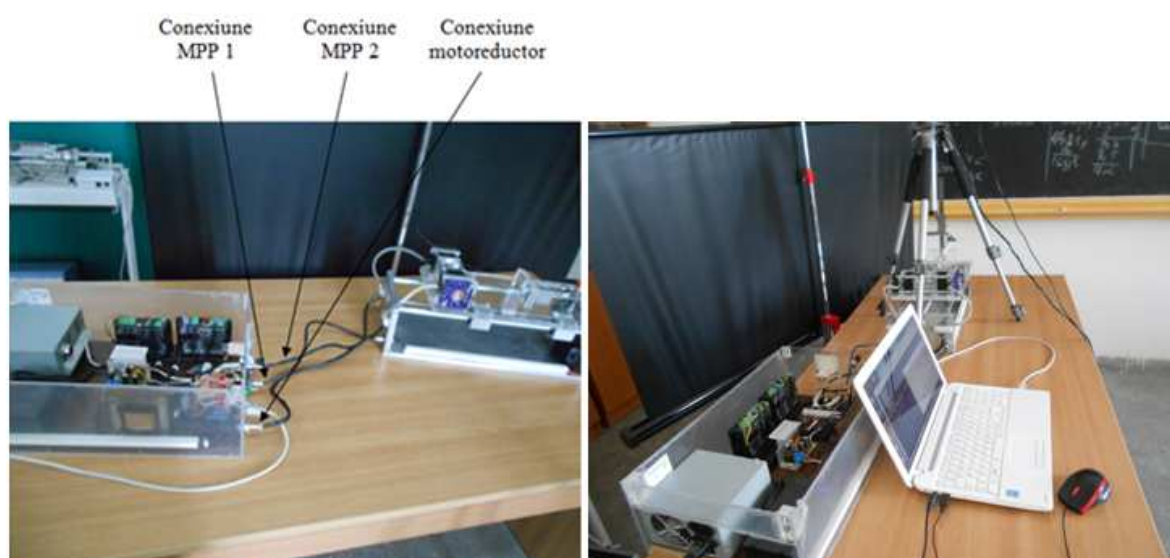


**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA  
FACULTATEA DE MECANICĂ**

# **REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

**DOCTORAND:  
ING. LEONARD MARIUS CIUREZU**



## **SISTEM MECANIC FLEXIBIL CU APLICAȚII ÎN MEDICINĂ**

**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC  
PROF. UNIV. DR. ING. NICOLAE DUMITRU**

**CRAIOVA, 2018**

## **REZUMAT**

Prezenta lucrare are ca obiect de studiu dezvoltarea unui sistem mecatronic ale cărui aplicații sunt destinate în principal medicinei, cu aplicații în explorări minim invazive, în chirurgia minim invazivă sau chirurgia cu o singură cale de acces.

Deși sistemul dezvoltat a fost gândit în mod special pentru medicină, aplicațiile acestuia nu se limitează doar la acest domeniu. Calitățile pe care le prezintă sistemul robotic îl recomandă ca pe o soluție viabilă ce poate fi utilizată în alte domenii, cum ar fi: controlul țevilor, inspecția unor spații foarte greu accesibile, sau în industria aviatică la inspecția palelor motoarelor cu ardere internă ale avioanelor, etc.

**În capitolul 1**, se prezintă stadiul actual privind structura, cinematica și dinamica unor sisteme mecanice flexibile cu aplicații în medicină. Este prezentată o clasificare a sistemelor robotice folosite în chirurgia minim invazivă ca roboți pasivi, activi, sisteme sinergice și sisteme teleoperaționale. Este prezentat ca fiind de un real succes în domeniul roboticii medicale sistemul Da Vinci, ce folosește brațe robotice convenționale cu design personalizat.

Sunt prezentate tipurile standard de intervenții minim invazive. Sunt analizate mai multe variante constructive de sisteme robotice pentru intervenții minim invazive, care pot fi cu elemente rigide sau cu elemente deformabile.

Sunt analizate mai multe lucrări de roboți hiperredunțați care prezintă calități unice, caracterizați printr-o manipulare fină și discretă. Mișcarea unităților flexibile a fost inspirată, în principal, din mișcarea șerpilor. Shigeo Hirose a fost unul dintre primii cercetători care au descoperit și implementat multe aplicații ale sistemelor robotice flexibile bazate pe studiul mișcării șerpilor.

Au fost dezvoltate sisteme mecanice pentru manipuloare acționate cu tije elastice, manipuloare acționate pneumatic sau hidraulic, manipuloare cu tuburi concentrice, sau manipuloare acționate cu ajutorul materialelor cu memoria formei. Din studiul acestor lucrări se observă cu certitudine că cinematica manipuloarelor continuum este puternic influențată de frecarea cu alunecare care apare în principal la acționarea prin cabluri (fire, tije).

S-au studiat mai multe lucrări care acoperă un spectru larg de posibilități de obținere a unor sisteme robotice flexibile. Abordările din punct de vedere științific sunt din cele mai variate, iar autorii acestora sunt de cele mai multe ori nume cu notorietate în domeniul roboticii. Au fost selectate câteva lucrări dintr-o listă de lucrări importante care creează o imagine clară și completă asupra stadiului actual și interesul tot mai crescut pentru acest domeniu de cercetare.

S-au prezentat și analizat comparativ diverse soluții pentru sisteme robotice de tip șarpe, astfel:

În lucrarea *„Development of a Slender Continuum Robotic System for on-wing Inspection/Repair of Gas Turbine Engines”* [27], fig. 1.4, este prezentat un sistem robotic articulată gen șarpe, acționat prin intermediul unor tije elastice (fire), ca o propunere pentru inspecția minim invazivă a paletelor motoarelor de aeronave.

În lucrarea *“Model-less Hybrid Position/Control: A Minimalist Approach for Continuum Manipulators in Unknown, Constrained Environments”* [118], fig. 1.7, este propus un controler hibrid ce poate fi aplicat unui spectru larg de manipuloare, mai ales atunci când nu se cunosc configurația și constrângerile acestora. Controlerul poate fi utilizat și în cazul manipuloarelor la care îndoirea nu poate fi pe deplin înțeleasă din punct de vedere mecanic și cinematic.

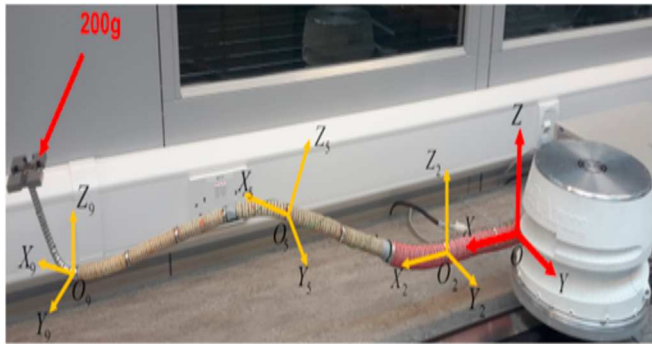


Fig. 1.4 Sistemul robotic desfășurat [27]

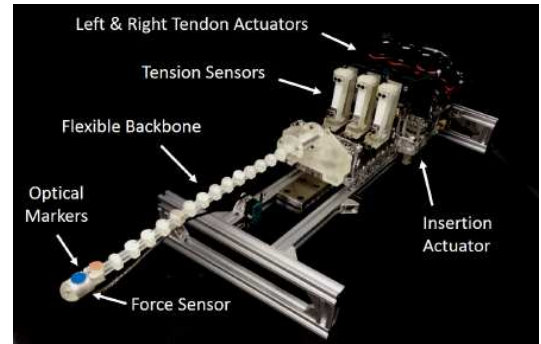


Fig. 1.7 Componentă sistem robotic [118]

Lucrarea “*Autonomous Control of Continuum Robot Manipulators for Complex Cardiac Ablation Tasks*” [119], fig. 1.9, prezintă o soluție de control hibrid cu ajutorul căruia poziția și forța din vârful manipulatorului sa fie acordate continuu, astfel ca acesta să poată efectua sarcini complexe, cum ar fi cele întâlnite în ablația cardiacă.

