila vakuuma F_p glasi:

$$F_p = p_{rel} \cdot \frac{d^2 \pi}{4}, \quad (83)$$

gdje je d promjer vakuumske hvataljke iznosa 30 mm, p_{rel} relativni vakuum. Kad se vrijednosti uvrste u jednadžbu (83), dobije se maksimalna sila vakuumske hvataljke:

$$F_p = 70000 \cdot \frac{0,030^2 \pi}{4} = 49,48 \text{ N} \quad (84)$$

Vrijeme evakuacije znatno utječe na vrijeme procesa, gdje kod inicijalnog hvatanja predmeta, sustav prvo mora stvoriti vakuum, te kod odlaganja predmeta, sustav se mora odzračiti. Vrijeme evakuacije t_{vakuum} jednak je:

$$t_{vakuum} = t_{evak,70} V, \quad (85)$$

gdje je $t_{evak,70}$ vrijeme evakuacije pri relativnom vakuumu od -70 kPa, kao što se može vidjeti u Tablica 4., dok je V volumen vakuumske hvataljke, koji iznosi 10 cm³, to jest, 0,01 L. Kad se vrijednosti uvrste u jednadžbu (85), dobije se vrijeme evakuacije za dostizanje relativnog vakuuma:

$$t_{vakuum} = 6,54 \cdot 0,01 = 0,0654 \text{ s}, \quad (86)$$

U proračunu zanemaruje se volumen pneumatskog crijeva i malog ventilskog bloka, pošto su njihove vrijednosti zanemarivo malene. Pošto sustav ne sadrži vakuumski prekidač, koji mjeri

razinu vakuuma, te javlja sustavu da je vakuum postignut, u programu je potrebno odrediti vrijeme čekanja do sljedeće kretnje.

4.2.3. **Elektroničke komponente**

4.2.3.1. *ESP-32 mikroupravljač*

Mikrokontroler korišten u ovom radu je ESP-32, zbog većeg takta procesora nego kod drugih mikrokontrolera istih cijena. Slika 28. prikazuje ESP-32 mikrokontroler.



Slika 28. ESP32 mikrokontroler [9]

Tablica 6. prikazuje usporedbe karakteristika Arduino Uno i ESP-32 mikrokontrolera.

Tablica 6. Usporedba Arduino Uno, Due i ESP-32 mikrokontrolera [9]

	ESP 32	Arduino Uno
Mikrokontroler	Tensilica Xtensa LX6 dvojezgreni procesor	ATmega328p
Takt procesora	240 MHz	16 MHz
Flash memorija	16 MB	4
Broj pinova općih namjena (GPIO)	48	26
Broj analognih ulaza	18	6
Radni logički napon	3,3 V	5 V

U tablici 6. može se vidjeti da uz memoriju mikrokontrolera, ESP-32 ima veći takt procesora, koji je bitan za izračun direktne i inverzne kinematike, kao i kod upravljanja koračnim motorima, gdje se za veće brzine koračnih motora mora postići veći broj otkucaja digitalnih izlaza u sekundi. Proveden je eksperiment i uspoređeno je vrijeme potrebno za rješavanje direktnog i inverznog kinematičkog problema s Arduino Uno i ESP-32 mikrokontrolerom. Oba mikrokontrolera imaju identičan kod i postavke. Mjerenje vremena provedeno je s `micros()`

funkcijom, koja broji mikrosekunde od početka pozivanja funkcije. Postavljeno je 10 točaka, te mikrokontroler računa inverznu kinematiku, te mjeri potrebno vrijeme. S rezultatom inverzne kinematike računa se direktna kinematika, za koju se također računa potrebno vrijeme. Za 10 točaka računa se srednja vrijednost, te se ispisuje. Tablica 7. prikazuje usporedbu vremena potrebnog za rješavanje direktnog i inverznog kinematičkog problema kod Arduino Uno i ESP 32 mikrokontrolera.

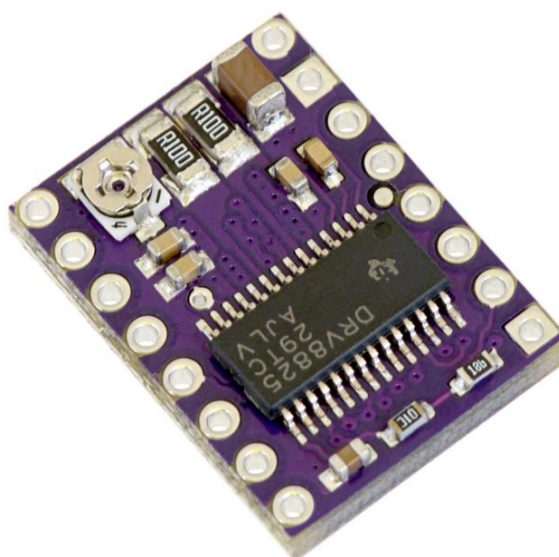
Tablica 7. Usporedba potrebnog vremena za rješavanje kinematičkih problema Arduino Uno i ESP32 mikrokontrolera

Mikrokontroler	ESP-32	Arduino Uno
Vrijeme potrebno za inverzni kinematički problem	36 μ s	2443 μ s
Vrijeme potrebno za direktni kinematički problem	20 μ s	1453 μ s

U tablici 7. može se vidjeti znatno smanjenje vremena potrebnog za izračun direktne i inverzne kinematike. Daljnjom optimizacijom koda može se postići dodatno smanjenje vremena izračuna kinematskog rješenja.

4.2.3.2. Driver DRV8825 za koračne motore

Mikrokontroler ne može dostaviti potrebnu struju preko digitalnih izlaza, zato se koristi driver za koračne motore. Slika 29. prikazuje driver DRV8825 za koračne motore.



Slika 29. Driver DRV8825 za koračne motore [10]

Tablica 8. prikazuje karakteristike drivera DRV8825.

Tablica 8. Karakteristike drivera DRV8825 za koračne motore [10]

Radni napon	8,2 – 45 V
Najveća dopuštena struja po fazi koračnog motora bez hlađenja	1,5 A
Najveća dopuštena struja po fazi koračnog motora s hlađenjem	2,2 A
Napon logike	2,5 - 5,25 V
Dostupne rezolucije koraka	1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32

U tablici 8. može se vidjeti da radni napon odgovara naponu napajanja, koji iznosi 24V. DRV8825 sadrži potencijometar s kojim se ograničava struja po fazi koračnog motora. Potrebno je namjestiti ograničenje struje kako ne bi došlo do pregrijavanja i oštećenja koračnog motora. Ograničenje struje postavljeno je na 1,7 A. Pošto struja prelazi prag maksimalne dopuštene struje bez hlađenja, u elektronski ormar postavljen je ventilator, usmjeren prema driver-ima za koračne motore i izlazom za topli zrak iz kućišta. Tablica 8. također prikazuje da je napon logike ESP-32 mikrokontrolera unutar dopuštenog napona logike DRV8825 driver-a. Postavljena rezolucija koraka je 1/2. Time su postavke driver-a identične kao u momentnoj karakteristici koračnog motora, koju prikazuje Slika 24.

5. SIMULACIJA DELTA ROBOTA

U ovom poglavlju simulira se inverzni dinamički model robota, zbog načina upravljanja aktuatorima, koji je objašnjen u poglavlju 6. Za razliku od direktnog dinamičkog problema, gdje se za zadane sile i/ili momente dobivaju akceleracije, brzine i pozicije robota, kod inverznog dinamičkog problema, za zadane pozicije, brzine i akceleracije, dobivaju se momenti i/ili sile potrebne za ostvarivanje željenog gibanja. Kod simulacije inverzne kinematike nije potrebno postavljati upravljačke zakone i regulatore.

5.1. Simulacija trajektorije zadane u vanjskim koordinatama robota s kružnom provjerom kinematike

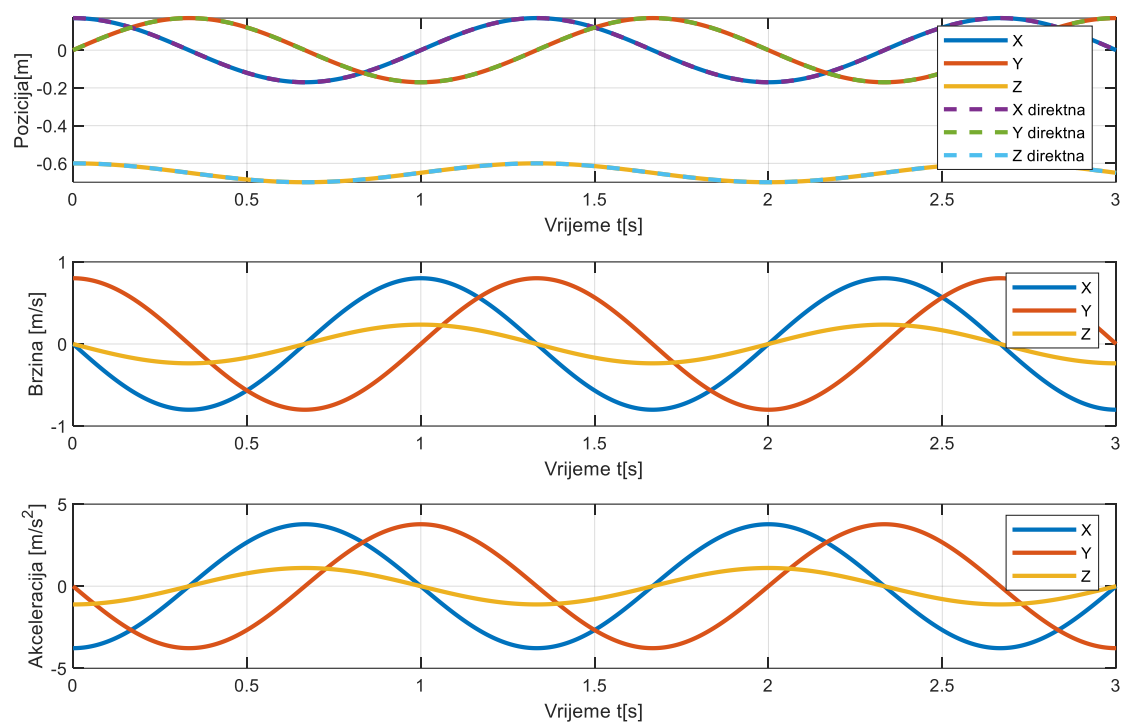
Zadana je trajektorija:

$$x(t) = 0,17 \cos\left(\frac{1,5\pi}{t}\right), \quad (87)$$

$$y(t) = 0,17 \sin\left(\frac{1,5\pi}{t}\right), \quad (88)$$

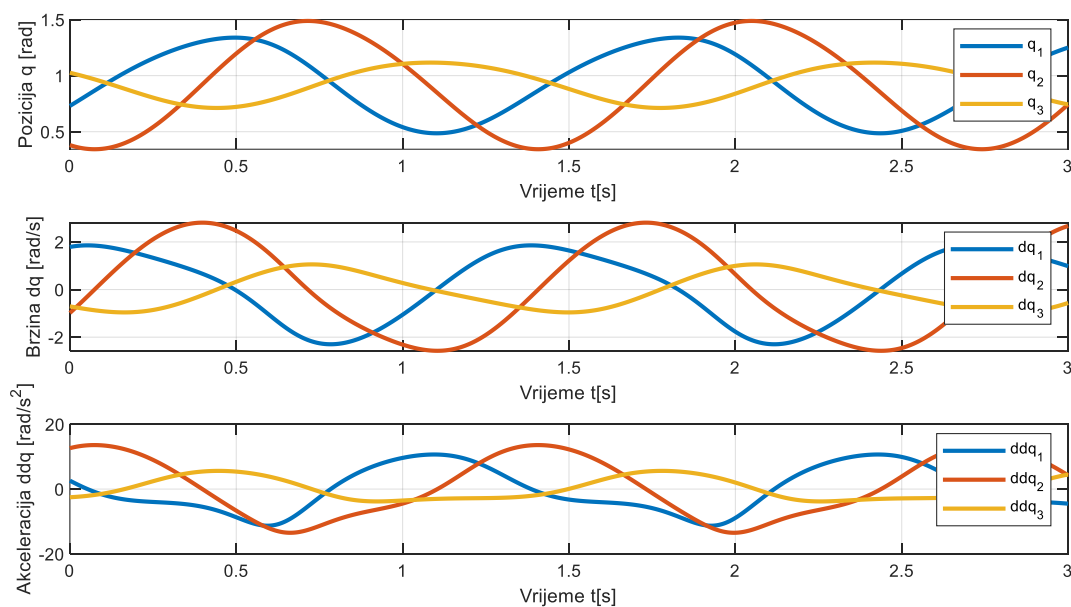
$$z(t) = -0,65 + 0,05 \cos\left(\frac{1,5\pi}{t}\right). \quad (89)$$

