

DESIGN AND MECHANICAL STUDY OF THE LEG ORIENTATION SYSTEM OF A CLIMBING HEXAPOD

TÎRSÎNA Nicoleta

Facultatea: Inginerie Industrială și Robotică, Specializarea: Rezistența materialelor, Anul de studii: II ,
e-mail: tirsinanicoleta@gmail.com

Conducător științific: Prof. dr. ing. Ștefan SOROHAN

REZUMAT: ROMERIN Hexapod climbing robot is currently face a significant problem in the uncertain orientation of the suction cup. The final objective of the project consists of the mechanical updating of the RomerIn hexapod design. The main idea is to change the universal joint in the final part of the leg with a mechanism that allows it to maintain a fixed orientation of the suction cup. To achieve that, by using Autodesk Inventor, a design of a mechanical prosthesis that allows to be integrated in the current robot is required. Therefore, the work of designing, modeling and simulating of the mechanical prosthesis on the robot is carried out on a single "leg" of the robot. The final design solution of the prosthesis it was considered as the combination of two planar mechanisms and the analysis and design was implemented leg by leg, using the classical methods used in the planar mechanisms. Its analysis and design will be simple and effective.

CUVINTE CHEIE: robot, mecanism, design, printare 3D

1. Introducere

Utilizarea roboților de cățărare în inspecția infrastructurii devine din ce în ce mai relevantă. proiectul ROMERIN își propune să construiască un robot de cățărare modular. Numele proiectului provine de la „Robot Modular EscaladoR para la INspección de infraestructuras”, care este un robot de cățărare modular pentru inspecția infrastructurii¹. [1]

În ultimele decenii s-a înregistrat o mare creștere a infrastructurii civile în Europa, ceea ce înseamnă o creștere a nevoii de revizie, înlocuire și dezafectare. În consecință, aceste instalații necesită o cheltuială din ce în ce mai mare pentru inspecția, înlocuirea sau, dacă este necesar, demontarea lor. Analiza efectuată de consorțiul european SPARC [2] subliniază că în următorii ani această sarcină va fi din ce în ce mai importantă și relevantă și prevede că rolul pe care îl vor juca roboții în întreținere, inspecție și dezmembrare va fi esențial. Infrastructura civilă a crescut foarte repede în ultimii 50 de ani, datorită creșterii și prosperității economice. O mare parte a acestei infrastructuri reprezintă o amenințare pentru securitate și mediu în momentul dezmembrării și înlocuirii cu una nouă. Contribuțiile roboților în acest domeniu sunt remarcabile, deoarece acestea funcționează mult mai eficient decât orice om. Roboții pot coopera moduri în care oamenii nu pot suporta condiții extreme și periculoase pe o perioadă mai lungă decât un operator. Utilizarea acestuia reduce riscurile și costurile, sporind progresul în acest domeniu dincolo de abilitățile umane.

Această lucrare este încadrată în cadrul proiectului ROMERIN, care se poate vedea în [Fig.1.a)]. Obiectivul final al proiectului constă în actualizarea mecanică a designului hexapodului RomerIn [Fig.1.b)]. Ideea principală este de a schimba articulația universală din partea finală a piciorului cu un mecanism care îi permite să mențină o orientare fixă a ventuzei, paralelă cu suprafața. Pentru a realiza acest lucru, prin utilizarea software-ului Autodesk Inventor, este necesară o proiectare a unei proteze mecanice care să permită integrarea acesteia în robotul curent. Prin urmare, lucrarea de proiectare, modelare și simulare a protezelor mecanice pe robot se efectuează pe un singur „picior” al robotului.

¹în traducere din limba spaniolă

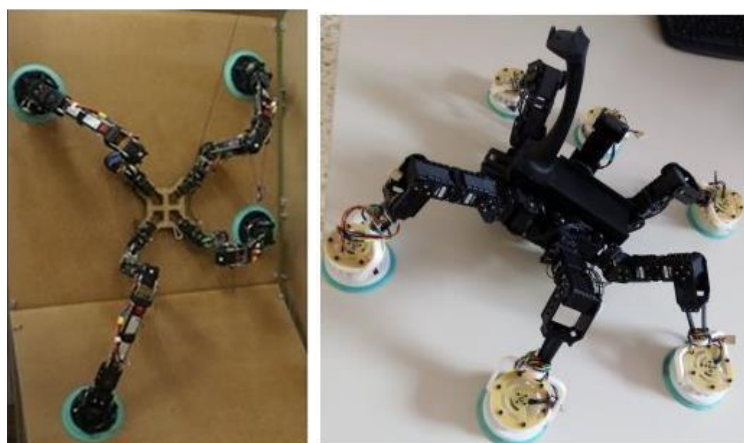


Fig. 1. a) Robotul modular ROMERIN – b) Prototipul hexapod ROMERIN

2. Stadiul actual

Acest capitol descrie o analiză bibliografică a roboților de cățărare și utilizarea unui lanț cinematic de tip paralelogram în alt proiect similar.