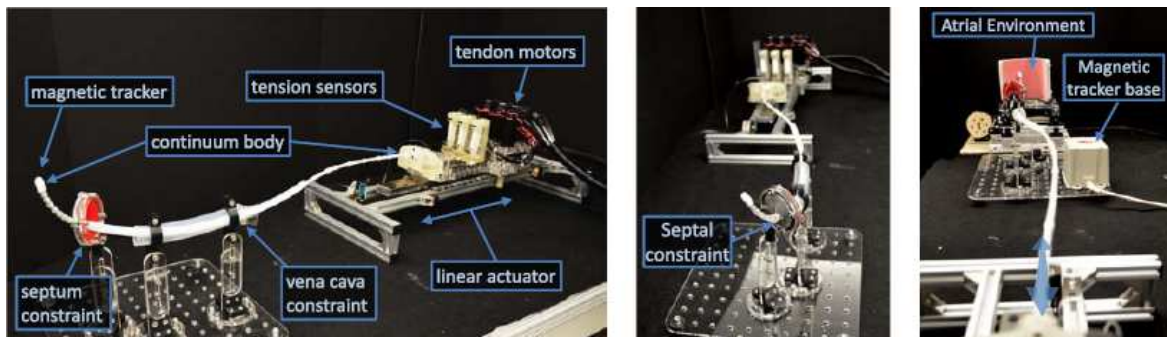


Fig. 1.9 Construcție manipulator (a), constrângerile pe care trebuie să le depășească (b), și dispozitiv de urmărire a vârfului în mediul atrial (c) [119]

Lucrarea “*System Design of an Insertable Robotic Effector Platform for Single Port Access (SPA) Surgery*” [116], fig.1.10, prezintă un manipulator numit IREP ( platforma de inserție a unui efector robotic) folosit pentru intervențiile chirurgicale cu o singură cale de acces. Este alcătuit din doi roboți continuum tip șarpe, două mecanisme paralelogram și un modul de vizualizare. Sistemul robotic are un număr total de 17 grade de libertate. Această platformă robotică, prin concepția sa unică, ține seama de aspecte legate de siguranță. De exemplu, dacă o coloană vertebrală de NiTi este ruptă, se deconectează unitatea de acționare și se acționează manual toate articulațiile platformei robotice, în așa fel încât să se inverseze secvența de desfășurare a acestuia. Acest fapt permite retragerea robotului din abdomenul pacientului într-o manieră sigură.

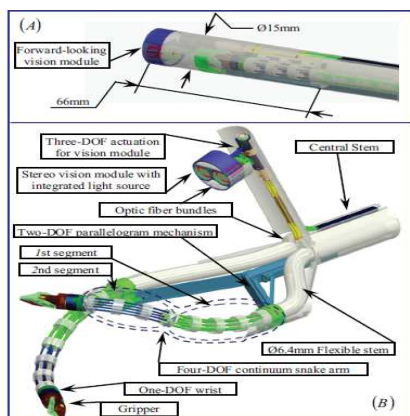


Fig. 1.10 Vedere generală a manipulatorului desfășurat (B) și nedeșfășurat (A) [116]

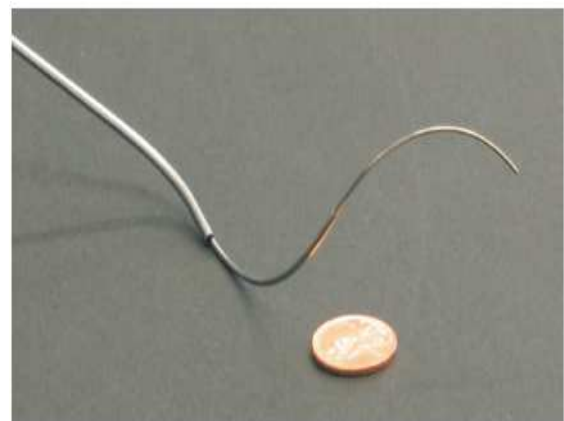


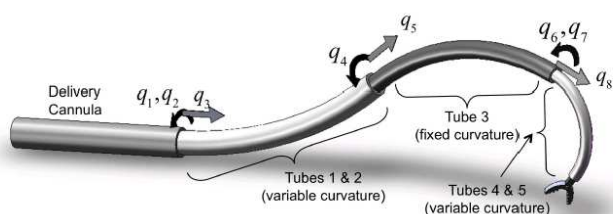
Fig. 1.12 Prototip de canulă activă [112]

Lucrarea *“Toward Active Cannulas: Miniature Snake-Like Surgical Robots”* [112] prezintă o clasă de roboți flexibili continuum numită canule active. Acești roboți folosesc mai multe tuburi telescopice, precurbate, superelastice. Această clasă de roboți folosește energia stocată chiar în coloana vertebrală pentru a realiza acțiunea de îndoire. În figura 1.12, este prezentat un prototip ce se bazează pe proprietățile superelastice ale nitinolului. Astfel că robotul este format din trei secțiuni din tuburi de nitinol, precurbate după o formă circulară stabilită anterior.

Soluția din lucrarea *“Toward a Hybrid Snake Robot for Single-Port Surgery”* [78], fig. 1.14, combină două sisteme robotice respectiv unul cu elemente rigide articulate [25] și un robot construit din tuburi concentrice [39]. Este vorba despre un sistem hibrid care urmărește în principal realizarea unei raze de curbura foarte mici, a unei rigidități sporite a vârfului și a unei dexterități superioare. Sistemul robotic hibrid combină avantajele oferite de cele două sisteme componente în parte.



a) Robotul articulată [25]



b) Robotul cu tuburi concentrice [39]

Fig. 1.14 Componenta robotului hibrid

Sistemul robotic studiat în lucrarea *“The Kinematic Synthesis of a Spatial, Hyper-Redundant System based on Binary Electromagnetic Actuators”* [105], fig. 1.18, se bazează pe un concept relativ original de coloană vertebrală compusă dintr-un lanț de actuatori electromagnetici, alcătuiți din patru jumătăți de inel din material feromagnetic, legate între ele prin intermediul unor articulații de aluminiu. Acest sistem electromagnetic de acționare permite un cuplu de menținere ridicat, fiind simplu din punct de vedere constructiv, cu o structură modulară ce permite obținerea unei rigidități ridicate ce poate fi menținută pe toată durata manipulării.

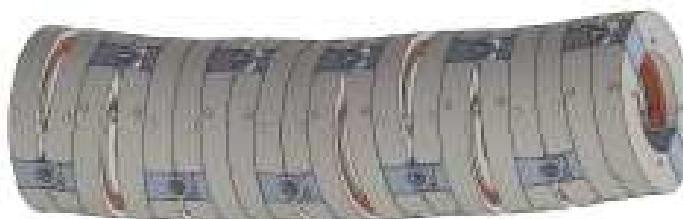
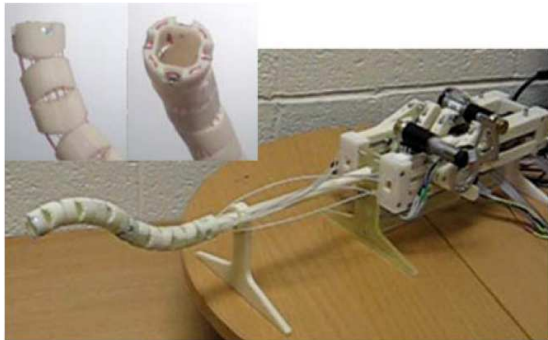


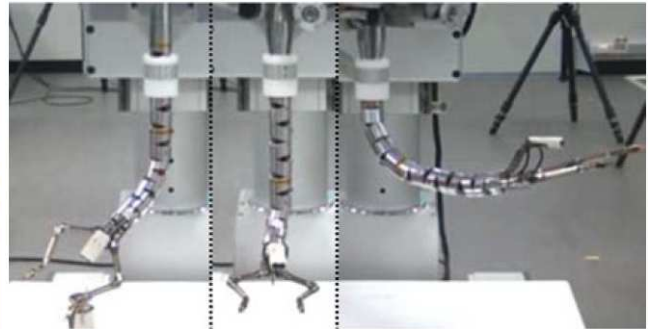
Fig. 1.18 Robotul hiper-redundant cu actuatori electromagnetici [105]

Este analizată în detaliu soluția prezentată în lucrarea *“A Stiffness-Adjustable Hyperredundant Manipulator Using a Variable Neutral-Line Mechanism for Minimally Invasive Surgery”* [70], fig. 1.19, materializată printr-un manipulator hiper-redundant cu linie neutră variabilă. Sistemul chirurgical este alcătuit dintr-o unitate flexibilă compusă din două instrumente cu șapte grade de libertate și un endoscop cu patru grade de libertate. Lucrarea propune un design unic al elementelor rigide și al sistemului de acționare folosit. De asemenea sunt propuse soluții care să prevină o posibilă alunecare între elementele rigide, cum ar fi introducerea între acestea a unor inele de teflon de grosime 0,5 mm. Controlul activ al rigidității prin reglarea continuă a tensiunii din firele de acționare, dar și construcția sa

unică recomandă folosirea acestui manipulator ca un tub flexibil de ghidare pentru instrumente sau dispozitive chirurgicale utilizat în chirurgia cu o singură cale de acces.