Trajektorija je zadana u vanjskim koordinatama robota. Platforma prati kružnu trajektoriju koja se nalazi u XY ravnini, s centrom kružnice (0, 0, -650) mm i radijusom od 170 mm, dok Z os oscilira s amplitudom od 50 mm. Vrijeme trajanja simulacije je 3 s. Robot u to vrijeme radi dva puna kruga. Provodi se provjera inverzne i direktne kinematike. Za zadanu trajektoriju, računa se inverzna kinematika kako bi se dobile pozicije članova robota u unutarnjim koordinatama. S rješenjima inverzne kinematike, računa se direktna kinematika, kako bi se dobile pozicije platforme u vanjskim koordinatama robota, te se uspoređuje s referentnim vrijednostima. Također, pomoću Jacobijeve matrice dobivaju se brzine i akceleracije unutarnjih članova robota. Slika 30. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije trajektorije u vanjskim koordinatama robota.



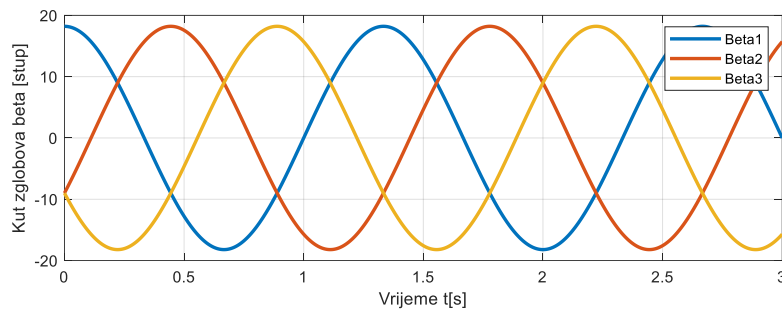
Slika 30. Pozicije, brzine i akceleracije trajektorije u vanjskim koordinatama robota

Na slici 30. može se vidjeti da se rezultat direktne kinematike slaže sa zadanom trajektorijom, te da x i y komponente trajektorije imaju međusobni fazni pomak. Slika 31. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije članova robota u unutarnjim koordinatama na zadanu trajektoriju u vanjskim koordinatama.



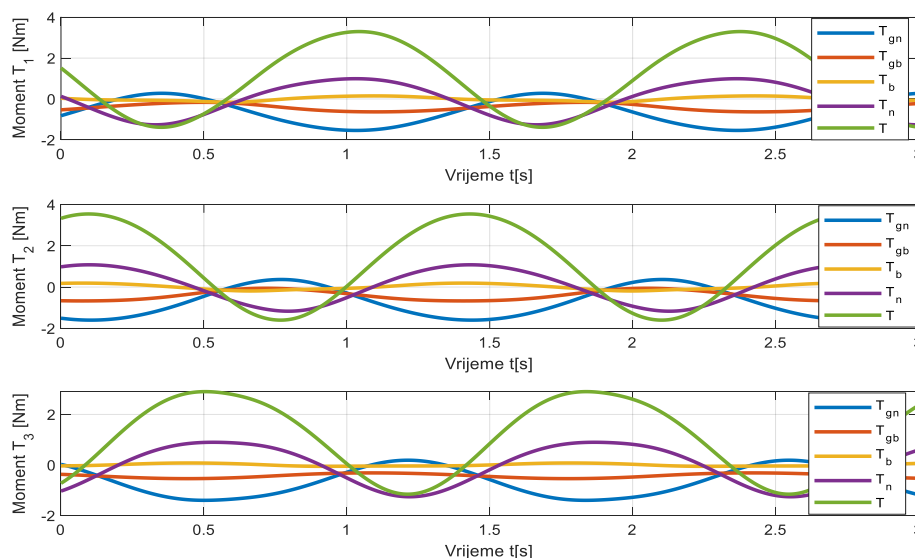
Slika 31. Pozicije, brzine i akceleracije članova robota u unutarnjim koordinatama na zadanu trajektoriju u vanjskim koordinatama

Na slici 31. može se vidjeti rješenje inverzne kinematike na pozicijama članova robota, kao i brzine i akceleracije u unutarnjim koordinatama, koje su rezultat Jacobijeve matrice. Članovi nemaju identični oblik krivulje zbog zadane funkcije z-osi. Kad bi z os bila konstantna kroz cijelo trajanje trajektorije, članovi robota imali bi identične vrijednosti pozicija, brzina i ubrzanja samo s konstantnim faznim pomakom. Slika 32. prikazuje kutove zakreta sfernih zglobova β pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota.



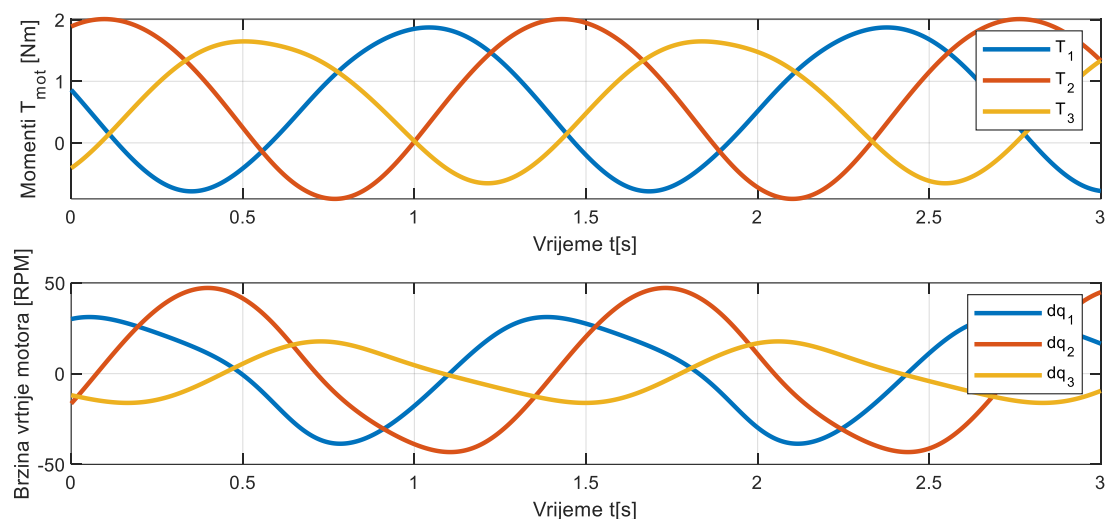
Slika 32. Kut zakreta sfernih zglobova β pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota

Na slici 32. može se vidjeti da svi zglobovi približno dostižu vrijednost od 20° . Pošto kutovi β ovise o pozicijama x i y osi, funkcija po z osi ne utječe na oblik funkcija kutova zakreta. Kao što je prije spomenuto, zglobovi teoretski mogu ostvariti i malo veći kut zakreta, te se maksimalna vrijednost od 20° uzima radi sigurnosti. Slika 33. prikazuje momente članova robota i njihove komponente pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota s masom tereta od 0,4 kg.



Slika 33. Momenti članova robota i njihove komponente pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota s masom tereta od 0,4 kg

Na slici 33. može se vidjeti ukupni potreban moment za ostvarivanje željene trajektorije, kao i momente uslijed težina i inercija platforme i nadlaktica robota. Može se vidjeti da neki članovi zahtijevaju ukupni moment od skoro 4 Nm, te da najveći utjecaj na ukupni moment imaju težina i inercija platforme. Slika 34. prikazuje momente reducirane na izlazno vratilo reduktora motora pri trajektoriji zadanoj u vanjskim koordinatama robota.



Slika 34. Momenti reducirani na izlazno vratilo motora pri kretnji zadanoj u vanjskim koordinatama robota

Na slici 34. može se vidjeti da maksimalni iznosi momenta u pojedinim trenucima dostižu vrijednost od 2 Nm, te brzine dostižu vrijednosti i do 50 okretaja po minuti. Za momentnu krivulju (Slika 24) očitava se moment motora za maksimalnu brzinu postignutu u simulaciji, te se uspoređuje s maksimalnim momentom reduciranim na izlazno vratilo reduktora. Zaključuje se da aktuatori imaju dovoljno snage za ostvarivanje željene kretnje.

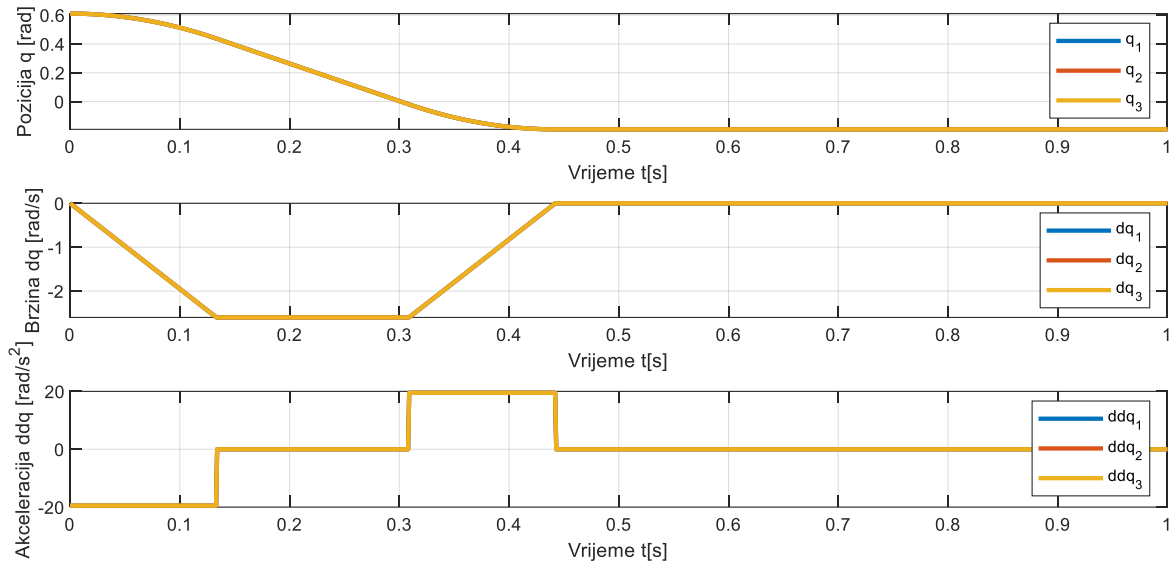
5.2. Simulacija trajektorija s trapeznim profilom brzine zadane u unutarnjim koordinatama robota

Kod simulacije kretnji zadanoj u unutarnjim koordinatama robota, koristi se trapezni profil brzine vrtnje motora.