Roboții de cățărare sunt dispozitive utile care pot fi adoptate într-o varietate de aplicații, cum ar fi întreținerea, construcția, inspecția și siguranța în industria proceselor și a construcțiilor. Aceste sisteme sunt adoptate în principal în locuri în care accesul direct de către un operator uman este foarte periculos, din cauza unui mediu ostil. [3]

ROBIN (ROBotic INspector, vezi [4]) este un robot de cățărare conceput pentru medii create de om. Este destinat transportării camerelor video și a altor senzori pe structuri artificiale, cum ar fi poduri, clădiri, aeronave și nave pentru inspecție. ROBIN are o structură foarte simplă, fiind compus pur și simplu dintr-un picior articulată cu 4 ventuze la fiecare capăt. În total are 4 grade de libertate și este conceput pentru a putea merge înainte și înapoi, precum și a se roti. Robotul este, de asemenea, capabil să treacă de la o suprafață orizontală la una verticală și invers, atât în interior (podea și perete), cât și în exterior (acoperiș și perete exterior).

MRWALLSPECT III este un robot de cățărare cu patru picioare. În acest robot, trei ventuze sunt atașate simetric pe fiecare gleznă și șase pe partea inferioară a corpului. Astfel, în total robotul este echipat cu optsprezece ventuze, iar aderența este realizată prin intermediul a patru pompe de vid conectate în paralel. [5]

Robotul delta este un robot paralel, este format din mai multe lanțuri cinematice care leagă baza de efectorul final. Robotul poate fi de asemenea văzut ca o generalizare spațială a unei legături cu patru bare. Conceptul cheie al robotului delta este utilizarea elementelor de tip paralelogram care restricționează mișcarea platformei în direcția X, Y sau Z fără rotație. [6]

3. ROMERIN Robotul Hexapod de cățărare

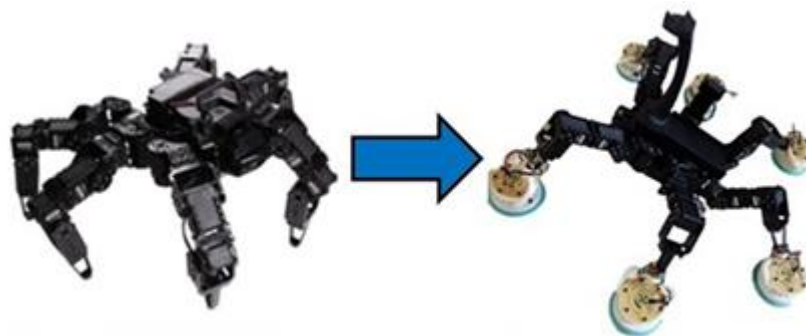


Fig. 2. Modificările mecatronice aduse Bolidului Crawler

În paralel cu designul robotului modular, a fost achiziționat un robot hexapod, Bolide Crawler de la XYZrobot. La Construcția sa au fost aduse modificări mecatronice, vezi [Fig. 2.], pentru a-i permite să adere la suprafețe verticale și tavane. Pe acest robot sunt testate sisteme de control, percepție și aderență, prin urmare este o lucrare complementară realizată cu robotul modular. Scopul acestui robot este de a avea un prototip pe care să testeze algoritmi de control, percepție și adeziune; acesta va fi principala platformă de testare până la fabricarea finală a robotului modular.

4. Modelul cinematic

Modelul cinematică al oricărei structuri robotizate oferă informații vitale care definesc structura atât din punct de vedere dimensional cât și a comportării acesteia în spațiul de lucru singurul aspect neglijat fiind masele componentelor, care sunt studiate în modelul dinamic. Există două probleme fundamentale de rezolvat în cinematica robotului:

- cinematica directă – consideră cunoscuți parametrii (geometrici, vitezele și accelerațiile) cuplelor motoare, urmând ca prin aplicarea unor algoritmi de calcul să se determine parametrii caracteristici efectorului final (poziții, viteze, accelerații);
- cinematica inversă – consideră cunoscuți parametrii efectorului final urmând ca pe baza acestora să se determine valorile/variațiile corespunzătoare în cuplele motoare ale robotului.