**Fig. 1.19 Manipulatorul cu 4 grade de libertate și sistemul de acționare [70]**



**Fig. 1.20 Sistem chirurgical ce folosește manipulatorul [70]**

**În capitolul 2**, s-a realizat prototiparea virtuală a sistemului robotic care presupune:

- Elaborarea unor familii de soluții constructive, cu geometrie variabilă;
- Analiza și sinteza soluțiilor propuse în baza unor criterii prestabilite sub aspect structural, cinematic și dinamic ;
- Alegerea soluției optime, având ca obiective importante gabaritul, configurația spațiului de lucru , manevrabilitatea sistemului robotic și eficiența sistemului de comanda și control.

Forma constructivă finală a unității flexibile a rezultat în urma proiectării și realizării practice a mai multor variante. Cu ajutorul unui program de modelare 3D [149], s-au proiectat diferite variante și combinații ale acestora. La începutul cercetării, dimensiunile elementelor sunt mai mari decât cele pentru explorări minim invazive, cu intenția declarată de a se pune mai ușor în evidență cinematica și comportamentul unității flexibile.

S-a pornit de la considerentul ca unitatea flexibilă proiectată pentru explorări minim invazive trebuie să îndeplinească câteva condiții importante:

- să aibă o flexibilitate ridicată pentru a putea atinge cât mai multe puncte în spațiul de lucru;
- să aibă, în același timp, o rigiditate suficient de mare;
- să aibă gabarit redus;
- să poată reveni în aceeași poziție de fiecare dată – criteriul repetabilității;
- să fie ușor de acționat și controlat;
- potențial pentru miniaturizare;

Fiecare din soluțiile constructive prezentate urmărește îndeplinirea unui număr cât mai mare din aceste criterii.

Variantele constructive, numite generic „*Elemente sferice*”, care au la bază contactul pe suprafețe sferice au următoarele avantaje:

- din punct de vedere constructiv vertebrele nu sunt complicat de realizat;
- oferă o foarte bună flexibilitate;
- viteză de răspuns foarte mare;
- număr redus de tije de acționare;
- obținerea cu ușurință a unor forme deformate complexe ale unității flexibile;
- forțe de acționare relativ mici;
- număr redus de vertebre pentru o lungime relativ mare a unității flexibile.

Dezavantaje identificate pentru aceste soluții:

- existența alunecării între vertebre,
- forțe de frecare mai mari datorită suprafețelor mari în contact,
- necesitatea realizării unor suprafețe sferice conjugate între vertebre;

➤ controlul mișcării este mai dificil;

Vom prezenta în figurile de mai jos o parte din variantele proiectate și analizate:

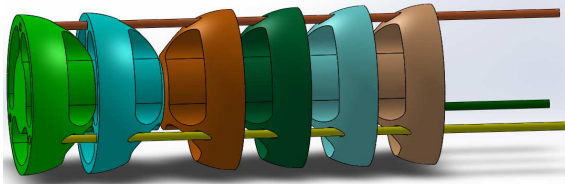


Fig. 2.7 Sfere cap la cap

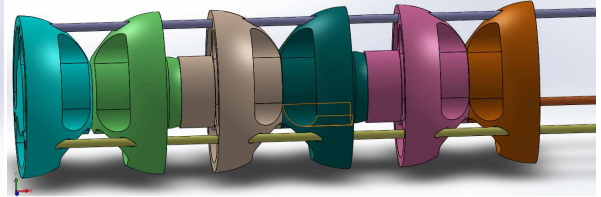


Fig. 2.14 Sfere cu parte cilindrică - 3 tije

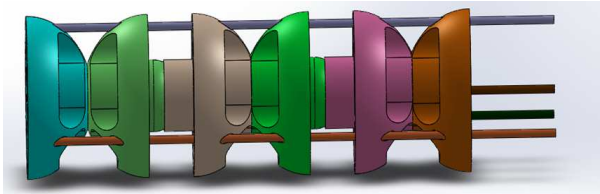


Fig. 2.15 Sfere cu parte cilindrică- 4 tije

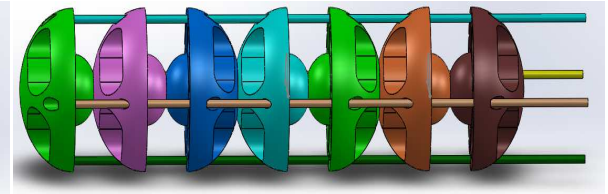


Fig. 2.22 Sfere depărtate

Varianta intitulată ”*Elemente combinate*”, figura 2.29, prezintă următoarele avantaje:

- vertebrele sunt ușor de realizat;
- număr redus de vertebre;
- se pretează într-o măsură destul de mare miniaturizării;
- stabilitate ridicată datorită tijelor care trec prin interiorul elementelor cilindrice.

Dintre dezavantaje:

- mișcare limitată;
- forțe de acționare mai mari;
- forțe de contact mari pentru menținerea unității flexibile în poziție de echilibru;
- manevrabilitate mult mai redusă.

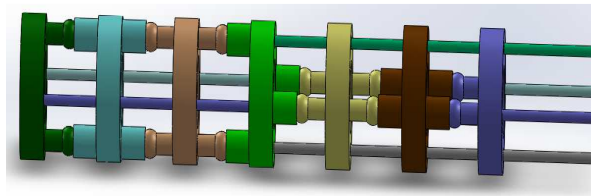


Fig. 2.29 Elemente combinate

O altă direcție de cercetare a avut în vedere rostogolirea fără alunecare a două suprafețe. Astfel, avem o categorie de unitate flexibilă pe care am denumit-o generic ”Suprafețe de rostogolire” cu diferite variante constructive așa cum vom vedea mai jos.

În această variantă vertebrele au trei suprafețe de rostogolire dispuse la  $120^{\circ}$  una față de alta.