5.2.1. Kretnja po vertikalnoj osi

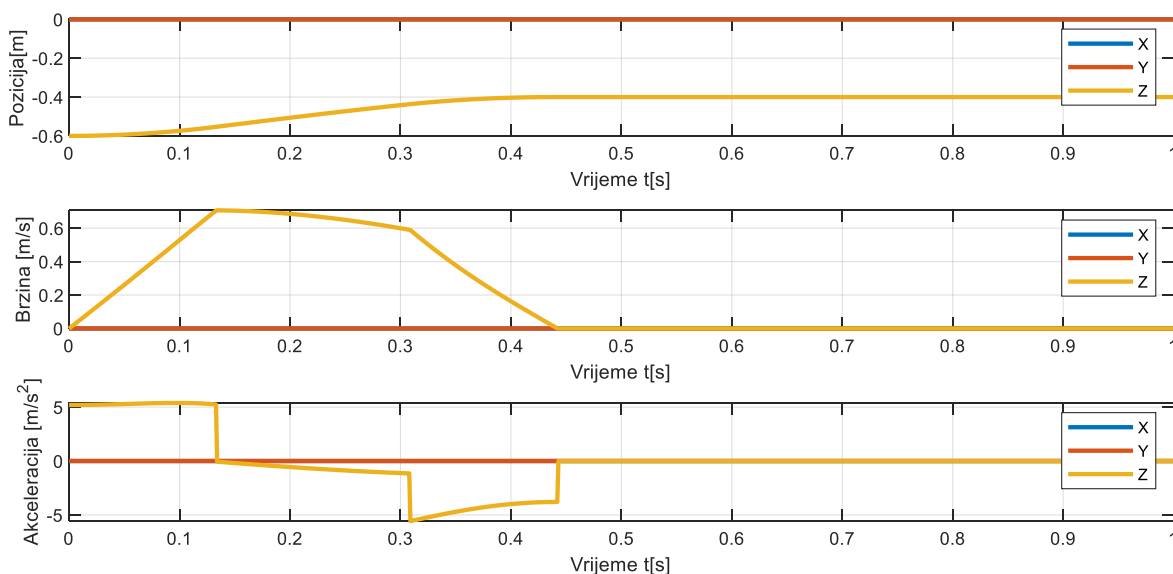
Početni položaj platforme je (0, 0, -600) mm, te brzinom na motoru od 3000 korak/s i akceleracijom od 15000 korak/s², dolazi do točke (0,0,-400) mm. Trajanje simulacije je 1 s. Cilj simulacije je promatranje iznosa momenta pri simetričnoj kretnji svih članova robota, te

maksimalna nosivost vakuumske hvataljke u slučaju vertikalnog pomaka. Slika 35. prikazuje položaj, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine.



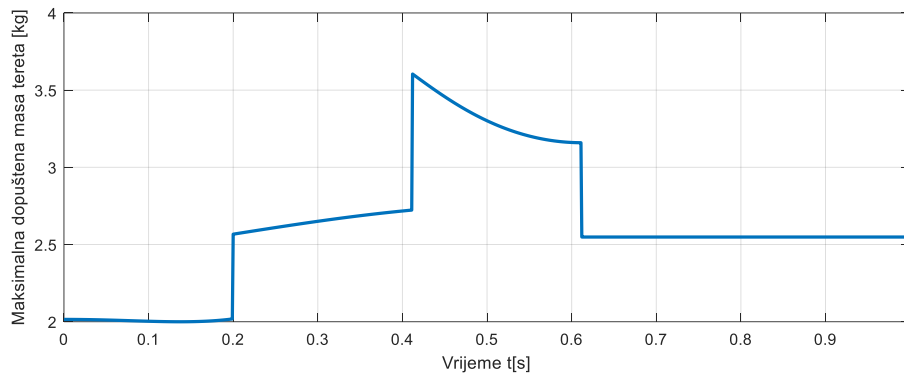
Slika 35. Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine

Na slici 35. može se vidjeti da svi članovi robota imaju identične vrijednosti pozicije, brzine i akceleracije. Razlog tome su početne i krajnje točke, koje se nalaze na z-osi, te su kretnje simetrične. Slika 36. prikazuje položaj, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine.



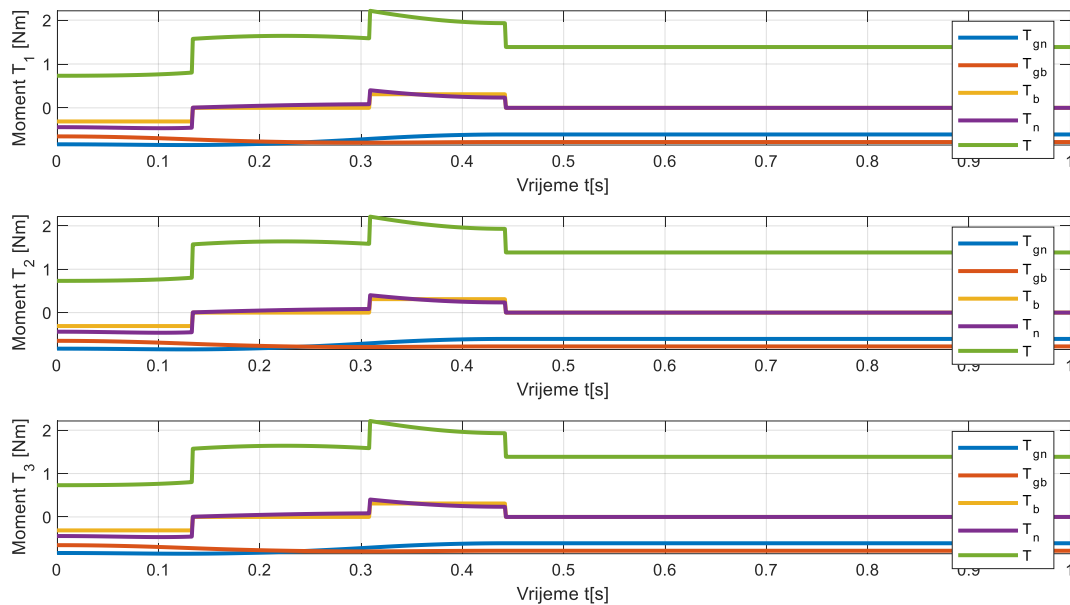
Slika 36. Pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine

Na slici 36. mogu se vidjeti aktivne komponente brzine i akceleracije u pozitivnom smjeru z osi, što služi kao provjera Jacobijeve matrice, kao i njihovi iznosi. Slika 37. prikazuje maksimalnu masu tereta koju vakuumska hvataljka može nositi pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine.



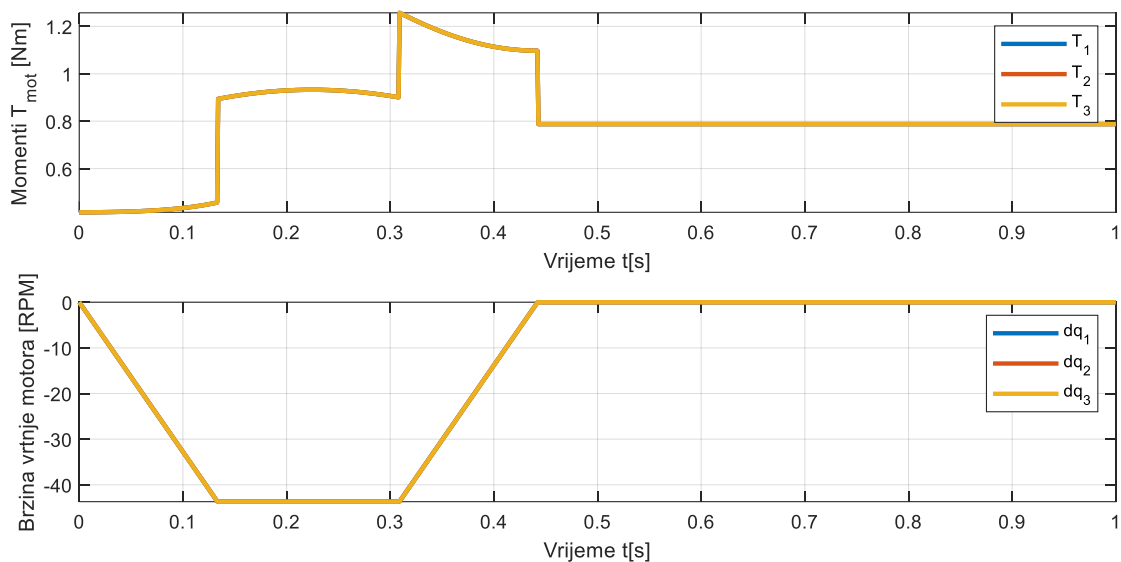
Slika 37. Maksimalna masa tereta pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine

Na slici 37. može se vidjeti da, uz prije odabrani faktor sigurnosti, maksimalna masa koju je moguće držati u ovom slučaju iznosi oko 2 kg. Masa se povećava u trenutku usporavanja prihvatnice u pozitivnom smjeru z-osi jer akceleracija djeluje u istom smjeru kao i sila vakuuma. Slika 38. prikazuje momente članova robota i njihove komponente pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg.



Slika 38. Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg

Na slici 38. mogu se vidjeti skokovi momenta za ubrzanje nadlaktica i prihvatnice, dok u ovom slučaju najveći moment stvaraju težine prihvatnice i nadlaktice. Slika 39. prikazuje momente reducirane na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg.

