

Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu

Facultatea de Inginerie

Proiect – Proiectarea Roboților
Braț robotic cu 5 grade de libertate

Student: Orzan Cătălin-Marian

Specializare: Robotică, anul III

Cadru didactic: Ș. L. Dr. Ing. Crenganiș Mihai

Sibiu

2023

CUPRINS

1. Introducere – Proiectarea roboților	3
2. Descrierea proiectului	4
Acționarea	5
Sistemul cuplajelor de pe axa z	7
Cuplajele elastice	10
Componentele necesare	12
Șuruburile necesare	13
3. Modelarea MATLAB – Simulink	14
Cinematica directă	15
Cinematica inversă	16
Calculul cinematicii inverse	17
Modelul Simulink	18
Bibliografie	20

1. Introducere – Proiectarea roboților

Proiectarea roboților este o disciplină care se ocupă cu conceperea și dezvoltarea sistemelor robotice. Aceasta implică integrarea cunoștințelor din domenii precum ingineria mecanică, ingineria electrică, ingineria software și mecatronica pentru a crea mașini capabile să efectueze sarcini automate și repetitive.

Unul dintre conceptele cheie în proiectarea roboților este cel de grade de libertate (DoF - Degrees of Freedom). Acesta se referă la numărul de mișcări independente pe care un robot le poate realiza. Fiecare grad de libertate permite unui robot să se deplaseze sau să efectueze o acțiune într-un anumit mod controlat. De exemplu, un braț robotic cu șase grade de libertate poate realiza mișcări complexe în spațiu.

Pentru a controla mișcările roboților, se folosesc concepte precum cinematica directă și cinematica inversă. Cinematica directă se referă la procesul de determinare a poziției și orientării finale a unui robot, cunoscând lungimile și unghiurile articulațiilor sale. Pe de altă parte, cinematica inversă este procesul de determinare a unghiurilor și lungimilor articulațiilor necesare pentru a obține o anumită poziție și orientare a robotului.

Pentru a modela și simula comportamentul roboților înainte de a-i construi, se utilizează instrumente software precum MATLAB cu Simulink. MATLAB este un mediu de calcul numeric și programare, care permite proiectanților să modeleze și să rezolve diverse probleme matematice și de inginerie. Simulink, pe de altă parte, este o extensie a MATLAB care permite crearea și simularea sistemelor dinamice, inclusiv roboți. Această combinație oferă posibilitatea de a testa și optimiza comportamentul roboților înainte de a-i implementa fizic.

În proiectarea roboților, modelarea 3D și calculele trigonometrice sunt, de asemenea, componente importante. Modelarea 3D permite proiectanților să creeze modele virtuale ale roboților, inclusiv geometria, articulațiile și conexiunile acestora. Aceste modele pot fi apoi utilizate pentru simulări și analize detaliate ale mișcărilor și comportamentului roboților.

Calculele trigonometrice sunt esențiale în proiectarea roboților, deoarece permit determinarea pozițiilor, unghiurilor și lungimilor articulațiilor în funcție de mișcarea și orientarea dorită a robotului. Aceste calcule sunt utilizate în procesul de cinematică inversă și în simulările de mișcare și coliziune. Astfel se pot crea și simula roboți cu performanțe și comportamente precise și eficiente.

2. Descrierea proiectului



Fig 1 – Brațul robotic realizat

Proiectul constă în construirea unui robot cu 5 grade de libertate, care implică și implementarea cinematicii directe și inverse în MATLAB. Am realizat și dimensionat un model 3D al robotului utilizând CATIA V5R19. Pentru mișcarea robotului sunt utilizate câte două motoare pentru cupla de rotație pe axa Y. Distanța dintre cuplajele robotului este de 200mm.

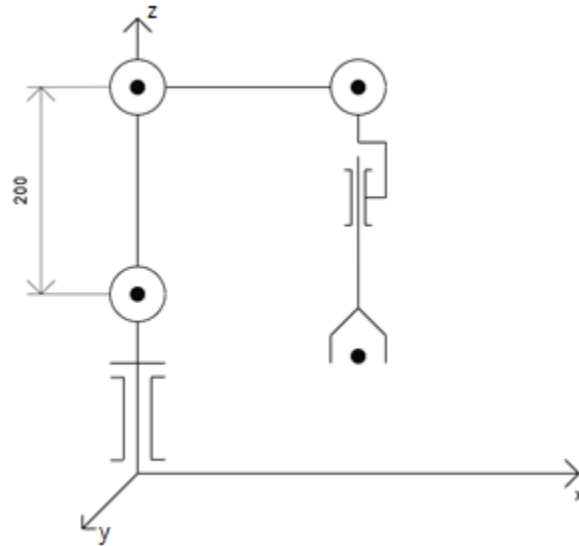


Fig 2 – Structura robotului cu 5 grade de libertate proiectat

Acționarea robotului este realizată cu motoare având un sistem de tip melc - roată melcată, deja existent pe piață, alimentat la o tensiune de 12V.