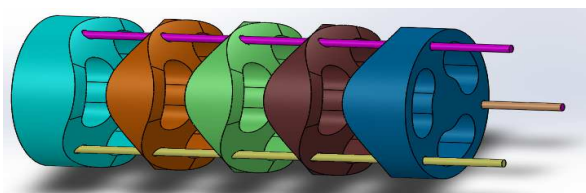


Fig. 2.33 Vertebre subțiri

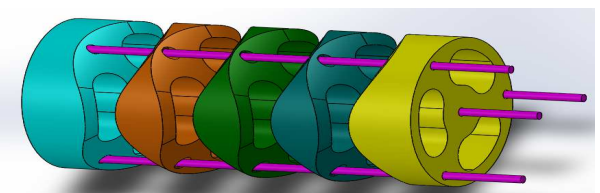


Fig. 2.34 Vertebre subțiri cu tijă centrală

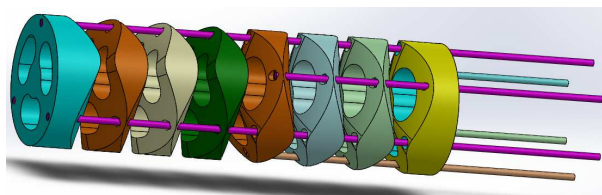


Fig. 2.35 Vertebre subțiri 2

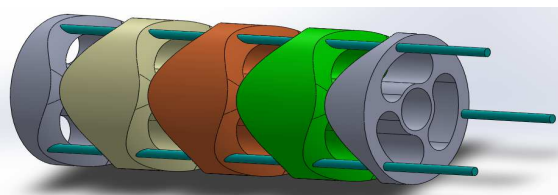


Fig. 2.39 Vertebre subțiri cu orificiu central

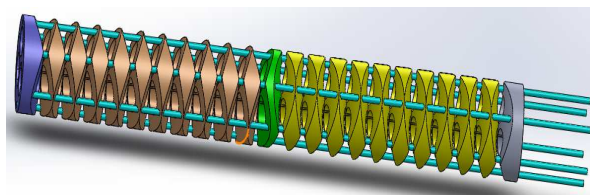


Fig. 2.45 Robot cu D 15mm, g 5mm

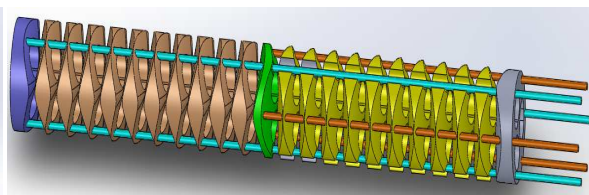


Fig. 2.49 Robot cu D 15mm, g 5mm cu alezaje

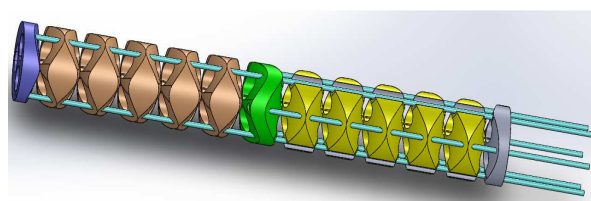


Fig. 2.53 Robot cu D 15 mm, g 10 mm

Varianta “*Suprafețe de ghidare*”, figura 2.57, a luat naștere având în vedere unele dintre dezavantajele variantelor prezentate anterior și anume instabilitatea și incapacitatea de a reveni de fiecare dată în poziția de echilibru. Ideea de “ghidare” a mișcării vertebrelor a fost necesară.

Avantajele pe care le prezintă varianta sunt legate de:

- mișcarea relativă dintre vertebre limitată foarte mult;
- control mai bun al mișcării;
- revenire la poziție de echilibru.

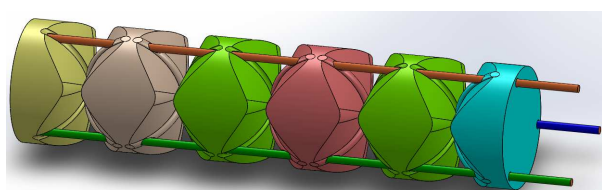


Fig. 2.57 Suprafețe de ghidare

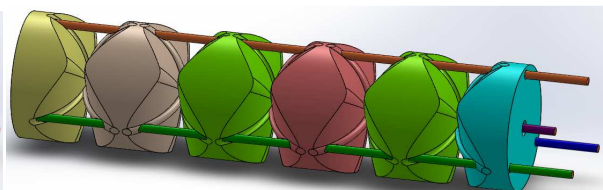


Fig. 2.58 Suprafețe de ghidare cu tijă centrală

Soluțiile “A. 1” respectiv “A. 2”, figurile 2.59 și 2.60, au în vedere cele mai multe dintre criteriile stabilite anterior. Pe parcursul cercetării s-a observat că în afară de avantajele variantelor anterioare aceasta variantă prezintă în plus :

- raportul flexibilitate-rigiditate foarte bun;
- revenire în poziție de echilibru;
- suprafața complexă creată are un rol important în realizarea mișcării fără întreruperi ;
- mișcarea relativă dintre vertebre , mai ales la începutul mișcării, este foarte redusă;
- precizie mult mai mare.

Ca și dezavantaje:

- Flexibilitate mai redusă

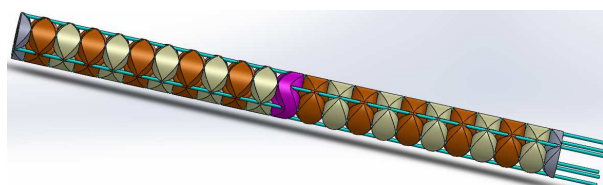


Fig. 2.59 "A. 1" – toate tijele sunt prinse vertebra de de capăt

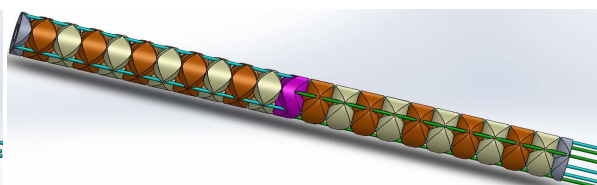


Fig. 2.60 "A. 2" – trei tije sunt prinse de vertebra mediană

Sinteza soluțiilor prezentate cu respectarea criteriilor stabilite a condus la o variantă optimă din punct de vedere structural, cinematic și dinamic, prezentată în fig. 2.69, care se compune din:

- două elemente de capăt, dintre care unul este elementul fix, pe care l-am numit "capăt 1 (fix)" iar celălalt numit "capăt 2"
- două segmente formate din câte 10 vertebre: 5 vertebre numite "vertebră plin" și 5 vertebre conjugate numite "vertebră gol",
- vertebra pe care am numit-o "element schimbare sens",
- 6 tije de acționare din oțel.

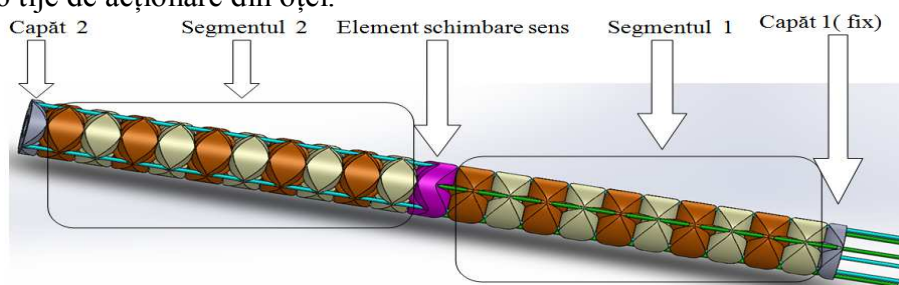


Fig. 2.69 Structura unității flexibile

Variantele cu "**tijă centrală**" presupun ca o parte semnificativă din forțele de contact, preîncărcarea, să fie preluate de aceasta. Se eliberează astfel tijele de acționare însă prezintă dezavantajul că datorită frecării dintre ea și vertebra, a curburii foarte mici pe care trebuie să o facă la fiecare vertebra duce la mărirea numărului de constrângeri care afectează spațiul de lucru și acuratețea mișcării.

Ca o problemă comună tuturor variantelor este aceea că datorită dispunerii la  $120^{\circ}$  a tijelor este necesară existența motoarelor de acționare pentru fiecare tijă. Necesitatea existenței motoarelor de acționare pentru fiecare tijă impune proiectarea unei scheme și a unui sistem de comandă și control destul de complex.

**În capitolul 3**, este prezentată prototiparea rapidă a elementelor sistemului mecanic flexibil. Pentru aceasta s-au analizat mai multe metode de prototipare rapidă, după care, în funcție de caracteristicile de material, de rezultatele încercărilor efectuate cu mai multe variante, s-a ales procedeul de obținere a elementelor componente ale prototipului. S-a descris procesul de asamblare a elementelor componente și s-a încheiat cu o caracterizare generală a ansamblului mecanic flexibil.

Au fost analizate mai multe variante de prototipare rapidă dintre care au fost supuse atenției următoarele:

- Fotopolimerizarea sau Stereolitografia (SL)[137]
- Laminated object modeling (LOM)[137]
- Tehnologia PJP (Plastic Jet Printing)[137]
- Tehnologia CJP (Color Jet Printing)[127]
- Tehnologia MJP (Multijet Printing)[129]
- Tehnologia DMP (Direct Metal Printing)[128]



O primă încercare s-a realizat cu ajutorul unei imprimante 3D de tip WANHAO DUPLICATOR 4 [143], figura 3.1, care folosește softul MAKER BOT[152] pentru a transmite informația de la modelul CAD la imprimantă. Tehnologia folosită este tehnologia PJP (Plastic Jet Printing) sau FDM ( Fused Deposition Modeling ) cu fir ABS cu diametrul filamentului de 1,75 mm, de culoare albastră [147]. Modelele printate sunt prezentate în Anexa I.3, piesele însă sunt deformate iar alezajele cu dimensiuni sub 1 mm, nu se regăsesc.