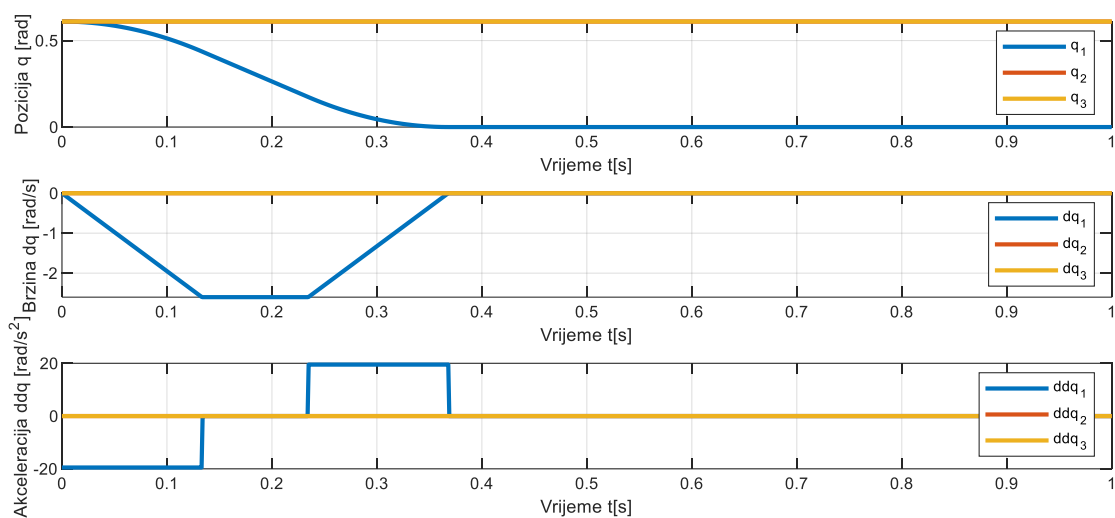


Slika 39. Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg

Na slici 39. može se vidjeti da svi momenti imaju isti iznos, te da su u sigurnom području rada motora (Slika 24), te se za najveću dostignutu brzinu u simulaciji očitava maksimalni moment po krivulji momenta motora i uspoređuje se s najvećim momentom koji se javlja u simulaciji.

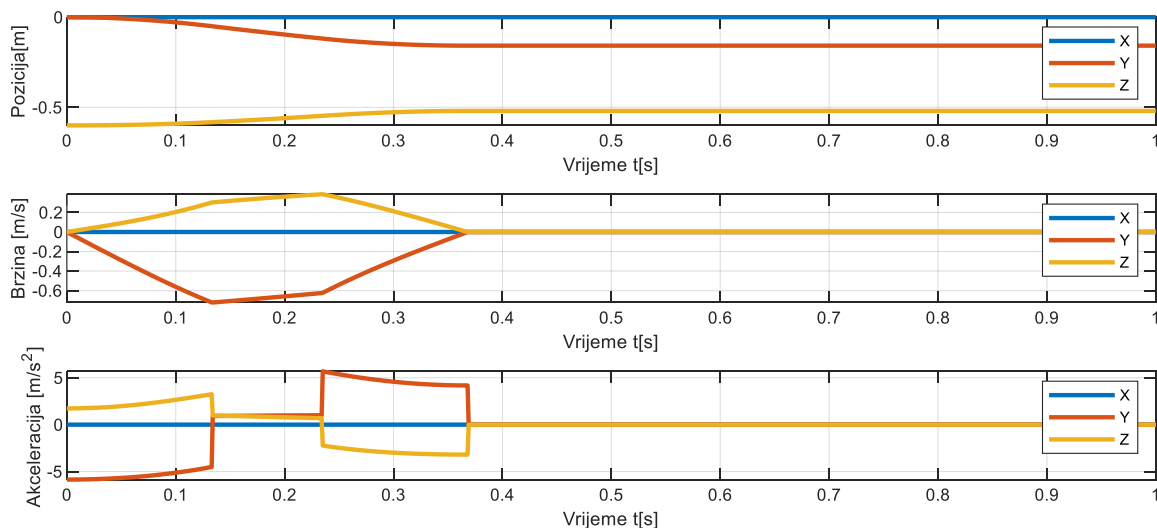
5.2.2. Kretnja u ravnini prvog člana robota

Početna pozicija platforme, to jest, prihvatnice je u točki (0,0,-600) mm. Samo se prvi član robota kreće prema nultoj poziciji u unutarnjim koordinatama. Cilj simulacije je promatranje iznosa momenta članova robota za pokretanje platforme u slučaju kretnje samo jednog člana. Slika 40. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine.



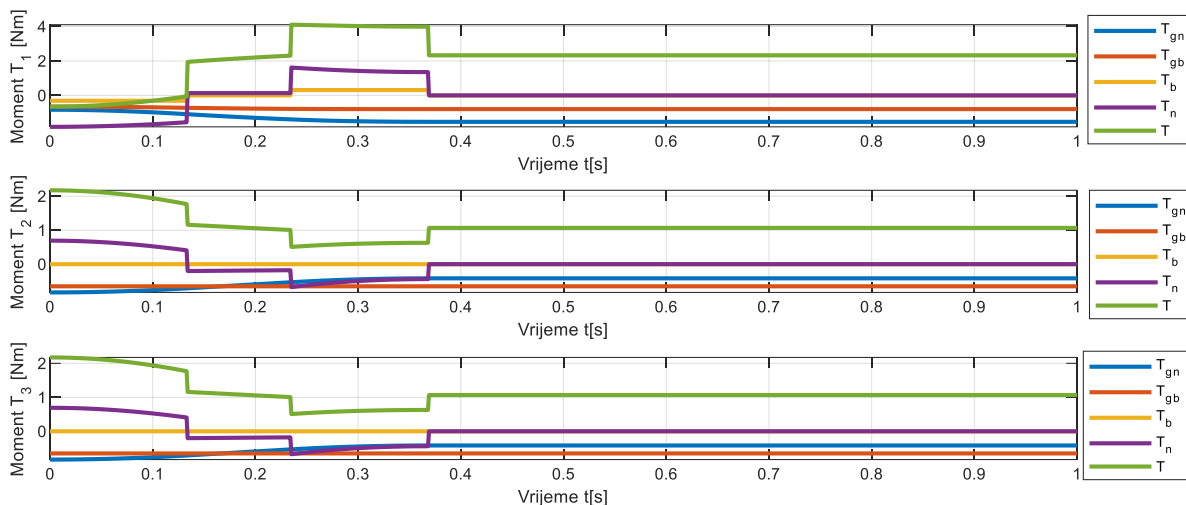
Slika 40. Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u ravnini prvog člana robota s trapeznim profilom brzine

Na slici 40. može se vidjeti da samo prvi član robota mijenja poziciju, dok drugi članovi miruju, to jest, ostaju u istoj poziciji. Slika 41. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine.



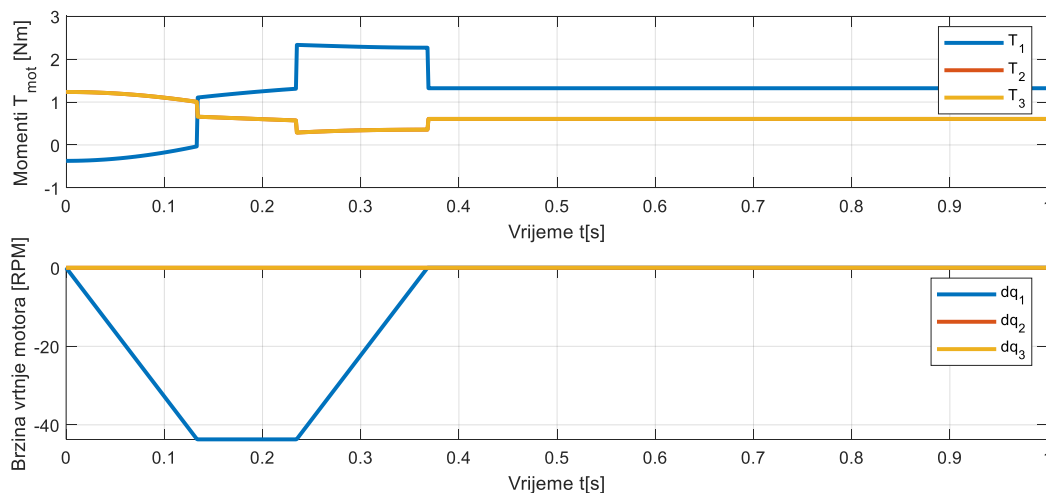
Slika 41. Pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u ravnini prvog člana robota s trapeznim profilom brzine

Na slici 41. može se vidjeti da se kretnja odvija samo u YZ ravnini, pošto je kinematski model prvog člana postavljen u toj ravnini. Slika 42. prikazuje momente članova robota i njihove komponente pri kretnji po z-osi s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg.



Slika 42. Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg

Na slici 42. može se vidjeti da je potreban puno veći moment prvog člana robota za ubrzanje mase prihvatnice, kao i za držanje težine mase prihvatnice, nego kod ostalih članova robota. Inercija prihvatnice također utječe na druge članove robota, ali u puno manjim iznosima. Slika 43. prikazuje momente po članovima robota reducirani na izlazno vratilo motora pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine.

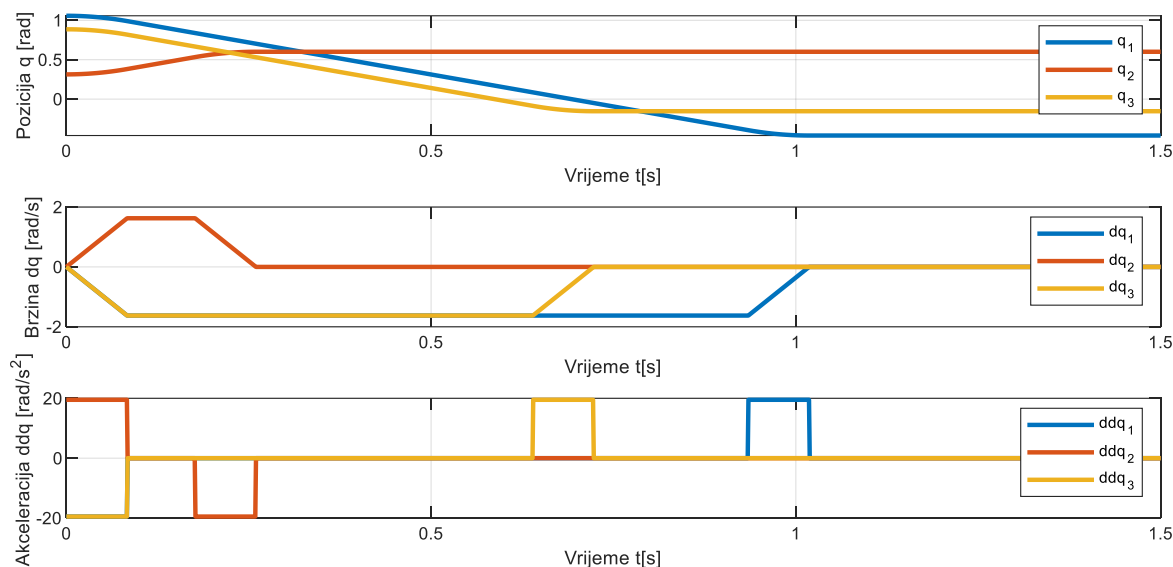


Slika 43. Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u ravnini prvog člana s trapeznim profilom brzine

Na slici 43. također se može vidjeti povećanje potrebnog momenta s obzirom na druge članove.