• Formula de mobilitate

Gradele de libertate sau mobilitate ale unui lanț cinematic reprezintă numărul de parametri care definesc configurația lanțului.

În [Fig. 3.] este reprezentată schema cinematică a mecanismului în care există un total de 4 elemente și 4 cuple cinematice.

Formula de mobilitate a unei legături plane este:

$$M = 3(N - 1) - c_4 - 2c_5 = DOF \quad (1)$$

În cazul nostru:

$$M = 3(4 - 1) - 0 - 2 \cdot 4 = 1 \quad (2)$$

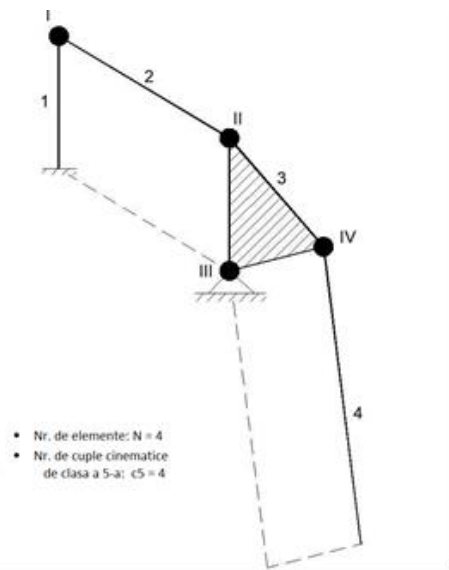


Fig. 3. Schema cinematica a mecanismului

Am făcut analiza mobilității Așadar, înlocuind cantitatea de elemente și articulații în ecuație, am stabilit că mecanismul are un grad de libertate.

• Modelul cinematic direct

Problema de cinematică directă se reduce la găsirea unei matrici de transformare omogene T care leagă poziția și orientarea efectorului final de sistemul de referință fix situat la baza acestuia. Această matrice T va fi o funcție a coordonatelor articulațiilor.

Matricea de transformare omogenă care reprezintă poziția și orientarea relativă dintre sistemele asociate cu două legături consecutive ale robotului se numește de obicei matrice ${}^{i-1}A_i$. Când robotul are n grade de libertate, poziția rezultată 0A_n dintre mișcările fiecărei legături se obține ca produs ${}^0A_n = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$.

Pentru a obține modelul cinematic direct este folosit algoritmul Denavit-Hartenberg [7]. Fiecare transformare omogenă A_i este reprezentată ca produsul a patru transformări de bază:

$$A_i = R_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} R_{x,\alpha_i} \quad (3)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

unde θ_i , a_i , d_i , α_i sunt parametri asociați cu elementul i și articulația i. În cazul mecanismului nostru, Tabelul 1. descrie parametrii algoritmului Denavit-Hartenberg în fiecare dintre articulații. În acest

tabel, am notat cu unghiul de rotație al articulației i față de axa z , toate rotațiile se fac în raport cu axa z și cu ai distanța dintre centrele de referință ale elementelor i și j , deoarece toate axele z sunt paralele între ele, unghiul va fi 0.

Prin obținerea acestor parametri, calculul relațiilor dintre articulațiile consecutive ale robotului este imediat, deoarece acestea sunt date de matricile ${}^{i-1}A_i$.

Tabelul 1.

Link	θ	d_{iz}	a_{ix}	α_i
1	θ_1	0	d_1	0
2	θ_2	0	d_2	0
3	θ_3	0	d_3	0
4	θ_4	0	d_4	0
5	0	0	d_5	0

Matricea de transformare va fi:

$$T_5 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(1,1) & T(1,2) & T(1,3) & T(1,4) \\ T(2,1) & T(2,2) & T(2,3) & T(2,4) \\ T(3,1) & T(3,2) & T(3,3) & T(3,4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Elementele de interes din această secțiune sunt $T(1,4)$, $T(2,4)$ și $T(3,4)$, care pot fi echivalate cu p_x , p_y și p_z , coordonatele poziției efectorului final în funcție de coordonate articulațiilor. Prin urmare:

$$x = T(1,4) = a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 + a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (6)$$

$$y = T(2,4) = a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin \theta_1 + a_5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (7)$$

$$z = T(3,4) = 0 \quad (8)$$

• Modelul cinematic invers

Problema cinematică inversă constă în găsirea valorilor coordonatelor articulației robotului $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ astfel încât efectorul final să fie poziționat și orientat în funcție de o anumită poziție spațială.