De aceea s-a realizat printarea rapidă cu ajutorul unei imprimante profesionale DIMENSION SST 1200es produsă de firma STRATASYS [139], figura 3.3, ce se află în dotarea laboratorului de Cercetare - Fabricare din cadrul Facultății de Mecanică, și folosește tehnologia FDM ( Fused Deposition Modeling). Vertebrele obținute prezintă o rugozitate foarte mare datorată modului de printare (așezare fir lângă fir), chiar dacă setările inițiale au fost alese pe cel mai înalt grad de precizie. De asemenea, nici unele dintre detalii cum ar fi: alezaje cu diametru mai mic de 1mm, forma circulară a acestora, sau suprafața de rostogolire a discurilor (afectată de depunerea strat cu strat), nu au fost reproduse cu acuratețe. Vertebrele astfel obținute necesită o operație de finisare care poate afecta forma suprafeței de rostogolire și a suprafeței de ghidare de pe vertebrele unității flexibile.

Prin urmare, s-a apelat la tehnologia de printare MJP (Multijet Printing) [129] folosind o imprimantă profesională *ProJet MJP 2500*. Cu această soluție se obțin geometrii complexe sau muchii ascuțite pe reperi de dimensiuni mici (0.25 mm) sau de dimensiuni mari fără a fi nevoie de finisare. Precizia de lucru este 0,025-0,05 mm/25 mm cu o toleranță cuprinsă între 0,01 și 0,02 mm.

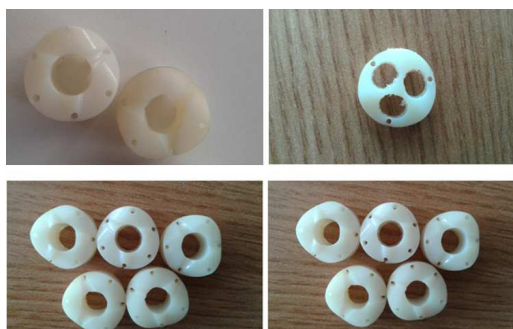


**Fig. 3.1 Imprimanta 3D Wanhao Duplicator 4 [143]**



**Fig. 3.3 Imprimanta 3D DIMENSION SST 1200es [139]**

În figura 3.9 prezentăm câteva imagini cu vertebrele unității flexibile obținute prin această tehnologie. În Anexa I.5 sunt prezentate mai multe imagini cu detalii ale modelelor printate.



**Fig. 3.9 Vertebrele obținute cu imprimanta ProJet 2500**

Materialul folosit pentru imprimarea vertebrelor unității flexibile este un *acrilonitril butadien stiren*, cunoscut sub multe denumiri, dintre care cea mai uzitată este *ABS*. Acesta

este un terpolimer [140] obținut prin polimerizarea stirenului în prezența polibutadienului. În general proporțiile elementelor componente variază între:

- 15 până la 35 % acrilonitril,
- 5 până la 30 % butadienă, și
- 40 până la 60 % stiren.

S-a realizat asamblarea elementelor componente ale prototipului folosind tije de acționare, care au o rigiditate ce permite unității flexibile să-și mențină forma deformată în orice poziție, dar mai ales sunt foarte flexibile. După mai multe încercări, s-au folosit tije din oțel inoxidabil cu diametrul de 0.2 mm.

Prin urmare s-a obținut un sistem mecanic flexibil alcătuit din 23 de vertebre confecționate din ABS și 6 tije flexibile de oțel inoxidabil prin intermediul cărora se realizează acționarea sistemului flexibil. Trei tije flexibile sunt prinse de vertebra de capăt (*capăt2*) iar celelalte trei sunt prinse de vertebra mediană. Prototipul astfel obținut satisface criteriile stabilite.

Se constată că prototipul realizat corespunde, din punct de vedere constructiv și funcțional, cerințelor modelului virtual.

Tijele de acționare sunt ușor de manevrat, având o flexibilitate ridicată. Întregul sistem are o greutate redusă ceea ce face ca manevrabilitatea unității flexibile să nu fie influențată de aceasta.

Considerăm că prototipul obținut are un comportament foarte apropiat de cel virtual, astfel ca rezultatele testelor ulterioare să ofere o imagine reală și corectă a soluției propuse.

**În capitolul 4**, se prezintă analiza modal-dinamică a sistemului robotic care cuprinde:

- Modelele matematice prin care se fundamentează analiza modal-dinamică,
- Prototiparea virtuală cu programul Ansys[124];
- Prototiparea virtuală cu programul Adams[123].

În alegerea modelelor matematice s-a avut în vedere că sistemul analizat are o structură complexă formată din elemente rigide și elemente deformabile. În acest context vectorul coordonatelor generalizate pentru un element deformabil are 3 componente importante, și anume poziția și orientarea sistemului de referință solidar cu elementul deformabil, respectiv coordonatele modale.

În cazul prototipării virtuale pentru procesarea analizei modal-dinamice cu programul Adams se apelează la metoda elementului finit când fiecare corp deformabil este discretizat în elemente finite ( în cazul de față s-au utilizat elemente de tip hexaedral). Poziția și orientarea unui punct sau nod în mișcarea elementelor cinematice ca solid deformabil se calculează cu o combinație liniară între coordonatele modale și modurile sau formele proprii de vibrații (relațiile 4.3 și 4.4). Metoda adoptată de programul Adams în analiza unui sistem cu elemente deformabile se bazează în principal pe teoria dezvoltată de autorii RR Craig și M.C.C Bampton [24].

$$u_p = \phi_p^i \cdot q \quad , \quad (4.3)$$

$$\theta_p = \phi_p^r \cdot q \quad , \quad (4.4)$$

În cazul prototipării virtuale cu programul Adams s-au parcurs următoarele etape:

- Elaborarea modelului virtual 2D și apoi 3D al sistemului robotic ;
- Transferul bazei de date, în regim parametrizat în programul Adams;
- Definirea proprietăților de material și a caracteristicilor inerțiale pentru vertebrele rigide și tijele flexibile ale sistemului mecanic;
- Elaborarea modelului cinematic, cu definirea elementelor cinematice (proprietăți inerțiale, sisteme de axe locale), a cuplelor cinematice și a coordonatelor generalizate;

- Transformarea prin metoda elementului finit a corpurilor rigide care modelează tijele de acționare în corpuri flexibile;
- Identificarea pe baza datelor din literatura de specialitate sau determinate prin analiza cu elemente finite a caracteristicilor dinamice ale contactului rigid-rigid sau rigid-deformabil;
- Se definește legea de variație a coordonatelor generalizate aferente cuplelor motoare cu respectarea secvențelor de program stabilite pentru comanda și controlul motoarelor de acționare din cercetarea experimentală.

Sunt prezentate modelele cinematice și dinamice ale unității flexibile. În scopul monitorizării și identificării spațiului de lucru descris de unitatea flexibilă a sistemului robotic s-au prezentat și analizat forme deformate ale unității flexibile pe intervale de timp corespunzătoare diagramelor de comandă și control ale sistemului de acționare (figurile 4.4 , 4.6).