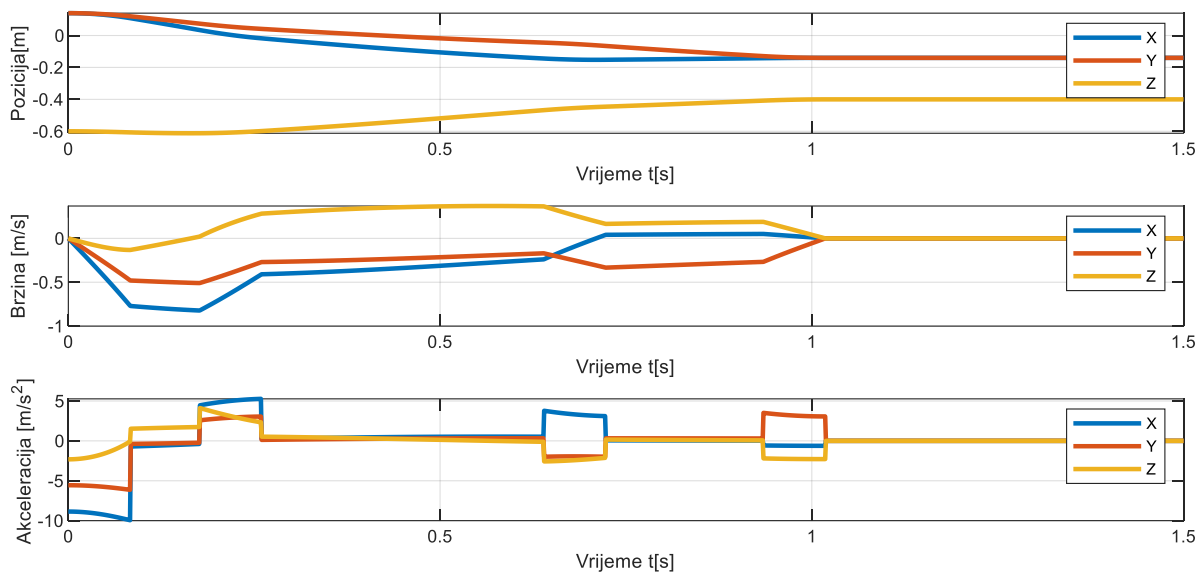
5.2.3. Kretnja u prostoru

Početni položaj prihvatnice je (140, 140, -600) mm, te brzinom na motoru od 2500 korak/s i akceleracijom od 30000 korak/s² dolazi do točke (-140, -140, -400) mm. Cilj simulacije je provjera momenta članova robota za normalan rad, kao i provjera maksimalne nosivosti vakuumske hvataljke. Trajanje simulacije je 1,5 s. Slika 44. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine.



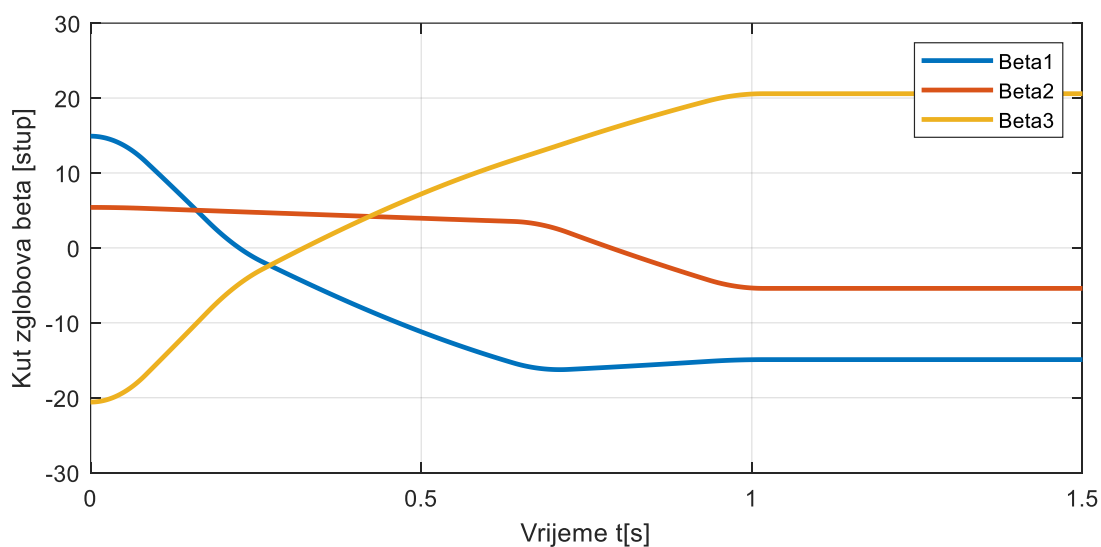
Slika 44. Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine

Na slici 44. mogu se vidjeti početne i krajnje pozicije svih unutarnjih koordinata robota, kao i njihove brzine i akceleracije. Pošto se svaki član kreće s maksimalnom akceleracijom i brzinom za različite potrebne puteve, neki članovi završavaju gibanja prije drugih članova robota. Slika 45. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije platforme robota u vanjskim koordinatama za kretnju u prostoru s trapeznim profilom brzine.



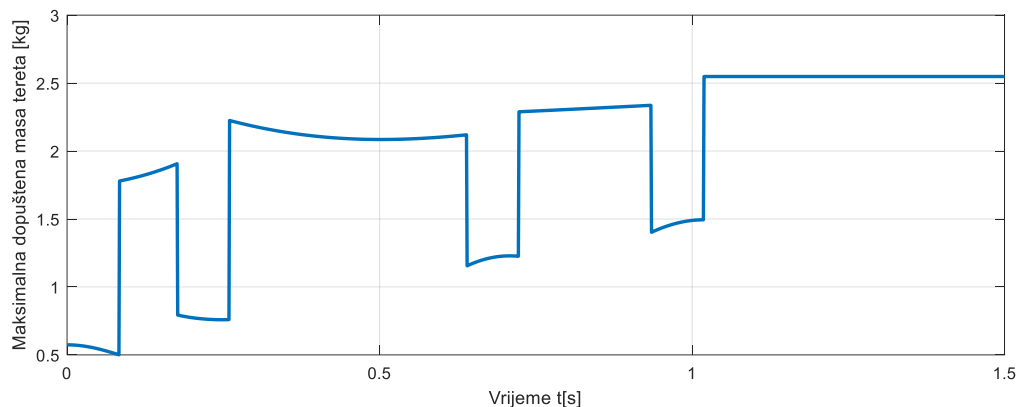
Slika 45. Pozicije, brzine i akceleracije u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine

Na slici 45. može se vidjeti da trajektorija u vanjskim koordinatama ne čini ravnu putanju, jer članovi robota dolaze u konačnu poziciju slobodnim prijelazom, koji je zadan u unutarnjim koordinatama robota. Također, zbog samog oblika baze i postave aktuatora, može se vidjeti da akceleracije nekih članova utječu na sve komponente vanjskih koordinata, pa time i brzine, zbog postavljenog koordinatnog sustava u kinematskom modelu. Slika 46. prikazuje kutove zakreta sfernih zglobova β pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine.



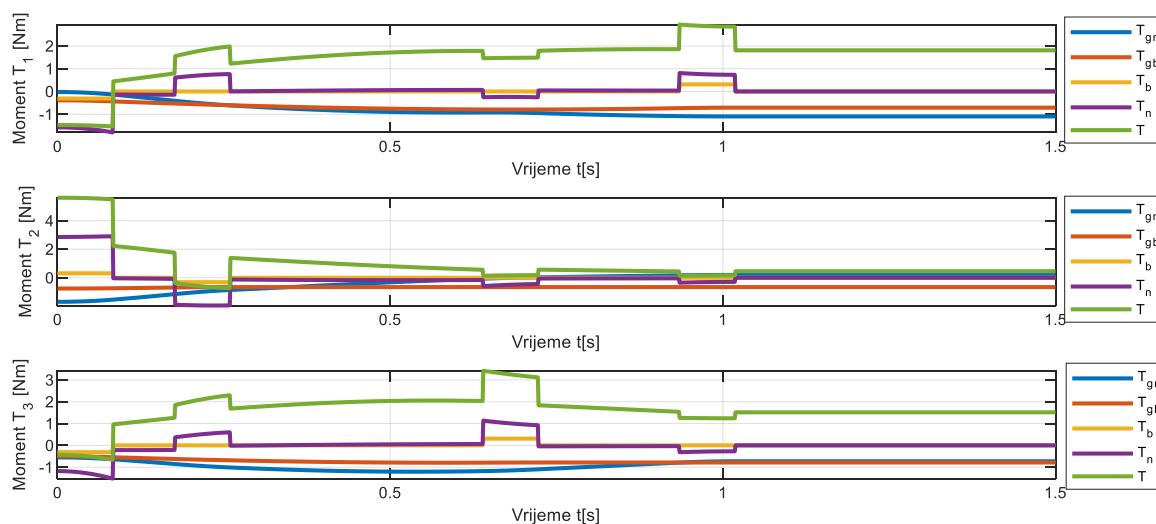
Slika 46. Kut zakreta sfernih zglobova β pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine

Na slici 46. može se vidjeti da su kutovi zakreta približno unutar dopuštenih vrijednosti. Slika 47. prikazuje maksimalnu masu tereta pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine.



Slika 47. Maksimalna masa tereta pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine

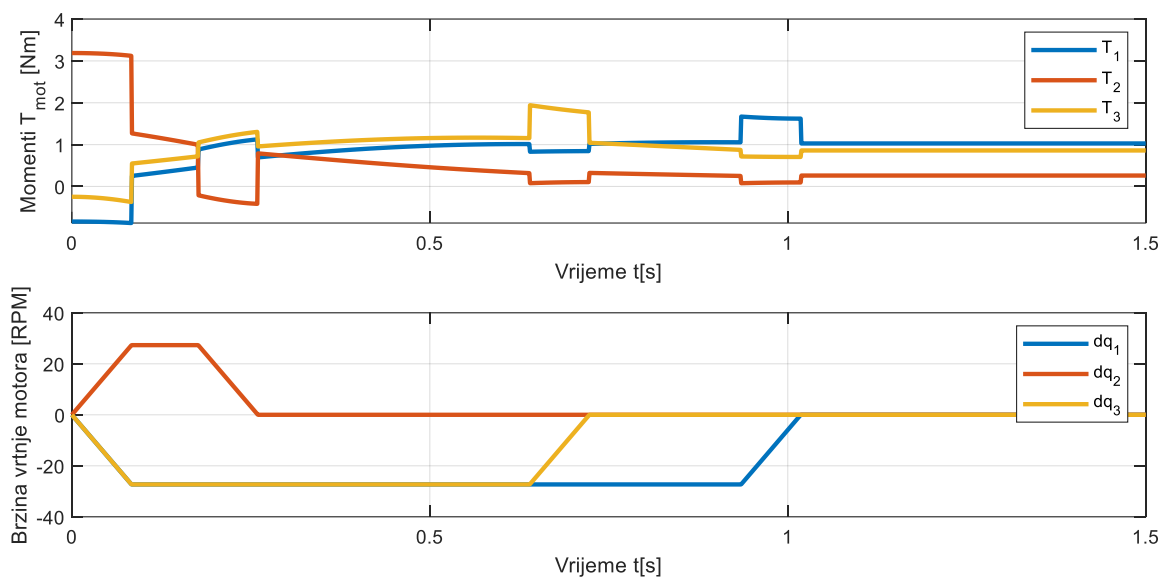
Na slici 47. može se vidjeti da je minimalni iznos dopuštene mase tereta u trenucima malo iznad 0,5 kg. Također, nagli skokovi i padovi događaju se jer akceleracije u vanjskim koordinatama robota nisu istovremene. Slika 48. prikazuje momente članova robota i njihove komponente pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg.



