

**Conferința Națională Multidisciplinară  
„PROFESORUL ION D.  
LĂZĂRESCU FONDATORUL ȘCOLII  
ROMÂNEȘTI  
DE TEORIA AȘCHIERII”  
Ediția a VIII-a  
Cugir, 13 decembrie 2024**

## **SISTEM MECATRONIC PENTRU POZIȚIONARE PRECISĂ CU MECANISME COMPLIANTE**

**Tudor MOLDOVAN,  
Simona NOVEANU, Dan Cristian NOVEANU**

### **MECHATRONIC SYSTEM FOR PRECISE POSITIONING WITH COMPLIANT MECHANISMS**

**Abstract:** In this paper, a mechatronic positioning system has been designed, consisting of two distinct modules: one for coarse positioning, driven by servomotors, and another for precise positioning with flexible hinges, actuated by piezoelectric actuators. The paper is structured into three chapters that cover the design, simulation and the interpretation of the results obtained using finite element analysis.

**Keywords:** precise positioning, mechatronic system, compliant mechanisms, finite element analysis

**Cuvinte cheie:** poziționare de precizie, sistem mecatronic, mecanisme compliante, analiză cu element finit.

## 1. Introducere

Într-un context industrial, sistemele de poziționare joacă un rol vital în procedeele de fabricație automatizate, unde precizia milimetrică și sub-milimetrică fac diferența dintre un produs de succes și rebut. Fie că este vorba despre procedeele de asamblare a micro-componentelor electronice, fie în contextul realizării unor operațiuni delicate din domeniul auto, nevoia de a controla mișcările date de aceste sisteme de poziționare cu precizie sporită este incontestabilă [3].

Motivația pentru cercetare și dezvoltare în acest domeniu este argumentată de necesitatea continuă de a utiliza facilitățile impuse de actualele tehnologii, respectiv de a utiliza mecanismele compliante.

Astfel, explorarea și îmbunătățirea sistemelor de poziționare acoperă o plajă largă de interese, cu aplicații în diferite domenii diferite și un impact semnificativ asupra multor aspecte ale vieții. Această lucrare își propune să adreseze diferitele provocări și oportunități oferite în acest context, oferind o analiză detaliată a stadiului actual al sistemelor de poziționare și propune soluții pentru viitor.

### 1.1 *Introducere privind mecanismele precise realizate cu cuple flexibile*

Mecanismele cu cuple flexibile reprezintă o clasă inovatoare de mecanisme care utilizează deformația elastică a materialului pentru a realiza mișcarea și transferul de forță. Figura 1. ilustrează o cuplă clasică (Fig. 1a) și o cuplă flexibilă (Fig. 1b).

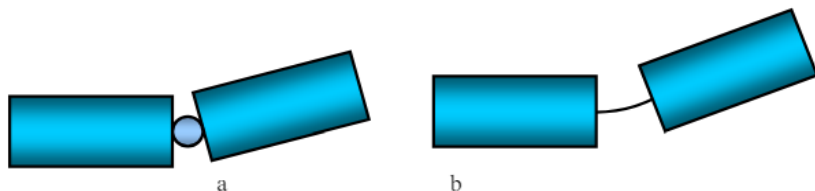


Fig. 1 Cuplă clasică (a) și cuplă flexibilă (b) [3]

Dacă cupla cinematică clasică este definită ca fiind contactul dintre două elemente cinematice, cupla flexibilă reprezintă zona de legătură dintre două elemente cinematice (rigide) adiacente care asigură rotația relativă dintre acele două elemente rigide prin deformație elastică [3], care respecta legea lui Hooke.

## 2. Proiectarea sistemului de poziționare

În urma studiului bibliografic, referitor la diferitele sisteme de poziționare precisă [1-6], se proiectează un sistem modular (Fig. 2) compus dintr-un mecanism de poziționare cu cuple cinematice clasice sub forma unui robot paralel 3RRR și o familie de mecanisme de poziționare precisă cu cuple cinematice flexibile, cu diferiți parametri constructivi oferind o particularizare în funcție de aplicațiile care necesită o forță mare sau un spațiu de lucru mai mare [5].