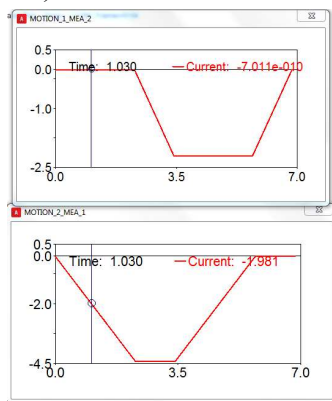


Fig. 4.4 Forma deformată a unității flexibile pe intervalul de timp  $0 \div 2.286$  [s]

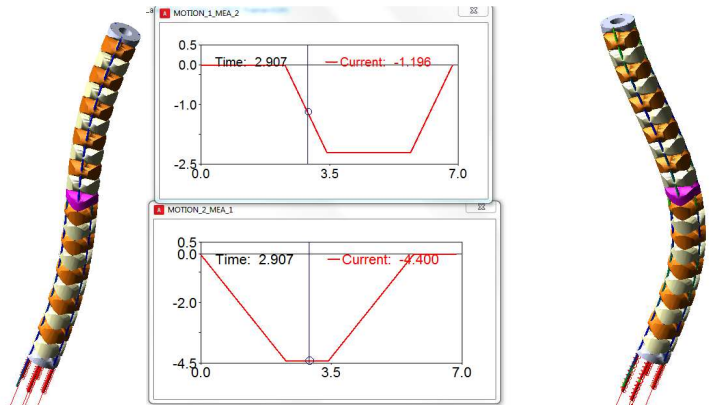


Fig. 4.6 Forma deformată a unității flexibile pe intervalul de timp  $2.286 \div 3.429$  [s], prima secvență

S-au identificat diagramele de variație în timp ale deplasărilor și orientărilor vertebrelor de interes din unitatea flexibilă în mișcarea de solid rigid .

S-au determinat parametrii cinematici în mișcarea de solid rigid cuplată cu cea de solid deformabil a tijelor de acționare pentru cele două tronsoane ale unității flexibile .

S-au identificat legile de variație ale forțelor din cuplele motoare (figurile 4.26 și 4.27).

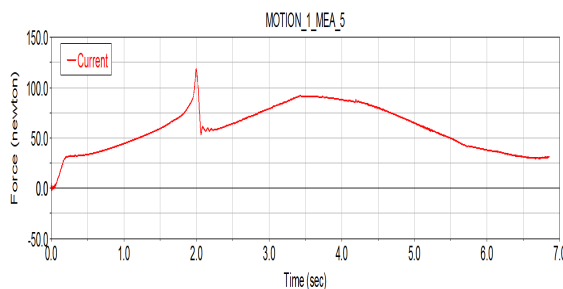


Fig. 4.26 Legea de variație în timp pentru forța din cupla motoare 1

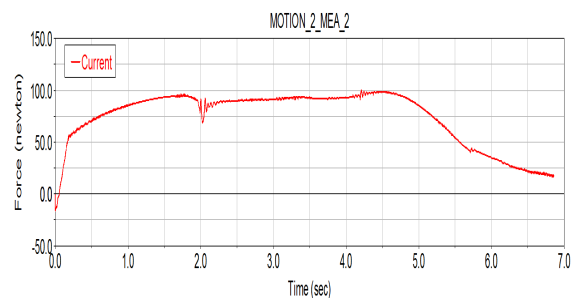


Fig. 4.27 Legea de variație în timp pentru forța din cupla motoare 2

Pentru dezvoltarea prototipării virtuale respectiv a analizei dinamice cu programul Ansys s-au parcurs în principal următoarele etape:

- monitorizarea complexă și completă în regim dinamic a contactului dintre vertebrele unității flexibile pe de o parte și pe de altă parte dintre vertebre și tijele de acționare,

- flexibilitate în definirea caracterului rigid sau deformabil al elementelor componente ale unității flexibile,
- monitorizarea evoluției în timp a tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor pentru fiecare element component al unității flexibile.

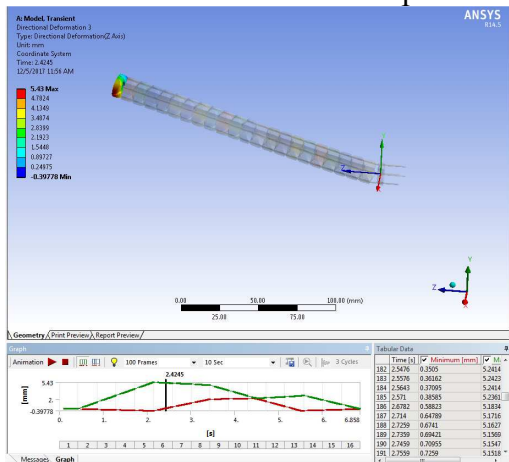


Fig. 4.39 Variația deplasării vertebrei finale, după axa Z (forma deformată la 2.42[s])

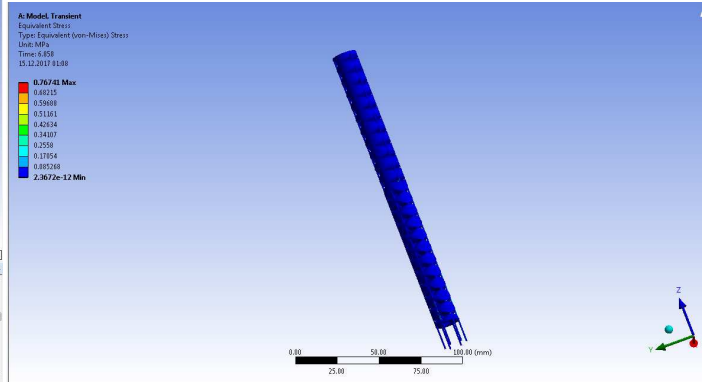


Fig. 4.41 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises

În concluzie, analiza dinamică a întregului sistem procesată numeric cu programele Adams și Ansys, oferă o imagine complexă asupra comportării în regim dinamic a sistemului mecanic cu o mare flexibilitate de adaptare la cerințele impuse de încercările și testările experimentale.

În capitolul 5, sunt elaborate modelele matematice necesare pentru studiul cinematic al sistemului robotic. Acest capitol cuprinde ecuațiile de constrângere cinematică pentru două corpuri rigide în contact, modelul cinematic al cuplei de translație, elaborarea unui soft pentru procesarea modelelor matematice, analiza comparativă și interpretarea rezultatelor numerice și concluzii.

Se evaluează ecuațiile de constrângere cinematică privind deplasarea unui punct pe un profil, în coordonate carteziene și apoi în coordonate polare (fig.5.1).

Se determină ecuațiile de constrângere cinematică pentru două profile în contact, aflate în mișcare de rostogolire fără alunecare (fig.5.2).

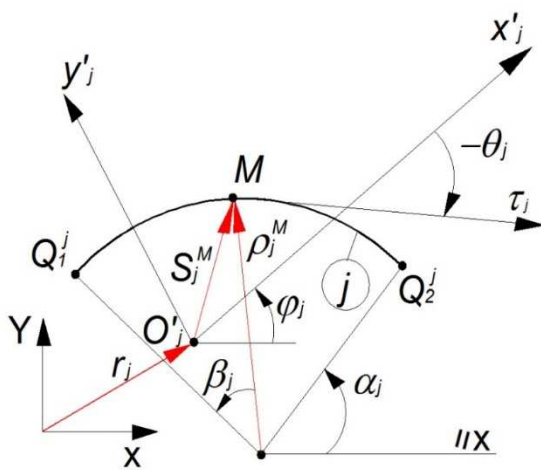


Fig. 5.1 Poziția punctului de contact

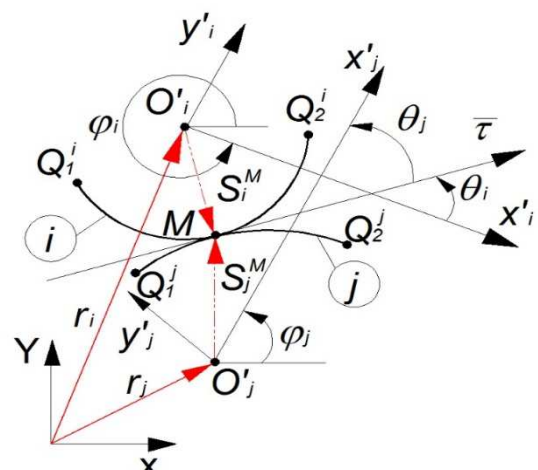


Fig. 5.2 Geometria contactului dintre două profile

Se identifică ecuațiile de constrângere cinematică rezultate din condițiile de contact, rostogolire fără alunecare și condiția de tangență comună, cu sistemele de referință mobile plasate în centrele de rotație, exprimate în coordonate carteziene și apoi în coordonate polare.

Sistemul de acționare format din elemente flexibile a fost modelat matematic prin cuple de translație. S-au elaborat modele matematice care au la bază condiții de existență geometrică și cinematică a cuplei de translație .