$$q_1 = \beta - \alpha \quad (9)$$

$$q_2 = \arctan\left(\frac{m}{A}\right) \quad (10)$$

$$q_3 = \arctan\left(\frac{n}{B}\right) \quad (11)$$

$$q_5 = 0 \quad (12)$$

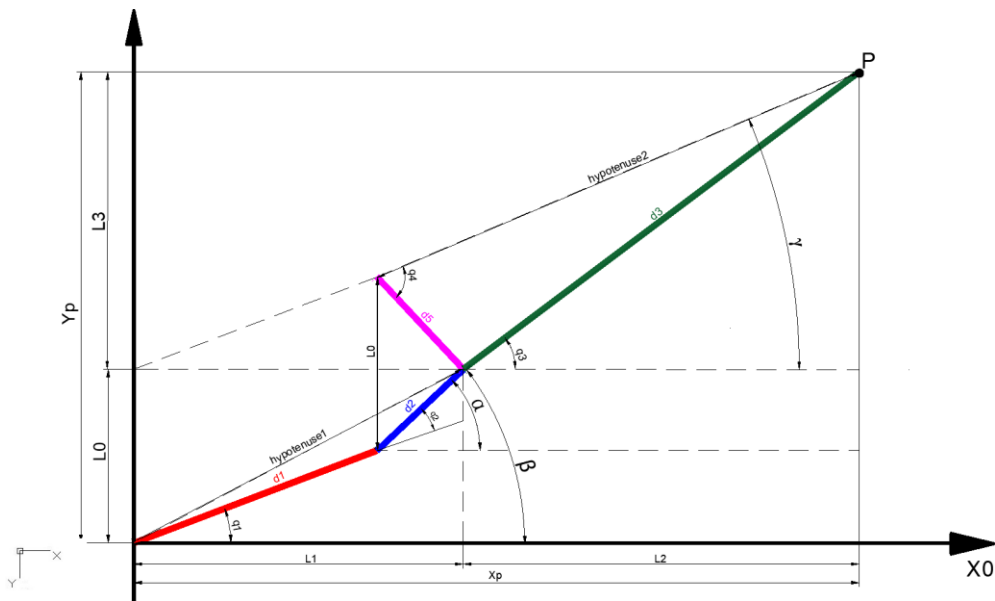


Fig. 1.. Abordare geometrică a soluției

Procedura pentru obținerea ecuațiilor depinde de configurația robotului. Rezolvarea problemei cinematice inverse a fost obținută prin metode geometrice, vezi [Fig. 4.].

5. Etape de dezvoltare ale proiectului

- **Proiectarea piciorului robotului în Autodesk Inventor:** Ca un prim pas, pentru simularea mișcării protezei mecanice și fixarea acesteia pe piciorul robotului este necesar să fie proiectat un de un model de picior al robotului în Autodesk Inventor [Fig. 5.a)].

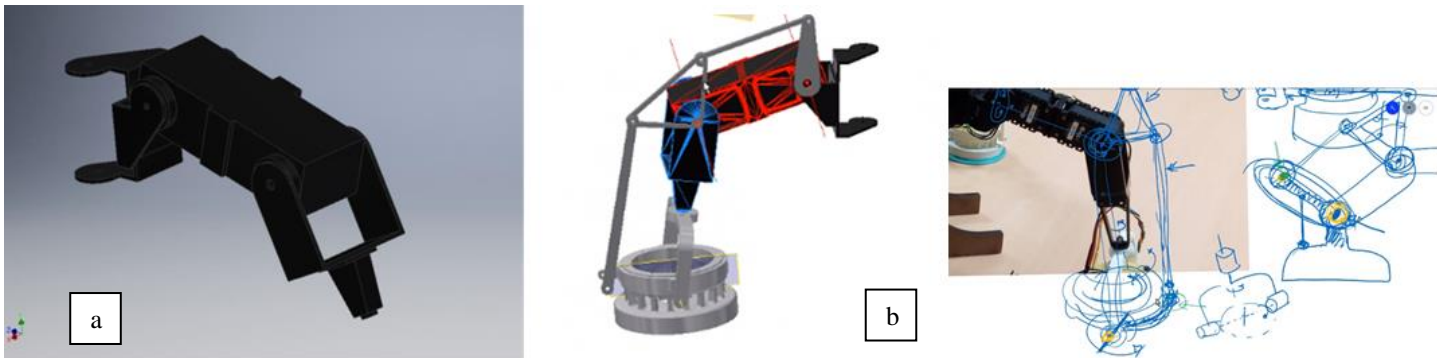


Fig. 2. a) Piciorul robotului în Autodesk Inventor b) Proiectarea conceptuală a mecanismului