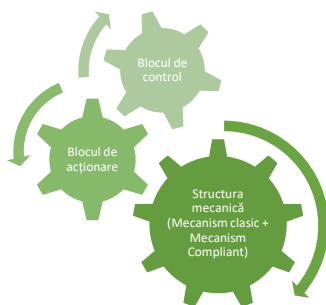


Fig. 2 Structura generală a sistemului de poziționare

În figura 3 se prezintă modelul 3D al ansamblului complet, care este alcătuit dintr-un mecanism de poziționare grosieră cu cuple cinematice clasice și un mecanism de poziționare precisă cu cuple cinematice flexibile.

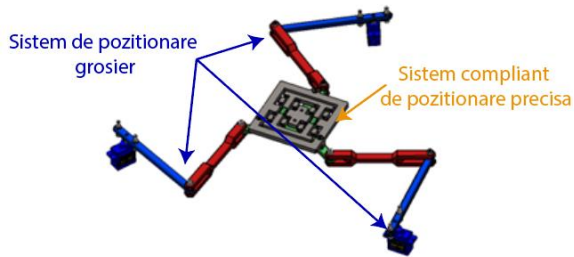


Fig. 3 Modelul 3D al ansamblului

### 2.1. Proiectarea și analiza structurii mecanice a modului cu cuple cinematice clasice

Sistemul de poziționare cu cuple clasice este compus dintr-o bază fixă, o platformă mobilă și trei lanțuri cinematice identice precum se prezintă în Fig. 4, [1]. Fiecare lanț cinematic are în compoziția sa o cuplă activă  $O_i$ , o cuplă pasivă  $A_i$ , un element de legătură activ  $L_{i1}$ , care conectează cupla activă  $O_i$  de cupla pasivă  $A_i$  și un element de legătură pasiv  $L_{i2}$ , care conectează cupla pasivă  $A_i$  de platforma mobilă, reprezentată de triunghiul  $B_1B_2B_3$ , unde  $i = 1, 2, 3$  pentru fiecare braț distinct. Centrul platformei mobile are coordonatele  $(x, y, \varphi)$ . Toate unghiurile au ca referință axa  $OX$ , iar direcția lor este trigonometrică.

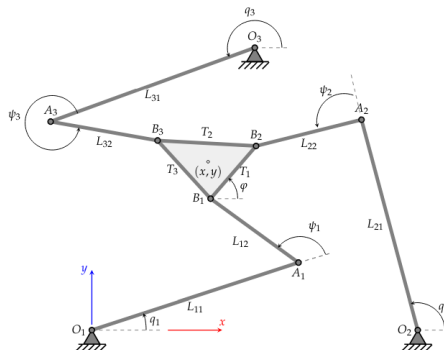


Fig. 4 Schema structurală pentru robotul paralel 3-RRR [1]

Conform lucrării [1], rezolvarea problemei poziționale inverse obține valorile unghiurilor actuatorilor  $q$  din poziția și orientarea platformei mobile.

Fiecare lanț cinematic poate fi definit de către un sistem nelinier de ecuații cu două variabile  $q_i$  și  $\psi_i$ :

$$\Delta x_i = L_{i1} \cos(q_i) + L_{i2} \cos(q_i + \psi_i) \quad (1)$$

$$\Delta y_i = L_{i1} \sin(q_i) + L_{i2} \sin(q_i + \psi_i) \quad (2)$$

Soluția pentru unghiurile actuatorilor  $q_i$  este dată de relația 3:

$$q_i = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-e_{i1} \pm \sqrt{e_{i1}^2 + e_{i2}^2 - e_{i3}^2}}{e_{i3} - e_{i2}} \right) \quad (3)$$

Unde,

$$e_{i1} = -2\Delta y_i L_{i1}$$

$$e_{i2} = -2\Delta x_i L_{i1}$$

$$e_{i3} = \Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + L_{i1}^2 - L_{i2}^2$$