Având în vedere că mișcarea este comandată prin cuple motoare de translație s-a elaborat modelul dinamic al cuplei motoare .

S-au elaborat ecuațiile de constrângere cinematică pentru un sistem format din trei vertebre. Pentru cele două trepte formate din câte două vertebre s-au identificat vectorii coordonatelor generalizate, având fiecare câte 9 componente (relațiile 5.120, 5.121).

$$q_I = [S_{j1}, S_{j2}, \beta_{j1}, \varphi_{j1}, \varphi_{j1}, \varphi_{j2}, \theta_{j1}, x_{j1}, y_{j1}]^T \quad (5.120)$$

$$q_{II} = [S_{k1}, S_{k2}, \beta_k, \varphi_k, \varphi_{k1}, \varphi_{k2}, \theta_k, x_k, y_k]^T \quad (5.121)$$

În concluzie, s-au elaborat modelele matematice pentru trei corpuri rigide  $i, j$  și  $k$  aflate în contact. Contactul este cu rostogolire fără alunecare, mișcarea fiind asigurată prin cuple de translație.

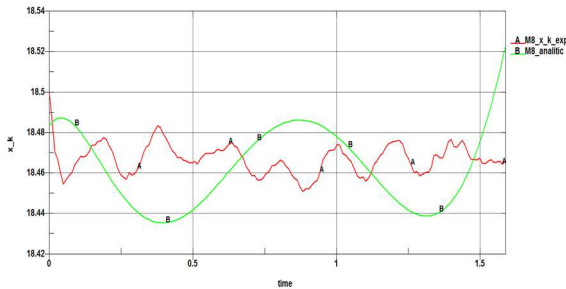
S-a realizat un program cu un caracter flexibil, sub mediul de programare Maple, care permite rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare după algoritmul Newton-Raphson.

Sunt 18 coordonate generalizate și un număr corespunzător de ecuații de constrângere cinematică.

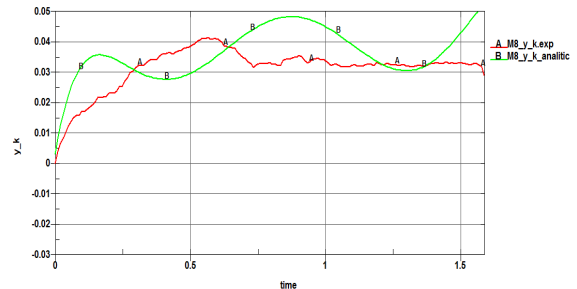
Flexibilitatea programului elaborat permite procesarea modelelor matematice pentru analiza cinematică și analiza dinamică inversă, rezultând legile de variație în timp pentru parametrii cinematici și pentru forțele de legătură din cuplele cinematice.

S-a creat o interfață între procesarea modelelor matematice, prototiparea virtuală cu programul Adams și analiza experimentală.

S-au realizat analize grafice comparative între rezultatele obținute prin procesarea modelelor matematice și analiza experimentală, respectiv modelare matematică și analiza numerică cu programul Adams. În figurile 5.28 și 5.29 sunt analizate comparativ, matematic – experimental, componentele deplasării vertebrei  $k$  după axele  $x$  și  $y$ , se constată diferențe valorice foarte mici.



**Fig. 5.28** Diagramele de variație în timp ale vertebrei  $k$  după axa  $x$



**Fig. 5.29** Diagramele de variație în timp ale vertebrei  $k$  după axa  $y$

S-au determinat diagramele pentru cursa din cupla de translație a modelului cinematic și deplasarea vertebrei elastice acționate de motor, ambele deplasări având un caracter liniar.

În figurile 5.31 și 5.32 sunt prezentate diagramele de variație în timp pentru componentele deplasării vertebrei rigide  $j$ , în varianta analitică și cea rezultată din simularea numerică cu programul Adams.

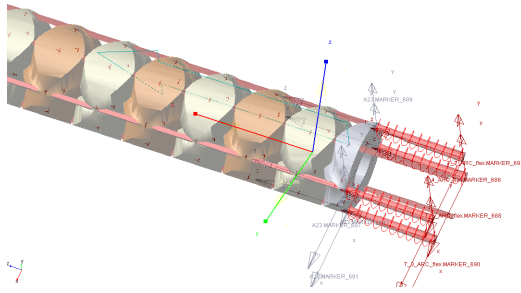


Fig. 5.31 Poziția markerului la care se raportează cinematica vertebrei j

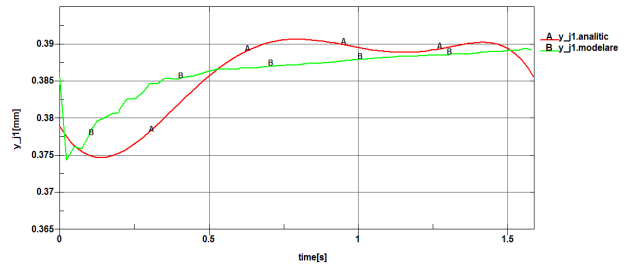


Fig. 5.32 Diagrame de variație în timp ale deplasării vertebrei j după axa y

Se constată diferențe valorice mici pentru deplasările după axele x și y. Constatăm mici deviații/oscilații ale curbelor obținute pe cale experimentală și prin simulare cu programul Adams. Aceasta se explică prin faptul că la analiza experimentală dar și la prototiparea virtuală, la contactul dintre corpurile rigide este prezentă și frecarea de rostogolire, chiar dacă soluția constructivă concepută, are elemente de concepție pentru diminuarea acestui fenomen.

Diagramele cinematice prezentate și analizate comparativ, respectiv modelare matematică - prototip virtual – experiment, certifică în principal valoric corectitudinea modelelor elaborate.

**În capitolul 6**, este dezvoltată analiza experimentală a unității flexibile. Acest capitol cuprinde:

- metode și tehnici de măsurare,
- considerații privind execuția elementelor componente ale sistemului mecanic,
- proiectarea sistemului de comandă și control,
- elaborarea softului de comandă și control,
- asamblarea instalației experimentale și elaborarea de protocoale pentru testări și încercări,
- testarea și încercarea experimentală a standului,
- analiza și sinteza rezultatelor experimentale dar și analize comparative pe modelul matematic-virtual și experimental,
- concluzii.

Pentru realizarea analizei experimentale s-a utilizat un sistem de achiziție și analiză de tip CONTEMPLAS [145], aflat în dotarea Facultății de Mecanică din cadrul Universității din Craiova. Obținerea datelor cinematice are loc cu ajutorul unor markeri ce se atașează pe vertebrele de interes ale unității flexibile, figura 6.2. În figura 6.3 este prezentat modul schematic al procesului de video-analiză a softului CONTEMPLAS.