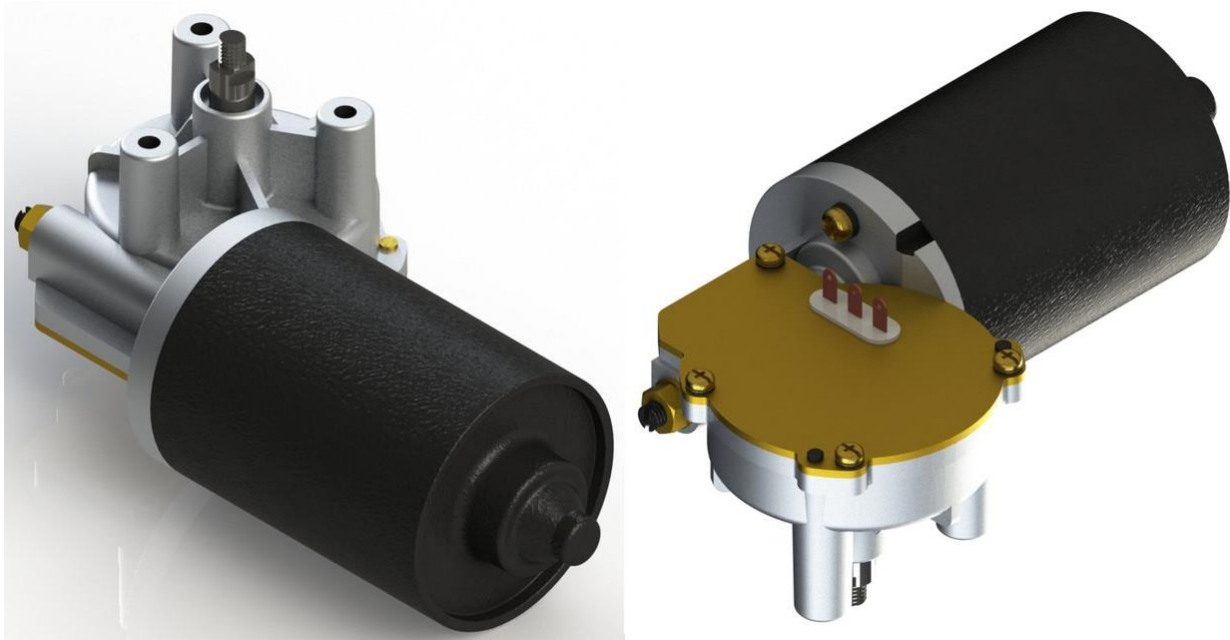


Fig 3 – Motorul utilizat

Printre avantajele motoarelor cu mecanism melc – roată melcată se numără:

- Cuplul mare: motoarele de acest tip pot oferi forță și putere suficiente pentru a acționa mecanisme și încărcături grele;
- Viteză redusă și control precis: utile pentru aplicații care au nevoie de o mișcare lină și exactă, precum cele industriale, manipularea uneltelor, etc;

- Reversibilitatea: se pot acționa în ambele direcții, permițând mișcarea complexă a brațului robotic în orice condiții;
- Cost redus: motoarele cu mecanism melc – roată melcată sunt, în general, mai ieftine decât alte tipuri de motoare, precum cele cu angrenare sau servo-motoare.

Dezavantaje:

- Viteza redusă: deși regăsită și printre avantajele, în anumite situații, poate fi un dezavantaj, dacă în aplicații este necesară o acționare cu mișcări rapide sau un timp de răspuns rapid;
- Eficiență energetică scăzută: comparativ cu alte motoare, aceasta implică frecarea și pierderile de energie asociate. Astfel, acest tip de motoare necesită mai multă energie pentru realizarea aceleiași mișcări;
- Dimensiuni și greutate: motoarele cu mecanism roată melcată pot fi relativ mari și grele în comparație cu alte motoare. Acest aspect poate fi o limitare unde spațiul și greutatea sunt critice, precum roboții mobili și autonomi.

Structura internă a unui motor cu mecanism melc – roată melcată:

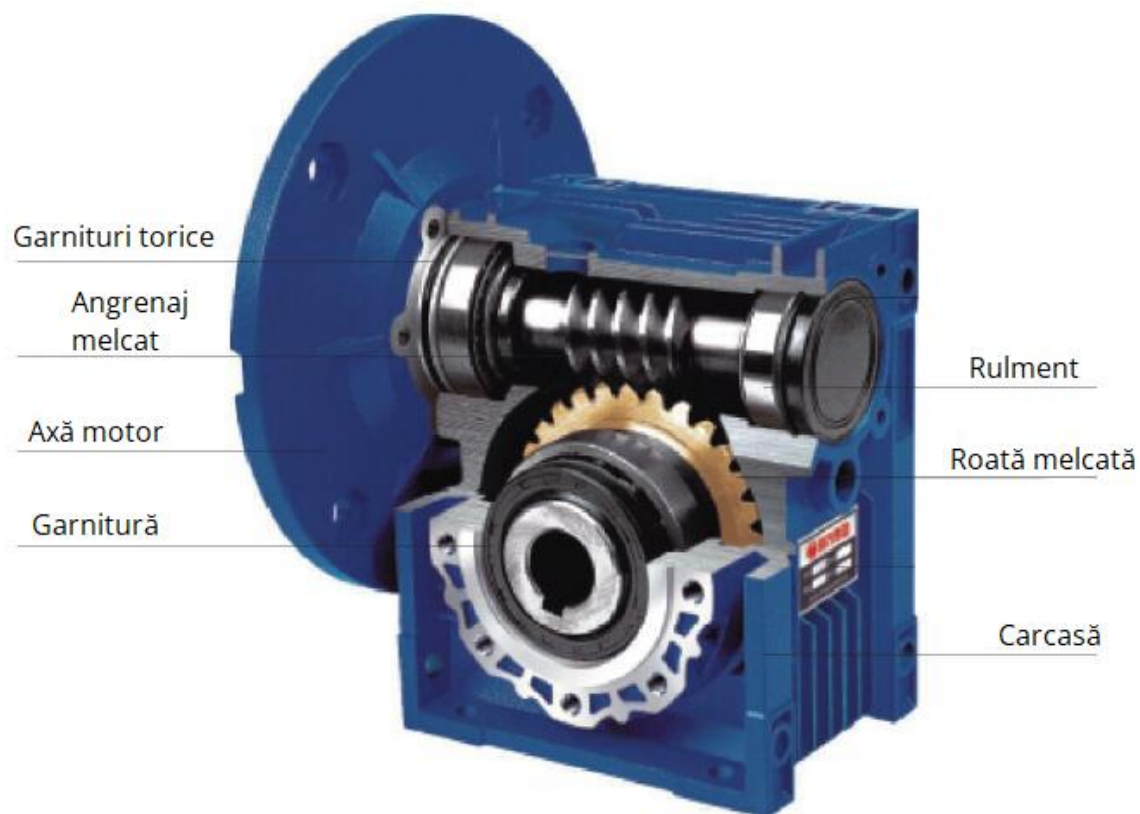


Fig 4 – Elemente componente motor

Realizarea structurii robotului este din elemente de metal, a căror structură simplă a fost ansamblată cu ajutorul șuruburilor. Pentru a asigura o aliniere corectă și pentru rigidizarea sistemului, fiecare componentă a robotului este prevăzută cu indentări specifice. Acestea permit poziționarea precisă și blocarea componentelor în poziția dorită, asigurând o structură solidă și stabilă.

Pornind de la o placă de metal utilizată drept baza robotului, aceasta are 4 piloni de susținere. Peste piloni este așezată o placă rotundă, cu un capac fixat în partea din mijloc, dimensionat după diametrul rulmentului. În capac se fixează primul motor, în interiorul acestuia se așează rulmentul, iar peste rulment se așează un al doilea capac, care vine fixat în placa de deasupra în multiple șuruburi. Între motor și cel de-al doilea capac se află un cuplaj elastic, pentru a transmite mișcarea.

Sistemul cuplajelor de pe axa z:

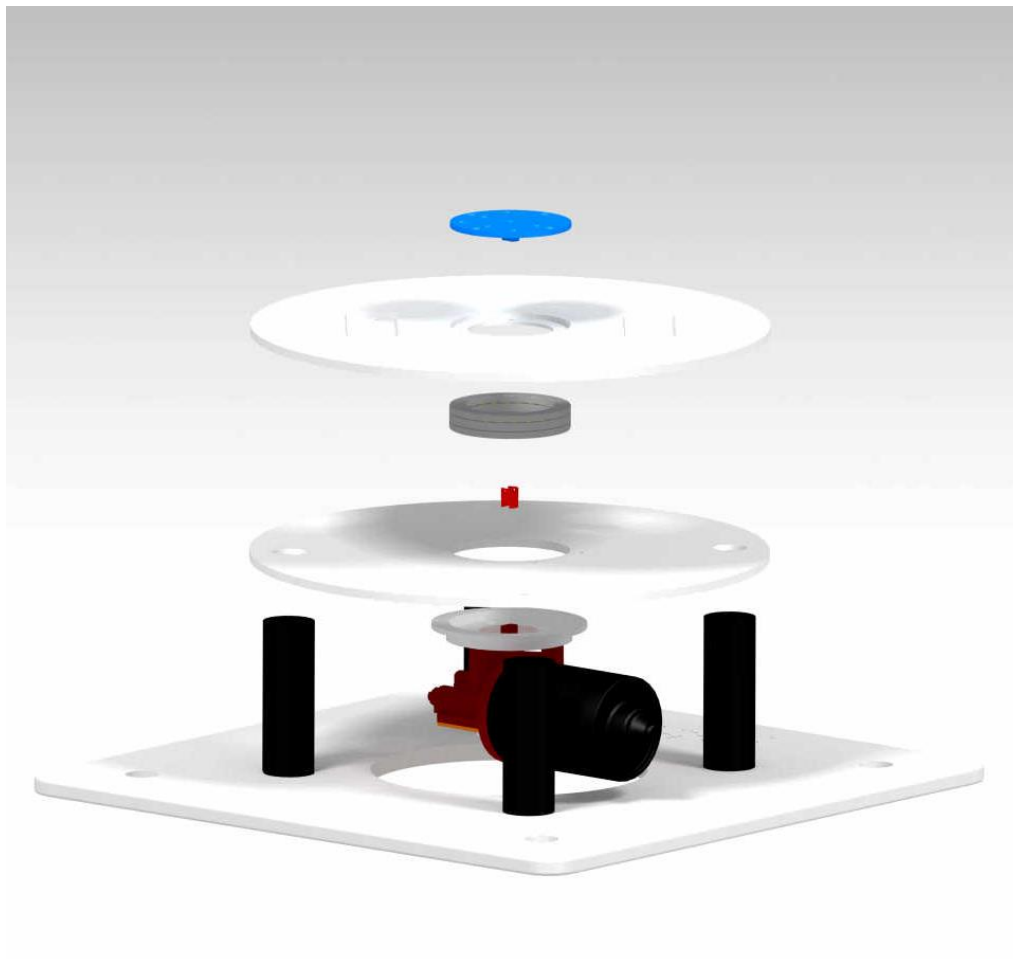


Fig 5 – Prima cuplă de rotație în jurul axei z

Pentru fixarea bazei robotului au fost realizate 4 alezaje. Dimensiunile de gabarit ale plăcii de bază și a distanței dintre alezaje sunt ilustrate în Fig 6.