- **Proiectarea conceptuală a mecanismului adaptat pe forma piciorului,** [Fig. 5. b)]. Deoarece performanța unui robot depinde de mai mulți factori, este dificil să spunem că un anumit design este singura soluție la o anumită problemă, chiar și pentru un mecanism cu un singur grad de libertate și patru articulații. [8]
- **Măsurarea tuturor dimensiunilor pe piciorul real al robotului în laborator și ajustarea primului design:** În [Fig. 6.] se poate vedea primul design asamblat pe piciorul robotului



Fig.6. Primul design asamblat pe piciorul robotului

- **Proiectarea finală a mecanismului și utilizarea unei imprimante 3D pentru a aduce reprezentarea CAD în formă fizică.** În [Fig. 7.a) și b).] se pot observa 2 componente în versiunea lor finală CAD care mai apoi au fost printate utilizând imprimanta Ultimaker 3, vezi [Fig. 7.c)].

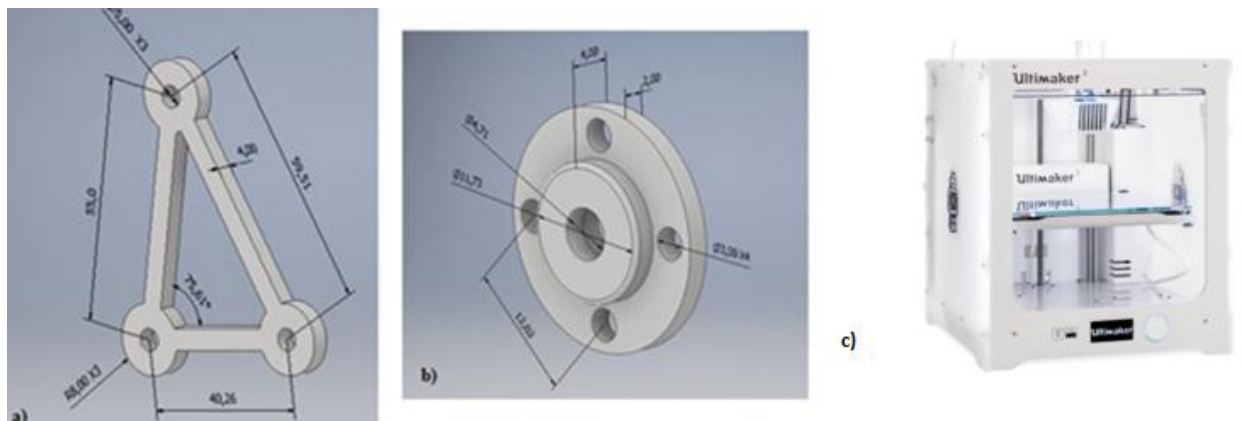


Fig. 7. a) și b) – Detalii din designul final a componentelor mecanismului c) Imprimanta Ultimaker 3

- **Asamblarea finală a protezei pe robot:** Ceea ce este cel mai important este că, în orice moment, proteza poate fi considerată o combinație a două mecanisme plane. Mecanismul cu patru bare a fost utilizat în proiect ca soluție de proiectare. Caracteristica cheie este utilizarea paralelogramelor în elemente, care mențin orientarea efectorului final. Mecanismul are două configurații cu patru bare. Se presupune ca elementul 0, elementul L0 din [Fig. 8], este elementul fix (suportul mecanismului) în această analiză. Elementul 0, elementul 1 și elementul 3 formează primul mecanism cu patru bare cu o legătură imaginară între articulația elementului 0 și articulația elementului 3. Elementul 3 este un element ternar și este conectat direct la motor care acționează ca un conducător ce va induce miscarea celorlalte elemente. Elementele 3 și 4 formează al doilea mecanism cu patru bare. Datorită legăturii paralele a mecanismului, inelul ventuzei poate continua să fie orientat pe direcție orizontală.