## 2.2. Proiectarea structurii mecanice a modului cu cuple cinematice flexibile

Structura sistemului de poziționare precisă cu cuple cinematice flexibile este alcătuită dintr-o masă mobilă, două plăci laterale și două mecanisme compliante de amplificarea mișcării [5]. Cele două mecanisme compliante de amplificarea mișcării, care sunt situate de-o parte și de alta a mesei mobile amplifică mișcarea produsă de cei doi actuatori piezoelectrice.[2]

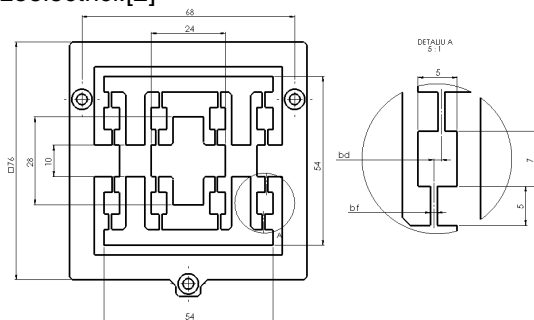


Fig. 5 Parametri generali ai familiei de mecanisme

În figura 5 se prezintă parametri generali pe care se bazează familia de mecanisme de poziționare precisă cu cuple flexibile [5]. Parametrii care vor varia sunt grosimea minimă a cuplei flexibile  $b_f$  și excentricitatea cuplelor  $b_d$ .

Cuplele flexibile sunt cu diferite forme geometrice pentru a se realiza o analiză comparativă a rezultatelor obținute în urma analizei cu element finit [6]. Se vor analiza trei tipuri de cuple: cupla dreptunghică, cupla dreptunghică cu racord respectiv cupla eliptică [5]. Lungimea cuplei este de 5 mm, înălțimea cuplei este echivalentă cu înălțimea întregii structuri și este egală cu 5 mm, raza de racordare pentru cupla dreptunghică cu racord este egală cu 1 mm, iar grosimea minimă a cuplei este notată cu  $b_{f_i}$ , unde:  $i = 1,2$ ;  $b_{f_1} = 0,8$  mm;  $b_{f_2} = 0,4$  mm. Excentricitatea axelor de simetrie a cuplelor este notată cu  $b_{d_j}$ , unde:  $j = 1,2,3$ ;  $b_{d1} = 0,8$  mm;  $b_{d2} = 1$  mm;  $b_{d3} = 1,2$  mm.

### 3. Rezultatele analizei cu element finit

În figura 6 este prezentat modelul 3D discretizat al primului modul analizat care folosește tipul de cuplă dreptunghică cu grosimea  $b_{f1} = 0,8$  mm și excentricitatea dintre cuple  $b_{d1} = 0,8$  mm.

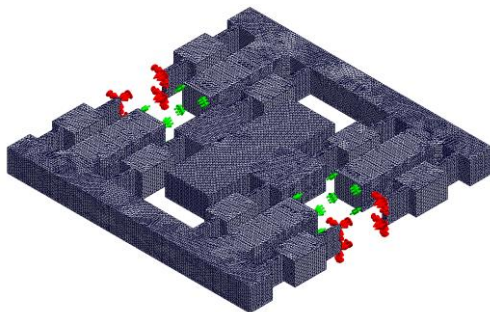


Fig. 6 Discretizarea modulului cu cuple dreptunghice  $b_{f1}$   $b_{d1}$

Condițiile la limită impuse modulului se observă în fig. 6, fiind încastrat în extremitățile laterale. Corpurilor rigide le este impusă o deplasare totală de  $9,5 \mu\text{m}$ ,  $4,75 \mu\text{m}$  pentru fiecare corp, în zona în care urmează să fie instalați actuatorii.

În figura 7 sunt prezentate tensiunile echivalente ale modulului în urma analizei cu element finit, unde se poate observa ca,

concentratorii de tensiune sunt în zonele în care cupla flexibilă este atașată de elementele rigide. Tensiunea maximă este de 0,6932 MPa.