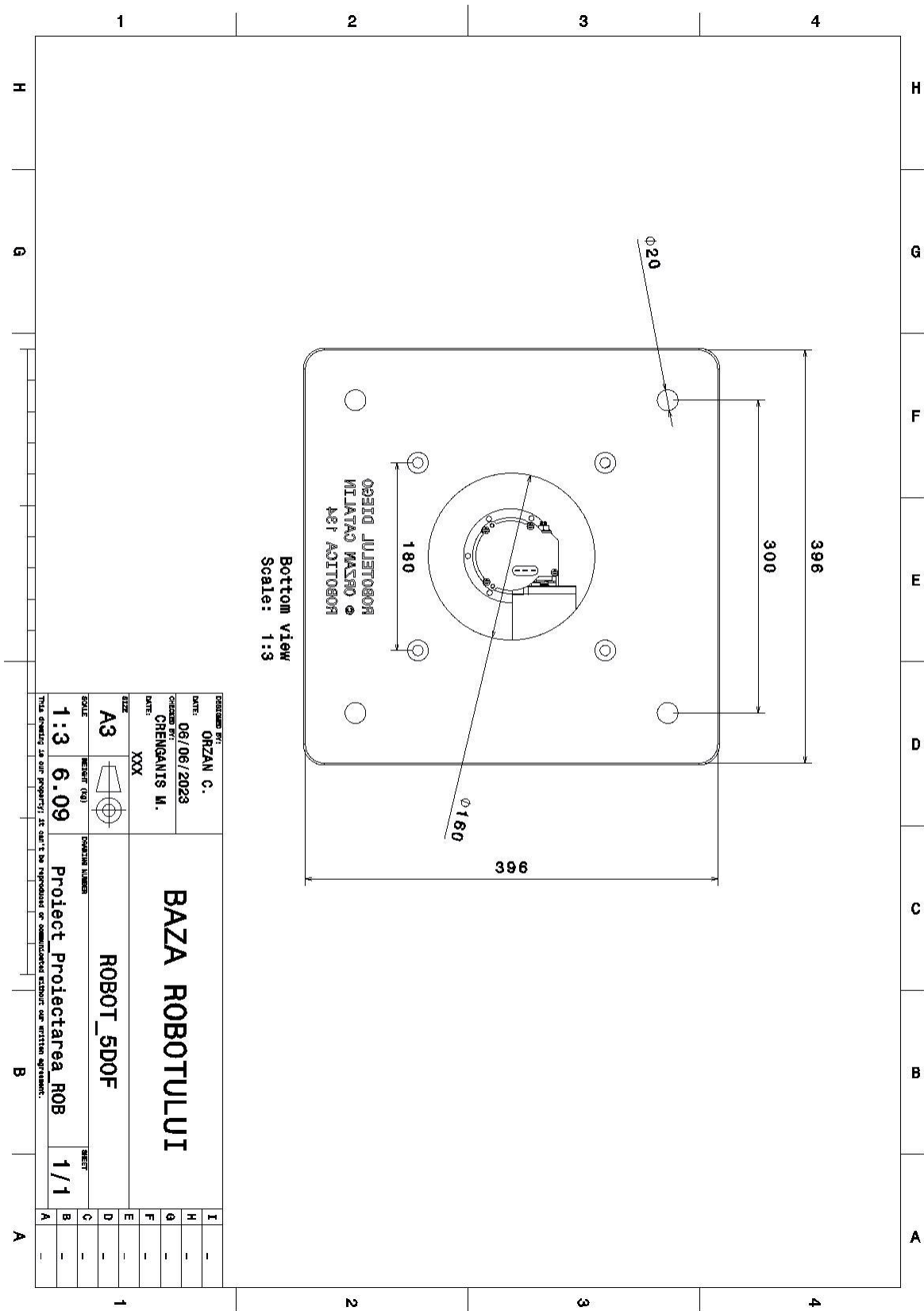


Fig 6 – Baza robotului

Placa învârtită de axul motorului are două indentări pentru fixarea primelor 2 brațe, așezate de-o parte și de alta a acesteia. Pe brațe vin fixate multiple elemente, cu un ax central între ele, pentru a realiza rotațiile de pe axa y.

Sistemul cuplajelor de pe axa y:



Fig 7 – *Cuplaj axa y cu 2 elemente mobile*

Motorul se fixează fie direct pe unul dintre brațe, fie intermediar pe acesta prin bușe de diferite mărimi. Între motor și axul învârtit se află, din nou, cuplaje elastice.