Slika 48. Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg

Na slici 48. se može opet vidjeti da akceleracije članova robota međusobno utječu na momente drugih članova, zbog zatvorene kinematske strukture robota. Slika 49. prikazuje momente

reducirane na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine.



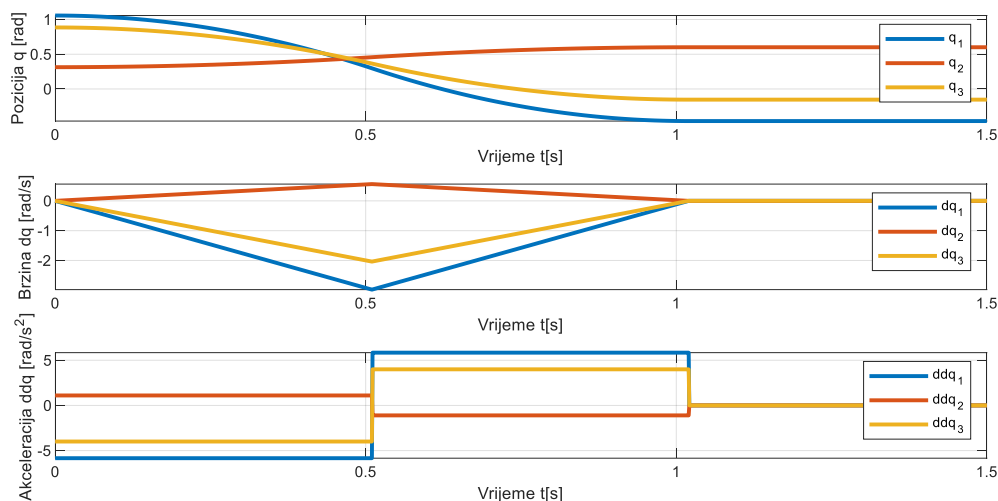
Slika 49. Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u prostoru s trapeznim profilom brzine

Na slici 49. može se vidjeti kako akceleracije utječu na ukupni moment, kao i težine. Maksimalni iznos momenta u sigurnom je području rada motora. Smanjenjem akceleracije robota, može se postići veća nosivost vakuumske hvataljke, te smanjiti skokovi potrebnog momenta aktucije.

5.3. Simulacija trajektorija s trokutnim profilom brzine zadane u unutarnjim koordinatama robota

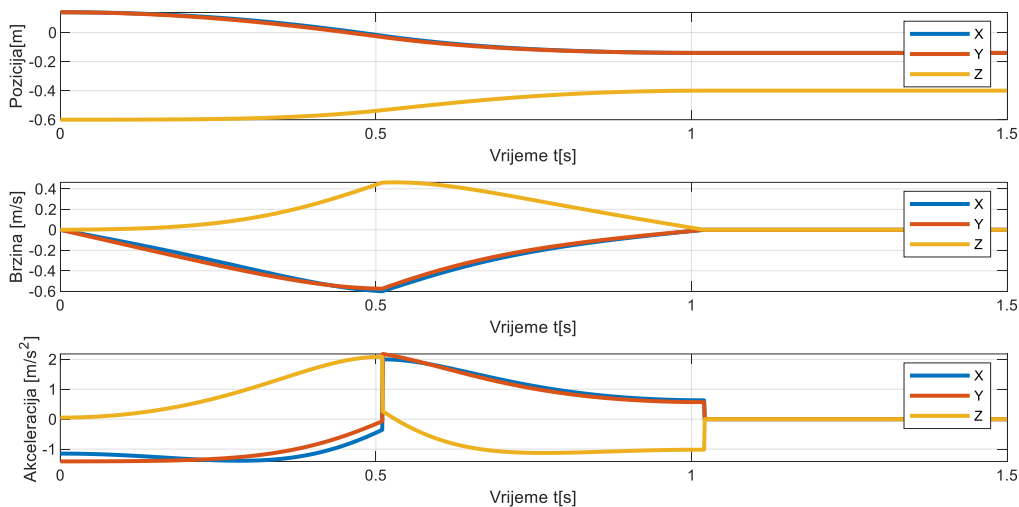
U prijašnjim simulacijama može se vidjeti kako veliki iznosi akceleracije utječu na iznos potrebnog momenta aktuatora, te kako neki članovi završe kretnju prije ostalih, što stvara nepotrebno naprezanje upravljačkih varijabli, to jest momenta. Implementacijom trokutnih profila brzine, kretnje članova robota sastoje se samo od akceleracije i deceleracije, bez faze kretnje konstantnom brzinom. Time se smanjuje iznos akceleracije za kretnju u istom vremenskom periodu. Također, iznosi akceleracija se prilagođavaju kako bi svi članovi završili kretnju u isto vrijeme. Kao i u slučaju s trapeznim profilom brzine, prihvatnica robota kreće iz točke (140, 140, -600) mm te završava u točki (-140, -140, -400) mm. Cilj simulacije je usporedba momenta za promjenu profila kretnje, to jest, utjecaj ubrzanja članova robota na momente. Kao što prikazuje Slika 44, neki članovi robota završavaju kretnju prije drugih, te da

zadnji član završava kretnju oko 1,02 s. Zato je odabrano trajanje kretnje svih članova 1,02 s. Slika 50. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine.



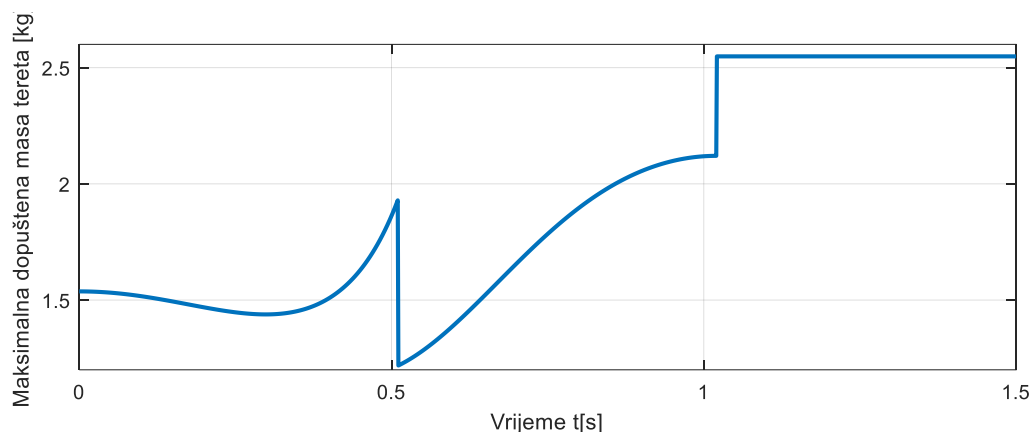
Slika 50. Pozicije, brzine i akceleracije članova robota pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine

Na slici 50. može se vidjeti da svi članovi robota stižu u svoje pozicije u isto vrijeme kao i zadnji član u slučaju s trapeznim profilom brzine. Također, mogu se primijetiti i manji iznosi akceleracija članova robota, ali i povećani iznosi maksimalnih brzina. Slika 51. prikazuje pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine.



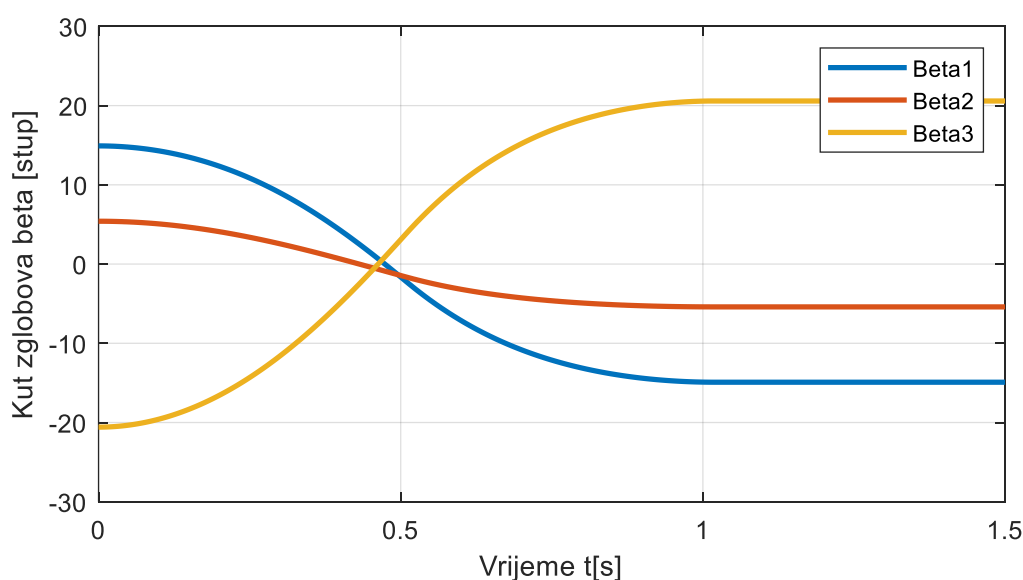
Slika 51. Pozicije, brzine i akceleracije platforme u vanjskim koordinatama robota pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine

Na slici 51. mogu se uočiti i manje akceleracije u vanjskim koordinatama robota, čime se teoretski može ostvariti i veća nosivost vakuumske hvataljke. Trajektorije su i dalje zadane u unutarnjim koordinatama robota, pa pozicije, brzine i akceleracije u vanjskim koordinatama ne čine ravnu liniju. Slika 52. prikazuje maksimalnu masu tereta pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine.



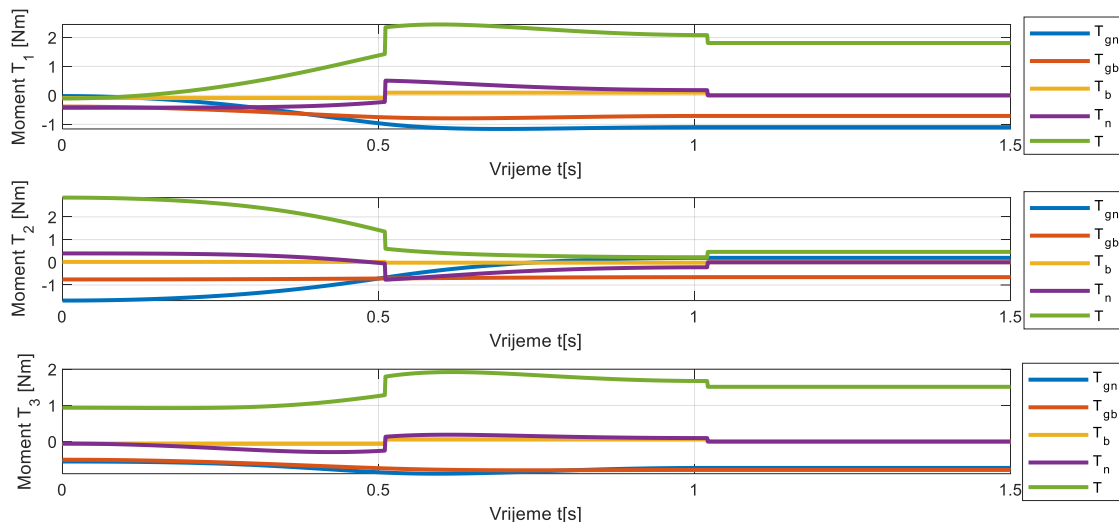
Slika 52. Maksimalna masa tereta pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine

Na slici 52. može se vidjeti da je maksimalna dopuštena masa veća nego kod kretnje s trapeznim profilom brzine, te je manji broj skokova. Razlog tome su smanjeni iznosi akceleracija na platformi robota. Slika 53. prikazuje kutove zakreta sfernih zglobova β pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine.