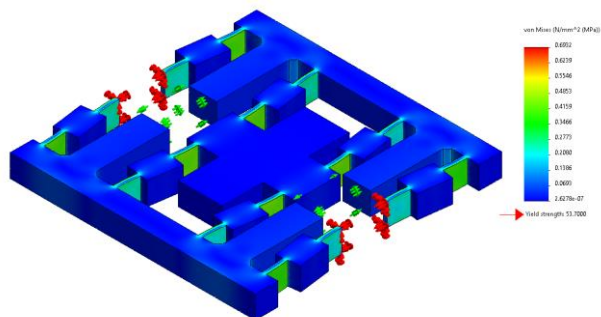


Fig. 7 Tensiunile echivalente ale modului cu cuple dreptunghice

Deplasarea maximă a platformei mobile ce rezultă în urma analizei cu element finit, atunci când este impusă o mișcare inițială de 9,5  $\mu\text{m}$ , este egală cu 66,28  $\mu\text{m}$ , conform figurii 8.

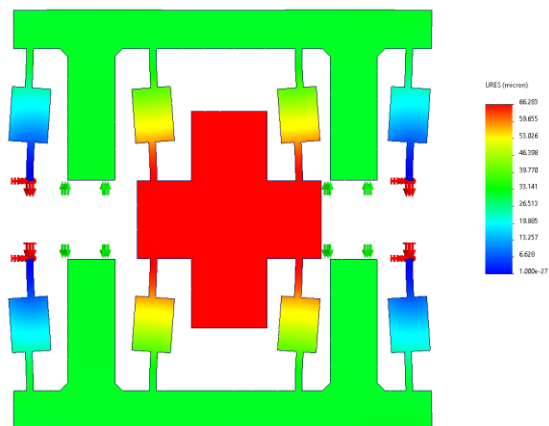


Fig. 8 Deplasările maxime ale modului cu cuple dreptunghice

În figura 9 sunt prezentate tensiunile echivalente și deplasările maxime obținute în urma analizei cu element finit pentru primul set, respectiv modulul cu cuple flexibile de grosime 0,4 mm.

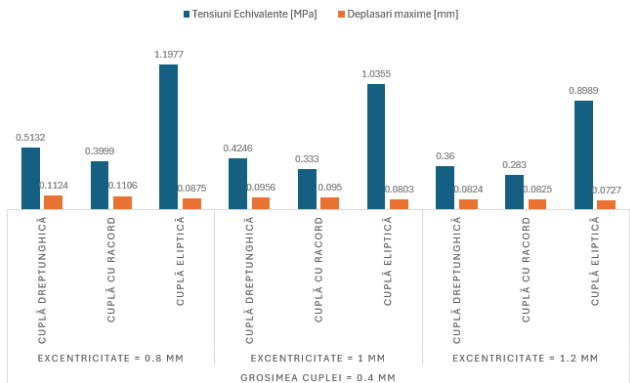


Fig. 9 Rezultatele obținute în urma analizei cu element finit pentru primul set

Analizând rezultatele se poate observa că valoarea cea mai mare a tensiunii echivalente o are varianta cu cuple flexibile eliptice și excentricitate de 1 mm, iar cel mai bun raport deplasare/tensiune echivalentă este obținut la profilul dreptunghic cu racordare.

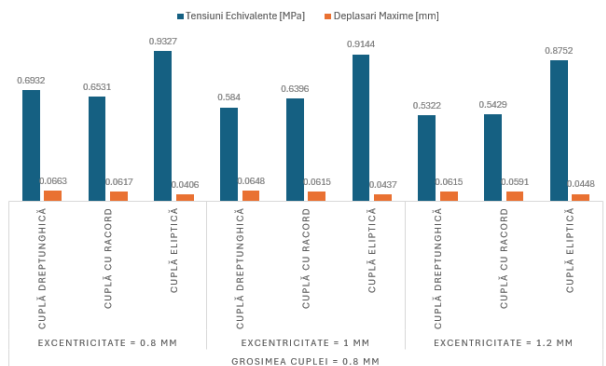


Fig. 10 Rezultatele obținute în urma analizei cu element finit pentru al doilea set

În figura 10 sunt prezentate tensiunile echivalente și deplasările maxime obținute în urma analizei cu element finit pentru al doilea set, respectiv modulul cu cuple flexibile de grosime 0,8mm. Comparând rezultatele se poate observa că valoarea cea mai mare a deplasării o are varianta cu cuple flexibile de profil dreptunghic și excentricitate de 0,8 mm, iar cel mai bun raport deplasare/tensiune echivalentă este obținut la profilul dreptunghic cu racordare și excentricitate 1.