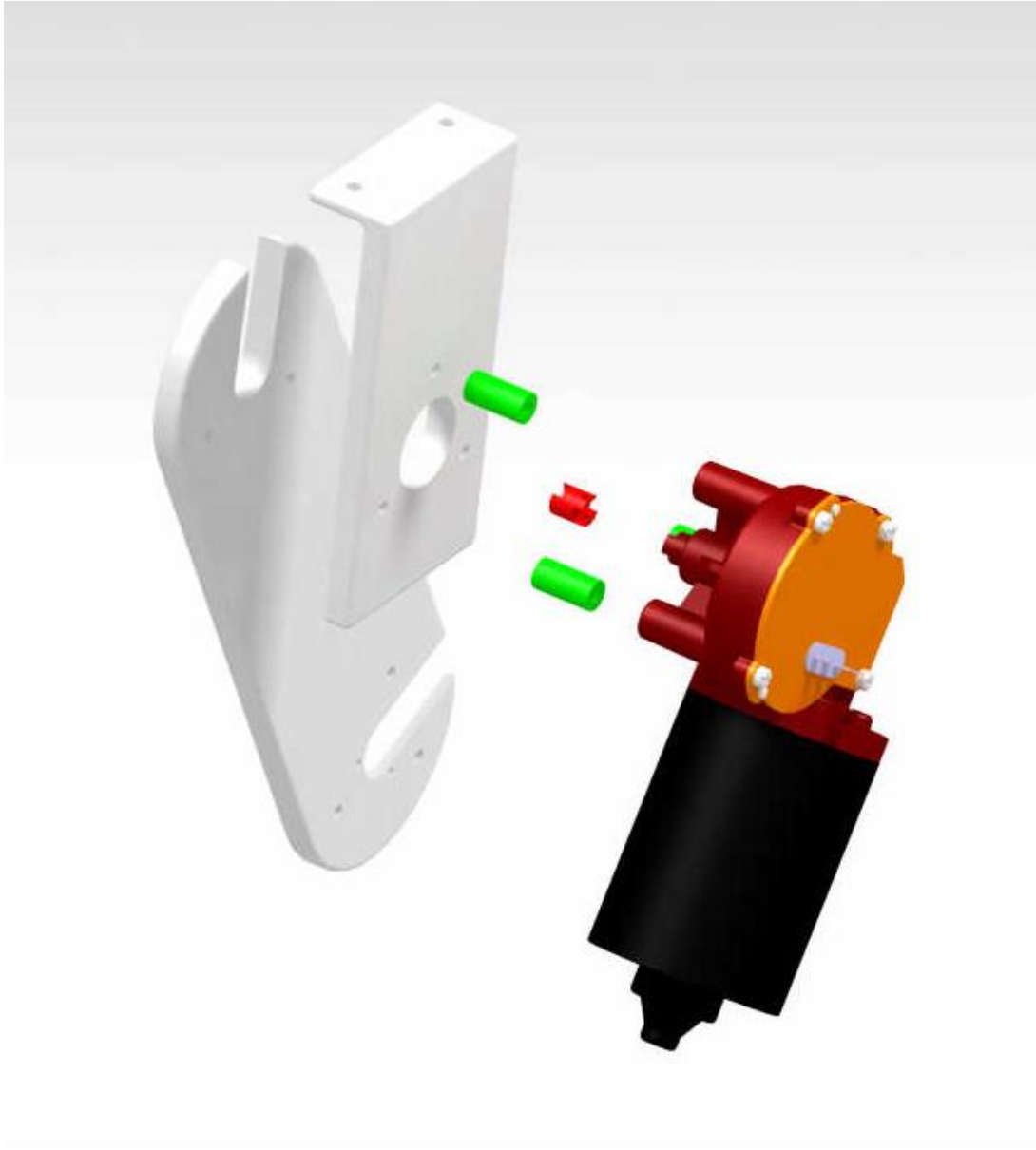


Fig 8 – *Fixarea motorului pe una cupla finală*

Cuplajele elastice au fost folosite pentru absorția șocurilor și a vibrațiilor ce pot apărea în timpul funcționării robotului. Acestea protejează componentele fragile de daune și contribuie la prevenirea defectării premature a sistemului. De asemenea, cuplajele elastice oferă o flexibilitate și adaptabilitate mai mare din punctul de vedere al toleranțelor la fabricație și al eventualelor deformări a componentelor, însă pot apărea deformări elastice, afectând eficiența sistemului. Din acest punct de vedere, este necesară o monitorizare și întreținere mai atentă, împreună cu eventuale costuri suplimentare și necesitatea înlocuirii periodice.

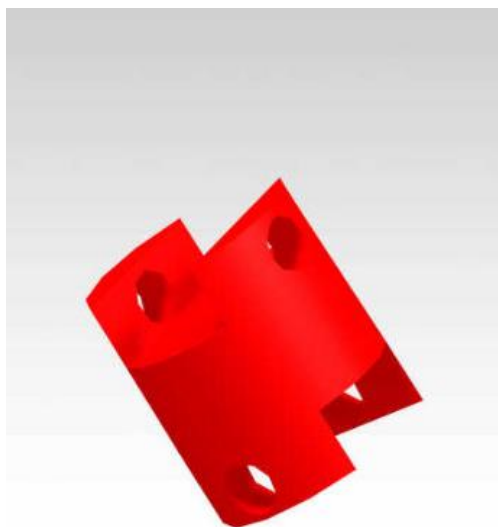


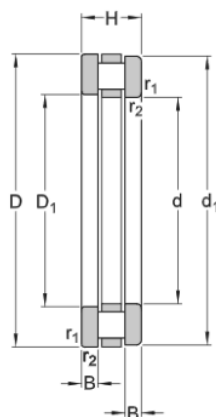
Fig 9 – Cuplaj elastic

Pentru cuplele de pe axa z au fost folosiți rulmenți SKF. Rulmenții sunt de tip axial, pentru a permite transmiterea și suportul forțelor și mișcărilor într-un mod controlat, fără frecare excesivă. Au fost folosiți rulmenți axiali pentru că sarcinile principale sunt cele axiale, care acționează de-a lungul axei de rotație a unui obiect.



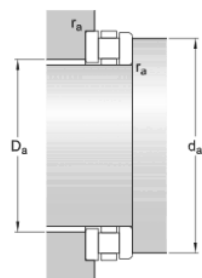
Fig 10 – *Rulment SKF 81110 TN*

Specificații tehnice rulment:



Dimensions

d	50 mm	Bore diameter
D	70 mm	Outside diameter
H	14 mm	Height
d ₁	70 mm	Outside diameter shaft washer
D ₁	52 mm	Bore diameter housing washer
B	4 mm	Height shaft washer
r _{1,2}	min. 0.6 mm	Chamfer dimension housing washer



Abutment dimensions

d _a	min. 68 mm	Abutment diameter shaft
D _a	max. 52 mm	Abutment diameter housing
r _a	max. 0.6 mm	Fillet radius

Componentele necesare pentru realizarea robotului astfel conceput sunt:

Denumire componentă	Nr. Bucăți
Baza robot	1
Cuplaj elastic	8
Piloni susținere	4
Placă susținută de piloni	1
Capac rulment inferior	2
Capac rulment superior	2
Bucșe mari	6
Bucșe mici	6
Axe de susținere a brațelor	3
Brațe fixe	4
Brațe mobile	4
Placă susținere rulment efector final	1
Placă susținere efector final	1
Motor cu mecanism melc-roată melcată	8
Rulment axial SKF 81110 TN	2

Șuruburile necesare pentru ansamblarea întregului sistem:

- M10x100 pentru piloni
- M2.5x3 pentru cuplajele elastice
- M5x8 pentru fixarea plăcilor de pe cupla z și pentru fixarea suportului de rulment
- M5x10 pentru motoarele de pe cupla z
- M5X20 pentru motoarele de pe cupla axei y fara bușe
- M5X30 pentru motoarele de pe cupla axei y cu bușe
- M2.5x5 pentru legaturile capacelor de pe cuplele axelor z
- Suruburi adiționale M20 pentru fixarea robotului
- M2 pentru fixarea efectorului final

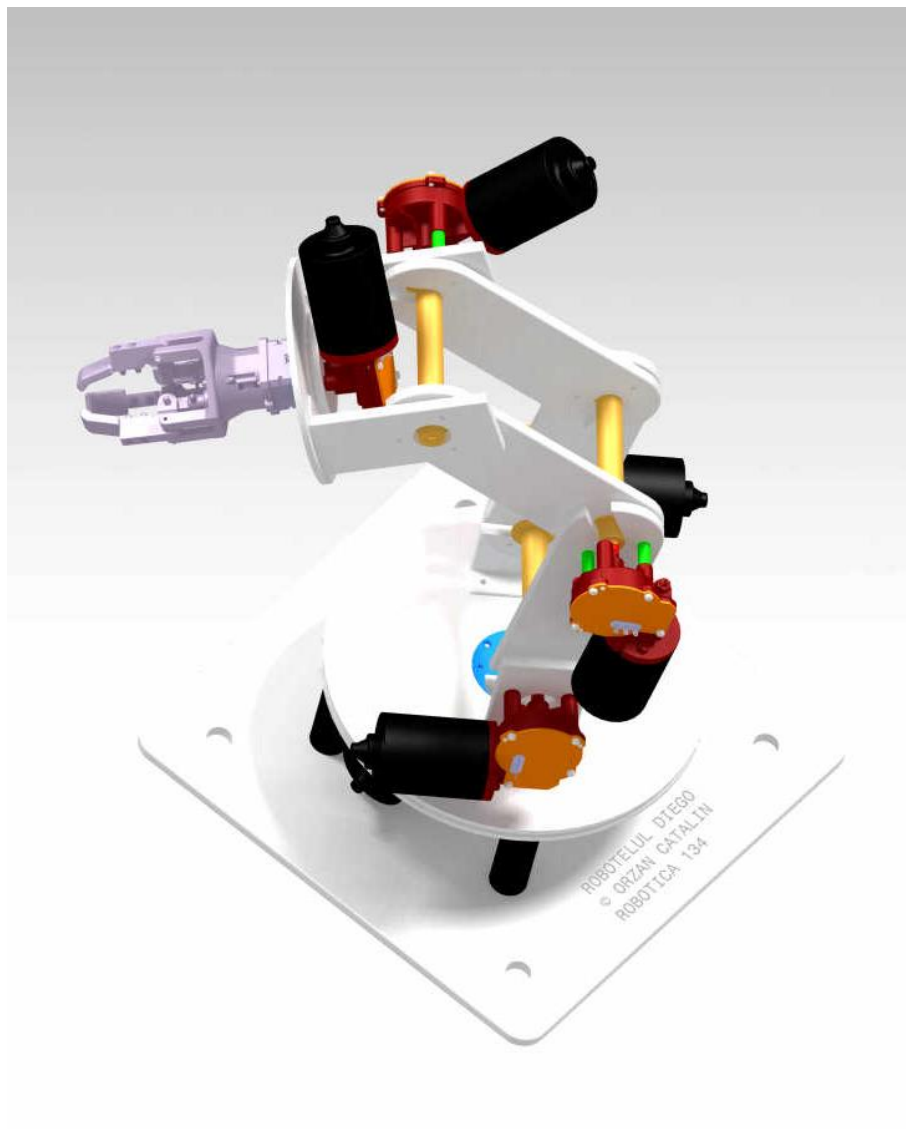


Fig 11 – Robotul realizat

3. Modelarea MATLAB – Simulink

Pentru realizarea modelului cinematic al robotului, au fost utilizate matricile de rotație și translație.

Rotație pe axa x:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos t & -\sin t & 0 \\ 0 & \sin t & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotație pe axa y:

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos t & 0 & \sin t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin t & 0 & \cos t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotație pe axa z:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t & 0 & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Translație pe axa x:

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Translație pe axa y:

$$T_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Translație pe axa z:

$$T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Deoarece succesiunea elementelor robotului este următoarea:

- Rotație în jurul axei Z
- Translație pe axa Z, în sus, cu 200mm
- Rotație în jurul axei Y
- Translație pe axa Z, în sus, cu 200mm
- Rotație în jurul axei Y
- Translație pe axa X, în dreapta, cu 200mm
- Rotație în jurul axei Y
- Rotație în jurul axei X
- Translație pe axa Y, în jos, cu 200mm

Cinematrica directă a unui robot este o relație matematică care descrie mișcarea robotului în spațiu în funcție de mișcarea articulațiilor sau a altor elemente de acționare.