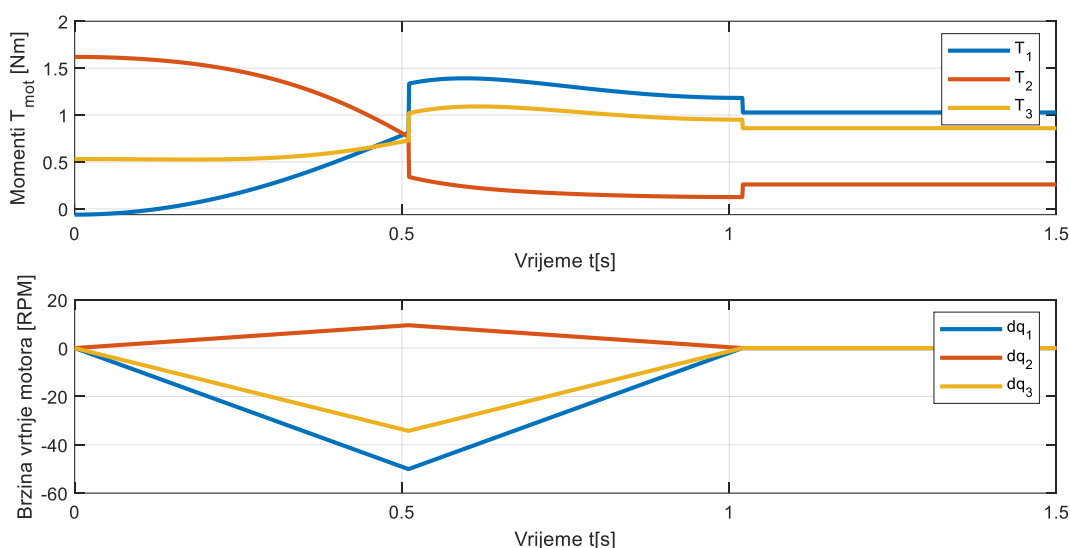
Slika 53. Kut zakreta sfernih zglobova β pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine

Na slici 53. može se vidjeti da je kut beta trećeg člana robota malo iznad dopuštenih vrijednosti, jer su početne i krajnje točke blizu ruba radnog područja. Također oblik krivulje se mijenja. Slika 54. prikazuje momente članova robota i njihove komponente pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg.



Slika 54. Momenti članova robota i njihove komponente pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine s masom tereta od 0,4 kg

Na slici 54. može se vidjeti kako su maksimalni iznosi momenta za ubrzanje platforme i nadlaktica puno manji. Slika 55. prikazuje momente reducirane na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine.



Slika 55. Momenti reducirani na izlazno vratilo reduktora motora pri kretnji u prostoru s trokutnim profilom brzine

Na slici 55. može se vidjeti da je maksimalni iznos momenta manji nego u slučaju s trapeznim profilom brzine, ali su neki članovi dostigli veću brzinu vrtnje, što kod koračnih motora znači i manji dostupni moment.

6. POJAŠNJENJE KODA ZA UPRAVLJANJE

6.1. Korištene biblioteke

6.1.1. *Math.h* biblioteka

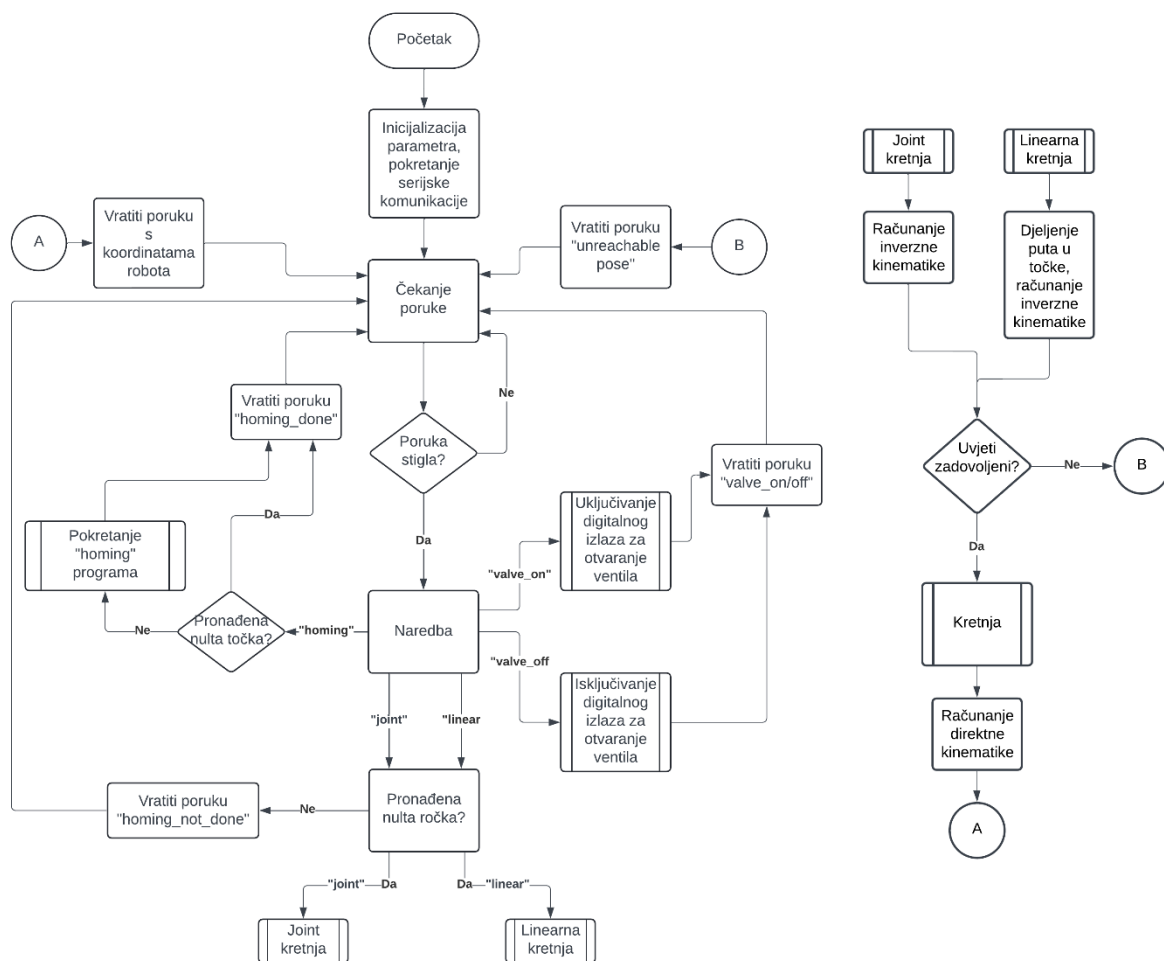
Arduino math.h biblioteka ugrađena je u Arduino IDE programsko sučelje, te sadrži mnogo matematičkih operatora kao računanje korijena, logaritma i trigonometrijskih funkcija.

6.1.2. *AccelStepper* biblioteka

AccelStepper biblioteka sadrži razne funkcije za upravljanje koračnim motorima. Jedna od najvećih prednost biblioteke je što korisnik ne mora pisati vlastite algoritme i funkcije za odašiljanje signala koračnim motorima. Biblioteka također ima funkcije koje implementiraju konstantnu akceleraciju, čime se izbjegava naglo ubrzanje motora do željene brzine, što smanjuje moment potreban za ubrzanje tereta.

6.2. Tok programa

Upravljanje robotom bazira se na porukama preko serijske komunikacije. Kako bi Arduino znao kad je kraj poruke, svaka poruka mora završavati s „*“ znakom. Robot naredbe prima u obliku poruke „**naredba, x, y, z, brzina, akceleracija, udaljenost od vrha alata***“. Koordinate željene pozicije zadaju se u milimetrima, kao i udaljenost od vrha alata, dok se brzine za gibanja zadaju u unutarnjim koordinatama u mjernoj jedinici korak/s, te akceleracije u jedinici korak/s². Robotu se šalju naredbe pozicije u vanjskim koordinatama robota, to jest, x, y i z koordinate robota. Zbog same kinematske strukture robota, upravljanje pojedinačnim kutovima daje nesmisleno krajnju poziciju ili kretanje. Prije početka rada, potrebno je pronaći nultu poziciju robota (*eng. homing*). Slanjem naredbe „homing*“, robot pokreće program za pronalaženje nule. Robot prvo pomiče članove za određeni kut, kako ne bi došlo do prelaska dopuštenog kuta zakreta zglobnih glava. Nakon toga svaka ruka robota se pomiče stalnom brzinom dok ne aktivira granični prekidač. Kad je svaki član pronašao granični prekidač, robot se pomiče na pravu nulu, to jest, kinematsku nulu unutarnjih upravljanih koordinata robota. Ako se robotu pošalje bilo koja naredba kretnje dok nije pronađena nulta pozicija, robot vraća poruku da nije pronađena nulta pozicija. Slika 56. prikazuje tok programa mikrokontrolera.