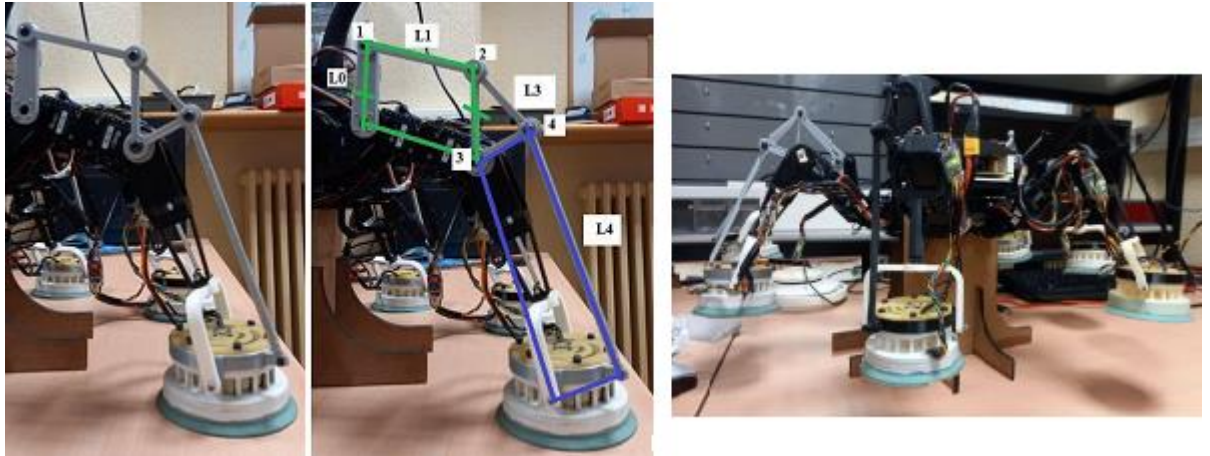


Fig. 8. Asamblarea designului final al protezei

6. Concluzii

Analiza și proiectarea au fost implementate picior cu picior, folosind metodele clasice utilizate în mecanismele plane. Analiza și proiectarea sa sunt simple și eficiente. În acest sens, consider că propunerea unui astfel de tip de proteză este o soluție bună. Ca o consecință, spațiul de lucru al robotului poate fi limitat datorită noului tip de proteză atașate pe picioare. Prin urmare, robot va fi utilizat numai în câmpul în care este necesar un spațiu de lucru relativ mic.

Proiectarea finală este o creație proprie adaptată pe modelul robotului. Procesul de proiectare a mecanismului a fost realizat static. Prin urmare, efectele vibrațiilor și rotațiilor turbinei nu au fost luate în considerare. Datorită vibrațiilor, șuruburile care țin mecanismul ar putea începe să se deșurubeze singure, reducând stabilitatea ventuzei. Acesta este unul dintre cele mai critice puncte și care limitează cel mai mult mișcarea robotului.

Prin urmare, această lucrare va fi urmată de un studiu de optimizare a turbinei a cărei vibrații afectează și influențează scopul final al robotului: cățărarea.

7. Bibliografie

1. <https://blogs.upm.es/romerin/prototypes/hexapodal-robot/> [Online] [Data accesării : 11/01/2021]
2. <https://eu-robotics.net/sparc/> [Online] [Data accesării : 28/01/2021]
3. M. F. Silva, J. A. T. Machado and J. K., “A Survey of Technologies for Climbing Robots,” December 2008.
4. M. Minor, H. Dulimarta, G. Danghi and R. Mukherjee. Design, implementation, and evaluation of an under-actuated miniature biped climbing robot. February 2000.
5. T. Kang, H. Kim and T. S. a. H. Choi, “Design of Quadruped Walking and Climbing Robot,” 2003.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_robot, [Online]. [Accesat 25 01 2021].
7. J. Grieco, M. Prieto and M. A. a. P. G. d. Santos, A six-legged climbing, Vols. 1, September, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference, 1998, p. 446–450.
8. Optimal design of a new spatial 3-DOF parallel robot with respect to a frame-free index,” Science in China Series E Technological Sciences, no. 4, p. 986, April 2009. C. Wu and J. W. a. X. Liu.

8. Notații

ROMERIN = ROBot Modular EscaladoR para la INSpección de infraestructuras
 SPARC = Scholarly Publishing and Academic Resources Coalition
 DOF = Deegres of freedom