Succesiunea matricilor pentru formarea cinematicii directe va fi următoarea:

$$\begin{aligned} A1 &= [\cos(t1) \ -\sin(t1) \ 0 \ 0; \sin(t1) \ \cos(t1) \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A2 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 200; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A3 &= [\cos(t2) \ 0 \ \sin(t2) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(t2), \ 0, \ \cos(t2), \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A4 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 200; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A5 &= [\cos(t3) \ 0 \ \sin(t3) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(t3) \ 0 \ \cos(t3) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A6 &= [1 \ 0 \ 0 \ 200; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A7 &= [\cos(t4) \ 0 \ \sin(t4) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(t4) \ 0 \ \cos(t4) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A8 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ \cos(t5) \ -\sin(t5) \ 0; 0 \ \sin(t5) \ \cos(t5) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \\ A9 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ -200; 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \end{aligned}$$

Pentru a afla pozițiile finale (coordonatele și unghiurile de rotație) din sistemul astfel creat, vom înmulți matricile, iar apoi vom extrage datele necesare de pe pozițiile corespunzătoare:

```
H=A1*A2*A3*A4*A5*A6*A7*A8*A9;
x=H(1,4);
y=H(2,4);
z=H(3,4);
fx=atan2(H(3,2),H(3,3));
fy=-asin(H(3,1));
fz=atan2(H(2,1),H(1,1));
```

Cinematica inversă a unui robot este procesul de determinare a mișcării articulațiilor sau a altor elemente de acționare necesare pentru a obține o anumită poziție sau orientare a efectorului final al robotului în spațiu. Aceasta este calculată folosindu-ne de matricile deja determinate pentru cinematica directă. Se începe prin a declara matricile de translație și rotație generice, enumerate anterior, înmulțite într-o matrice totală H.

Matricea A9 este cunoscută, fiind ultima mișcare, astfel o putem exclude din calcul prin înmulțirea matricei finale cu inversa ei. Vom avea o noua matrice, Hc.

Din noua matrice se pot extrage coordonatele efectorului, astfel fiind posibil calculul unghiului primei articulații, notat cu t1, prin funcția atan. Funcția atan2 este folosită pentru a extinde aria de calcul a funcției atan, de la [-90, 90] de grade la [-180,180] grade.

În continuare, vom defini primele 2 matrici de rotație și deplasare: rotația în jurul axei Z și prima translație, pe Z, în sus, cu 200mm. Formăm matricea Ha din produsul lor.

Din noua matrice creată se pot extrage coordonatele xa, ya și za. Putem calcula lungimile L0, L1 și L2, având coordonatele efectoului și articulației, cât și unghiurile următoare, utilizate pentru a determina valorile lui t2 și t3.

Definim o nouă matrice, produsul dintre A3, A4, A5 și A6, pentru următoarele articulații. Produsul lor final va fi noua matrice H1, din care se generează matricea H2 prin inversarea ei și multiplicarea cu inversei celei cunoscute, A9. Astfel vom avea ultimele valori de rotație necesare, t4 și t5, din matricea H2.

Notă: deoarece unele unghiuri generate sunt cele complementare unghiurilor avute, se folosesc artificii de calcul pe baza cercului trigonometric, precum $t3 = \alpha - (\pi/2)$.

Calculul cinematicii inverse:

$$T_x = [1 \ 0 \ 0 \ x; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$T_y = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ y; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$T_z = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ z; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$R_x = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ \cos(fx) \ -\sin(fx) \ 0; 0 \ \sin(fx) \ \cos(fx) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$R_y = [\cos(fy) \ 0 \ \sin(fy) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(fy) \ 0 \ \cos(fy) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$R_z = [\cos(fz) \ -\sin(fz) \ 0 \ 0; \sin(fz) \ \cos(fz) \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$H = T_x * T_y * T_z * R_z * R_y * R_x;$$

$$A_9 = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ -200; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$H_c = H * A_9^{(-1)};$$

$$x_c = H_c(1,4);$$

$$y_c = H_c(2,4);$$

$$z_c = H_c(3,4);$$

$$t_1 = \text{atan}(y_c/x_c);$$

$$A_1 = [\cos(t_1) \ -\sin(t_1) \ 0 \ 0; \sin(t_1) \ \cos(t_1) \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$A_2 = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 200; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$H_a = A_1 * A_2;$$

$$x_a = H_a(1,4);$$

$$y_a = H_a(2,4);$$

$$z_a = H_a(3,4);$$

$$L_0 = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + (z_c - z_a)^2};$$

$$L_1 = \sqrt{(x_c)^2 + (y_c)^2};$$

$$L_2 = \sqrt{(L_0)^2 - (L_1)^2};$$

$$\alpha = \arccos((L_0^2 - 200^2 - 200^2)/(2 * 200 * 200));$$

$$t_3 = \alpha - (\pi/2);$$

$$\beta = \text{atan}(L_2/L_1);$$

$$\gamma = \arccos((200^2 - 200^2 - L_0^2)/(2 * 200 * L_0));$$

$$t_2 = -((\beta - \gamma) + \pi/2);$$

$$A_3 = [\cos(t_2) \ 0 \ \sin(t_2) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(t_2) \ 0 \ \cos(t_2) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$A_4 = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 200; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$A_5 = [\cos(t_3) \ 0 \ \sin(t_3) \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; -\sin(t_3) \ 0 \ \cos(t_3) \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$A_6 = [1 \ 0 \ 0 \ 200; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$H_1 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6;$$

$$H_2 = H_1^{(-1)} * H * A_9^{(-1)};$$

$$t_4 = -\text{atan}(H_2(3,1)/H_2(1,1));$$

$$t_5 = -\text{atan}(H_2(2,3)/H_2(2,2));$$

Modelul Simulink:

Acesta a fost realizat utilizând componente din Simscape Multibody First Generation, disponibile în Matlab 2016, astfel:

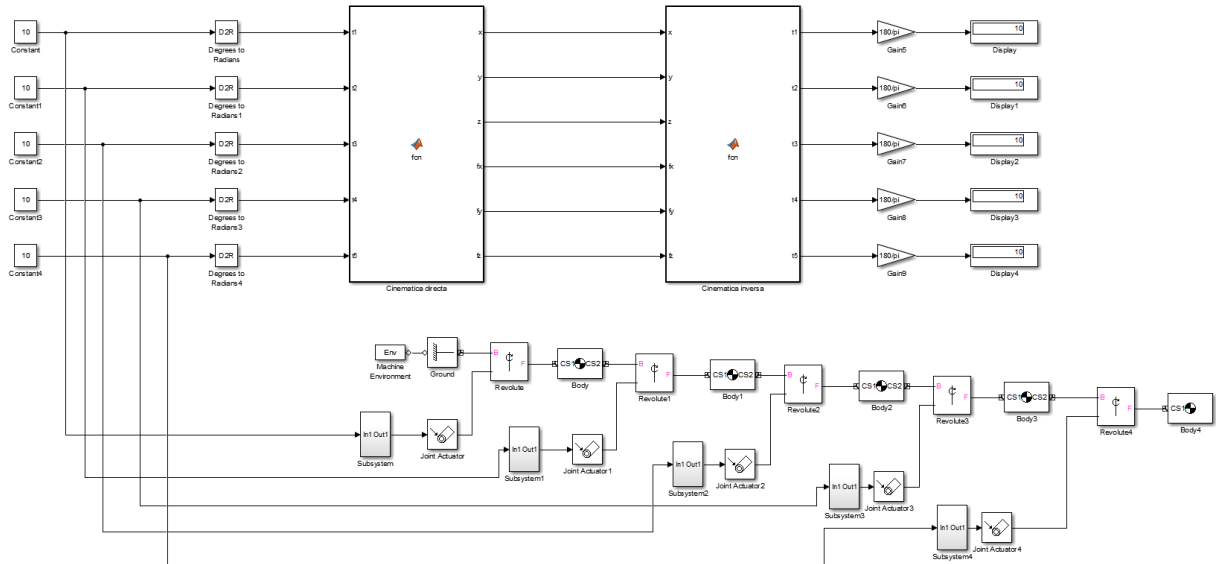


Fig 12 – Modelul Simulink

Notă: deoarece cinematicile directe și inverse lucrează cu radiani, vom avea nevoie de un bloc pentru a converti valoarea introdusă, în grade, în valoarea de procesat: radiani. O altă metodă este calculul $\pi/180$. Pentru ieșire, valoarea obținută fiind tot un calcul în radiani, putem obține rezultatul înapoi în grade fie utilizând un convertor direct, fie un calcul de forma $180/\pi$.

Pentru realizarea modelului u fost folosite cuple de rotație: Revolute și Body pentru elementele motorului. Ground reprezintă baza acestuia. În fiecare element au fost definite valorile inițiale și finale ale deplasărilor, pentru fiecare axă în parte. Fiecare Body are drept prim port și centru de greutate coordonatele Body-ului anterior, iar fiecare CS următor este stabilit adunând valoarea numerică a lungimii pe deplasarea corespunzătoare, într-o matrice de tip 1×3 de forma: $[200 \ 0 \ 0]$. Exemplul de mai sus reprezintă un Body deplasat cu 200mm pe axa X.

Cuplele de rotație au două porturi, legătura cu elementul anterior și acționarea. De asemenea, acestea sunt marcate cu o matrice de tip 1×3 , de forma: $[1 \ 0 \ 0]$ pentru a defini axa pe care acestea acționează. x, y sau z. Exemplul anterior definește o cuplă de rotație pe axa x.

Cuplele sunt acționate de subsisteme, unde inputul este poziția, derivata ei, reprezentată de viteză și derivata vitezei – accelerația, astfel:

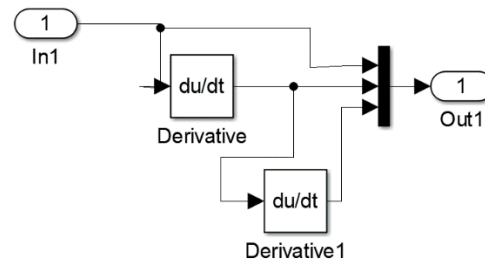


Fig 13 – Acționarea cuplei

4. Concluzii

Proiectarea robotilor reprezintă un proces complex și multidisciplinar care implică integrarea cunoștințelor din domeniul ingineriei mecanice, electronică, software și algoritmi de control. Prin utilizarea tehnologiilor avansate de proiectare 3D CAD și simulare, precum CATIA și Matlab/Simulink, este posibilă realizarea unor modele virtuale detaliate și analize precise ale comportamentului robotilor. Cinematica directă și indirectă sunt instrumente fundamentale pentru înțelegerea și controlul mișcării robotilor în spațiu, iar construcția fizică a acestora implică selecția și asamblarea componentelor în conformitate cu cerințele și specificațiile proiectului. Concluziile acestui tip de proiect relevă importanța abordării integrate și interdisciplinare în proiectarea robotilor, precum și nevoia de a continua cercetarea și dezvoltarea în acest domeniu pentru a obține performanțe și eficiență sporită în aplicațiile viitoare.

5. Bibliografie

<https://www.srggear.com/worm-gearbox/worm-reduction-gearbox/worm-gearbox-inner-structure/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Rotation_matrix

https://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_kinematics

<https://grabcad.com/library/dc-worm-gear-motor>

<https://www.ulbsibiu.ro/en/media-kit-en/>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Robotics>

<https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-thrust-bearings/productid-81110%20TN>

Cursul „Proiectarea roboților” - Ș. L. Dr. Ing. Crenganiș Mihai, Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, Facultatea de Inginerie, 2023

Text generat de ChatGPT, OpenAI, <https://chat.openai.com>. Editat pentru stil și conținut:

Craig, J. J. (2005). Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson Education.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). Robotics: Modelling, Planning and Control. Springer.

Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2005). Robot Modeling and Control. Wiley.

Lynch, K. M., & Park, F. C. (2017). Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Cambridge University Press.

Murray, R. M., Li, Z., & Sastry, S. S. (1994). A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press.

Asada, H., & Slotine, J. J. (1986). Robot Analysis and Control. Wiley.

Husty, M. L. (2016). Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems: The Real-Time Challenge. Springer.