Comparând valorile obținute, în urma analizei cu element finit, pentru cele două seturi de modele constructive, se poate observa că deplasarea cea mai mare este obținută la modelul cu profil dreptunghic de grosime 0,4 mm și excentricitate 0,8 mm.

#### 4. Concluzii

Odată cu dezvoltarea tehnologiilor neconvenționale de fabricație, mecanismele compliante s-au dezvoltat ca o necesitate pentru rezolvarea problemelor de precizie și de minimizare a sistemelor.

În această lucrare, pentru a putea obține o plajă mai mare de aplicabilitate a sistemului proiectat, s-au considerat 18 variante constructive cu diferiți parametrii geometrici variabili pentru modulul de poziționare precisă în vederea optimizării acestora din punct de vedere al deplasărilor și tensiunilor obținute.

În urma analizei prin metoda cu element finit a modulului de poziționare precisă cu cuple flexibile, în diferite configurații geometrice, s-a realizat o bază de date a rezultatelor obținute. S-a obținut deplasarea maximă de 112,4  $\mu\text{m}$  de către modulul de poziționare în configurația cuplei dreptunghice cu grosimea de 0,4 mm și excentricitate de 0,8 mm, iar tensiunea minimă de 0,28 MPa a fost obținută de modulul de poziționare în configurația cuplei dreptunghice cu racord cu grosimea de 0,4 mm și excentricitate de 1,2 mm.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] Jorge Francisco García-Samartín and Antonio Barrientos, "Kinematic Modelling of a 3RRR Planar Parallel Robot Using Genetic Algorithms and Neural Networks," 2023.
- [2] Kee-Bong Choi, Jae Jong Lee, and Seiichi Hata, "A piezo-driven compliant stage with double mechanical amplification mechanisms arranged in parallel," May 2010.
- [3] Lobontiu, Nicolae, „Compliant Mechanisms. Design of Flexure Hinges, CRC Press, New York, 2021.
- [4] Lobontiu, Nicolae, Matt Cullin, Todd Petersen, Javier Adolfo Alcazar and Simona Noveanu. "Planar Compliances of Symmetric Notch Flexure Hinges: The Right Circularly Corner-Filletted Parabolic Design." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 11: 169-176, 2014.
- [5] Moldovan Tudor Alexandru, „Studiul și realizarea unui sistem mecatronic de poziționare precisă”, Lucrare de licența, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Iulie 2024.

- [6] Noveanu, Simona, Dan Cristian Noveanu and Ioan Alexandru Ivan. "Compliant Gripper for Biological Cells Manipulation." 2024 IEEE International Conference and Exposition On Electric and Power Engineering, October 2024.

Această lucrare este susținută de către Laboratorul de cercetare al Universității Tehnice din Cluj-Napoca, „Precision Systems and Compliant Mechanisms Laboratory- ProSyMc”.

Masterand Ing. Tudor MOLDOVAN,  
Director ProSyMc Conf.Dr.Ing. Simona NOVEANU, membru AGIR  
Departamentul de Mecatronică și Dinamica Mașinilor,  
Facultatea de Autovehicule Rutiere, Mecatronică și Mecanică,  
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca  
e-mail: Moldovan.Io.Tudor@student.utcluj.ro,  
e-mail: simona.noveanu@mdm.utcluj.ro

Șef lucr.Dr.Ing. Dan Cristian NOVEANU, membru AGIR  
Departamentul de Știința și Ingineria Materialelor,  
Facultatea de Ingineria Materialelor și a Mediului,  
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca  
e-mail: dan.noveanu@ipm.utcluj.ro