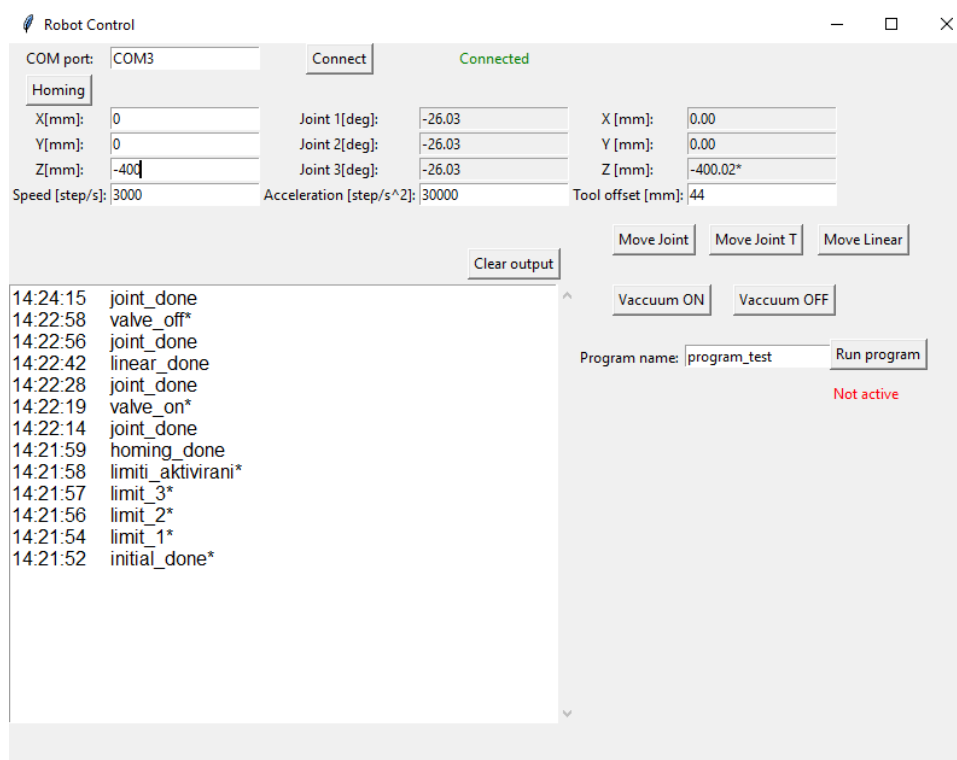
Slika 56. Dijagram toka rada mikrokontrolera

Kada se pošalje naredba za kretnju u točku, mikrokontroler računa inverznu kinematiku, gdje osim računanja pozicija unutarnjih koordinata, računa i provjerava da li su kutovi β unutar dopuštenih vrijednosti, kao i kutovi zakreta zglobova unutarnjih koordinata. Također, provjerava se da li je z koordinata točke iznad tla, kako robot ne bi udario u podlogu. Ako svi navedeni uvjeti nisu zadovoljeni, robot vraća poruku da poziciju nije moguće dostići. Rezultat inverzne kinematike, to jest, kutovi zakreta motora zaokružuju se na najbližu vrijednost rezolucije motora. Programirane su tri vrste kretnje: kretnje u unutarnjim koordinatama s trapeznim profilom brzine, kretnje u unutarnjim koordinatama s trokutnim profilom brzine, te ravne (linearne) kretnje. Kod kretnji s trapeznim profilom brzine, svi članovi kreću se zadanom brzinom i akceleracijom do konačnih pozicija. Kod kretnji s trokutnim profilom brzine, zadana akceleracija uzima se kao maksimalna akceleracija. Član robota koji mora prijeći najveći put u

unutarnjim koordinatama ubrzava maksimalnom akceleracijom, te se računaju potrebne akceleracije za druge članove kako bi kretanja završila približno u isto vrijeme. Kod linearnih gibanja, brzina u poruci mikrokontroleru zadaje se u mjernoj jedinici mm/s, dok se dio poruke za akceleraciju pretvara u broj međutočaka kretnji. Mikrokontroler računa rješenje inverzne kinematike za svaku točku po krivulji, te ih dijeli u jednake vremenske korake. Za svaki od međukoraka računa se brzina u unutarnjim koordinatama. Kad se bilo koja od kretnji završi, mikrokontroler računa direktnu kinematiku sa zaokruženim vrijednostima kutova zakreta članova, te vraća poruku s informacijom da je kretanja završena, te vraća trenutne unutarnje i vanjske koordinate robota. Uključivanje ili isključivanje ventila također se postiže preko slanja poruka mikrokontroleru.

7. RAČUNALNI PROGRAM ZA UPRAVLJANJE S ROBOTOM

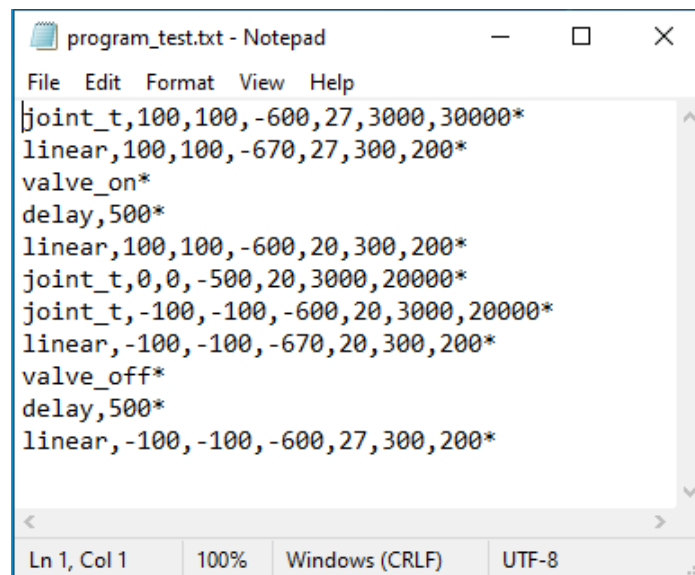
Iako se robotom može upravljati preko serijske komunikacije preko Arduino IDE programskog sučelja, izrađena je Python aplikacija za slanje naredbi robotu, te za komunikaciju i pokretanje predodređenih programa. Slika 57. prikazuje Python aplikaciju za upravljanje s robotom.



Slika 57. Izgled korisničkog sučelja programa za upravljanje robotom

Na slici 57. može se vidjeti izgled sučelja. Korisnik prije rada mora upisati naziv kanala serijske komunikacije. U slučaju krivog upisa, program vraća upozorenje. Sve funkcije su onemogućene dok serijska komunikacija nije ostvarena. Prilikom ostvarivanja serijske komunikacije, prvo je potrebno pronaći nultu točku robota (*eng. homing*). Potom se mogu koristiti funkcije kretnji. Korisnik upisuje željene koordinate, brzinu i akceleraciju, te udaljenost vrha alata od kinematskog središta prihvatnice. Poruke koje robot vraća upisuju se u polje s odgovorima robota, te se pozicije upisuju u siva polja, koja nije moguće uređivati. Moguće je ručno napraviti program u obliku tekstualne datoteke s „.txt“ formatom, gdje se upisuju naredbe koje se direktno šalju mikrokontroleru. Također, mogu se stvarati i vremenski zastoji, koji se događaju u Python programu. Python će napraviti vremenski zastoj u zatraženom iznosu u

milisekundama, te kad zastoj završi, šalje se sljedeća naredba. Slika 58. prikazuje izgled programa napisanog u tekstualnoj datoteci.



```
program_test.txt - Notepad
File Edit Format View Help
joint_t,100,100,-600,27,3000,30000*
linear,100,100,-670,27,300,200*
valve_on*
delay,500*
linear,100,100,-600,20,300,200*
joint_t,0,0,-500,20,3000,20000*
joint_t,-100,-100,-600,20,3000,20000*
linear,-100,-100,-670,20,300,200*
valve_off*
delay,500*
linear,-100,-100,-600,27,300,200*
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Slika 58. Primjer izgleda programa u tekstualnoj datoteci

Na slici 58. može se vidjeti da su naredbe identičnog oblika kao u poglavlju prije. Za razliku od odašiljanja naredbi preko tipki u programu, gdje se sva upisna polja za koordinate, brzine i akceleracije spajaju u jednu poruku, u ovom slučaju program direktno šalje tekst iz tekstualne datoteke. Kod rada načina s programom, robot čeka povratnu poruku robota prije nego kreće sa sljedećom naredbom. Kod svake završene kretnje u siva polja upisuju se trenutne pozicije robota sa zaokruženim vrijednostima koraka motora. U bijelo polje u donjem lijevom kutu upisuju se povratne poruke s robota, te vrijeme kad su poruke poslane.

8. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane jednadžbe kinematike Delta robota i princip njihovog rješavanja, te je predstavljen dinamički model temeljen na principu virtualnog rada. Zbog nedostatka povratne veze, nije moguće dobiti eksperimentalne rezultate, ali napravljena je provjera ponovljivosti robota. Kod aktuatora s otvorenom vezom, mikrokontroler nema informaciju da li je motor izgubio korak, te je bitno da do gubitka koraka ne dolazi u radu, s time se u obzir mora uzeti veći faktor sigurnosti. Kad bi na jednu operaciju kretnje robota motor izgubio korak, na dulje vrijeme greška bi se sumirala. Napravljena je provjera ponovljivosti robota, gdje sa zadanom akceleracijom i brzinom robot 50 puta dolazi u tri različite točke na podlozi s masom od 0,560 kg. Zaključeno je da iznosi momenta kretnji moraju biti za oko 0,5 Nm manji od dopuštenih vrijednosti momenta motora, kako motori ne bi gubili korak, ali je preporučeno uzeti veće faktore sigurnosti. Za kretnje simulirane u radu, provjerena je sila vakuumske hvataljke, te je nosivost u sigurnom području rada. Daljnjom optimizacijom koda mikrokontrolera može se postići kraće vrijeme računanja kinematike, te boljim algoritmom za upravljanje koračnim motorima može se postići i interpolacija trajektorija uz pomoć Jacobijeve matrice.

LITERATURA

- [1] Pandilov Z., Dukovski V., COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS BETWEEN SERIAL AND PARALLEL ROBOTS, Faculty of Engineering Hunedoara, 2014.
- [2] Williams II R.L., The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions, Mechanical Engineering Ohio University, 2015.
- [3] Delta robot kinematics, HyperTriangle: <https://hypertriangle.com/~alex/delta-robot-tutorial/>, (pristupljeno 05.01.2024.)
- [4] The new KR DELTA robot impresses where hygiene is of the essence, KUKA: <https://www.kuka.com/en-de/company/press/news/2021/02/the-new-kr-delta-robot>, (pristupljeno 05.01.2024.)
- [5] Olsson A., Modeling and control of a Delta-3 robot, Lund University, 2009.
- [6] Nema 17 Stepper Motor Bipolar L=48mm w/ Gear Ratio 14:1 Planetary Gearbox, StepperOnline: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor-bipolar-1-48mm-w-gear-ratio-14-1-planetary-gearbox-17hs19-1684s-pg14?search=17HS19-1684S-PG14>, (pristupljeno 05.01.2024.)
- [7] Inline ejectors, PIAB: <https://www.piab.com/vacuum-pumps-and-ejectors/inline-ejectors/0122022>, (pristupljeno 05.01. 2024.)
- [8] Valves and solenoid valves, Camozzi: <https://shop.camozzi.com/store/camozzi/th/en/valves-and-solenoid-valves/series-3/p/20-3338-6200>, (pristupljeno 05.01.2024.)
- [9] ESP32 vs Arduino: Which Microcontroller Should You Choose?, Allelco: <https://www.allelcoelec.com/blog/ESP32-vs-Arduino-Which-Microcontroller-Should-You-Choose.html>, (pristupljeno 05.01.2024.)
- [10] DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current, Pololu: <https://www.pololu.com/product/2133/specs>, (pristupljeno 05.01.2024.)

PRILOZI

- I. Elektronička shema
https://github.com/VidPavlovic/Diplomski/tree/main/Elektronicka_shema
- II. Pneumatska shema
https://github.com/VidPavlovic/Diplomski/tree/main/Pneumatska_shema
- III. Arduino kod https://github.com/VidPavlovic/Diplomski/tree/main/Arduino_kod
- IV. MATLAB kod https://github.com/VidPavlovic/Diplomski/tree/main/MATLAB_kod
- V. Python kod https://github.com/VidPavlovic/Diplomski/tree/main/Python_kod
- VI. Tehnički crteži https://github.com/VidPavlovic/Diplomski/tree/main/Tehnicky_crtezi