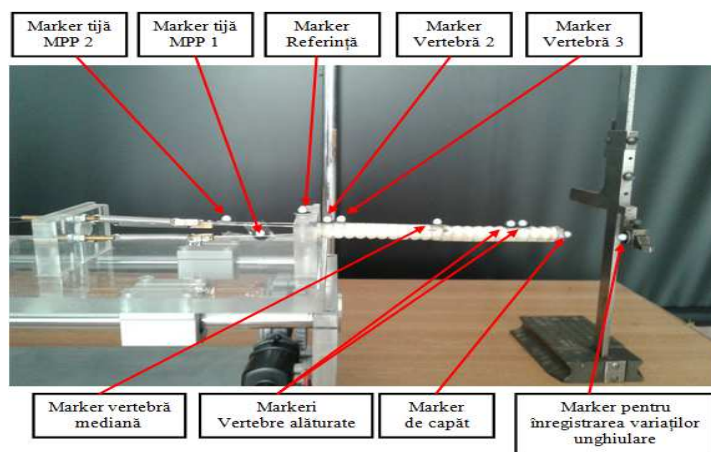


Fig. 6.2 Identificare puncte de interes și atașare markeri

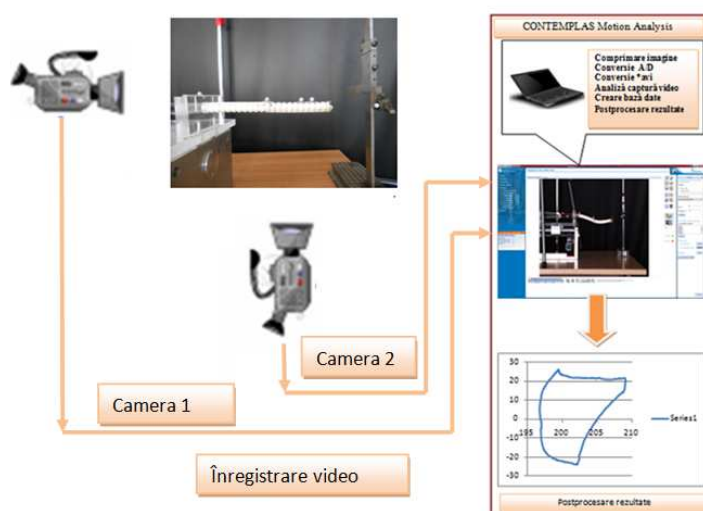


Fig. 6.3 Modul schematizat al procesului de video-analiză a softului CONTEMPLAS

S-a conceput, proiectat și realizat în Laboratorul de Fabricație al Facultății de Mecanică din Cadrul Universității din Craiova, un sistem robotic complex format din două componente, respectiv, sistemul mecanic și sistemul de comandă și control.

**Realizarea sistemului mecanic** prezentat în figura 6.4 a presupus:

- Alegerea motoarelor pas cu pas de tip Nema 23 (Suncor Motor- SC57STH-2804A) cu un cuplu de menținere de 12,6 kgcm [133],
- Realizarea ansamblului necesar obținerii forțelor de pretensionare,
- Realizarea unei transmisii mecanice în vederea obținerii avansului longitudinal al sistemului mecanic. Aceasta se compune dintr-un moto-reductor de curent continuu tip DONGYANG (12 Vcc), ce transmite mișcarea la un angrenaj cu roți dințate cilindrice cu dinți drepți ( $z_1=33$ ,  $z_2=18$ ) și apoi la un mecanism șurub-piuliță (M12×1,5). Piulița este solidară cu placa suport mobilă iar pe aceasta este montată unitatea flexibilă. S-au efectuat măsurători pentru determinarea vitezei de deplasare a plăcii suport mobile, în funcție de turația moto-reductorului, folosindu-se un turometru digital AXIOMET AX-2901[132],
- S-au confecționat dintr-un aliaj de aluminiu 6082 placa de bază, părțile laterale ale acesteia, rolele pentru antrenarea tijelor. Prelucrările mecanice s-au făcut pe un centru de prelucrare cu comandă numerică vertical YOUNG TECH YMC-1050 care se află în dotarea Laboratorului de Fabricație al Facultății de Mecanică din Craiova.

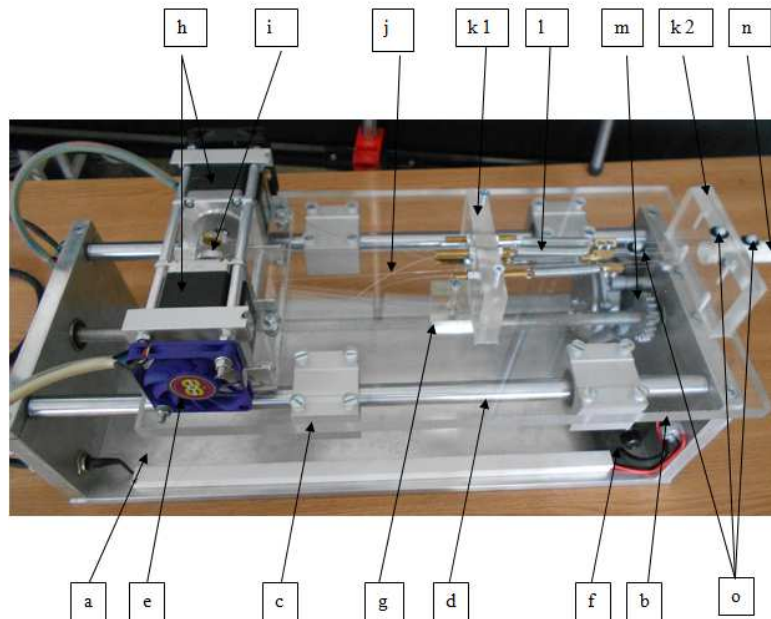


Fig. 6.4 Sistem mecanic

**Sistemul de comandă și control** (figurile 6.41, 6.42) este alcătuit din următoarele părți importante și anume:

- o parte care alimentează, comandă și controlează cele două motoare pas cu pas, formată din sursă de alimentare în comutație [151], două drivere micropășire de tipul 2H504 [133] și o placă de dezvoltare de tip ARDUINO UNO[144];
- o parte de alimentare și reglare a avansului longitudinal alcătuită dintr-un transformator de curent continuu de 24 V, un bloc de reglare curent continuu, elemente siguranță (siguranțe fuzibile), potențiomtru, comutatoarele 1și 2, voltmetru,
- o parte de alimentare ventilatoarele de răcire a motoarelor pas cu pas, formată din sursa de curent continuu de 12 V.

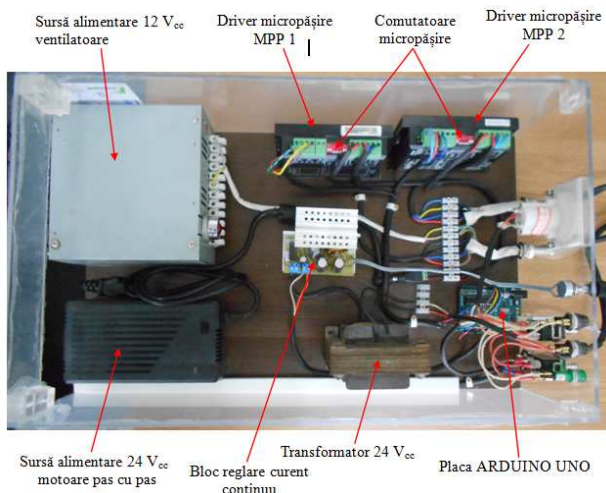


Fig. 6.41 Sistemul de comandă și control (vedere de sus)

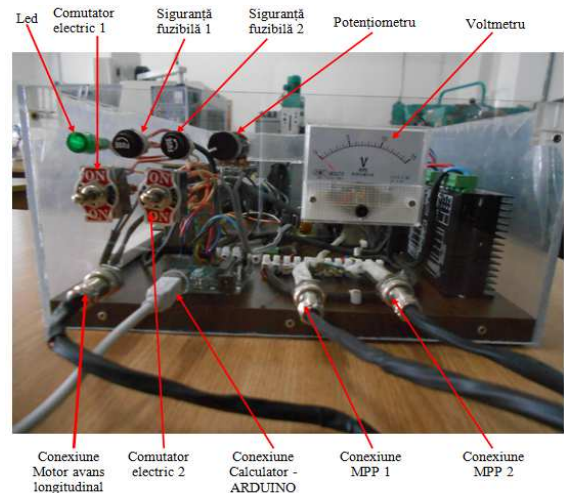


Fig. 6.42 Sistemul de comandă și control (vedere frontală)

**Elaborarea softului de comandă și control** a trebuit să țină cont de legătura dintre calculator și placa Arduino. Acest lucru s-a realizat cu ajutorul aplicației Tera Term [134]. S-a realizat un program în mediul de programare Tera Term care este prezentat în figurile 6.51și 6.52.





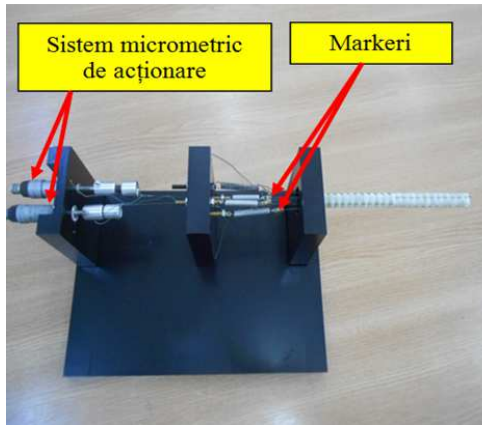


Fig. 6.57 Stand inițial

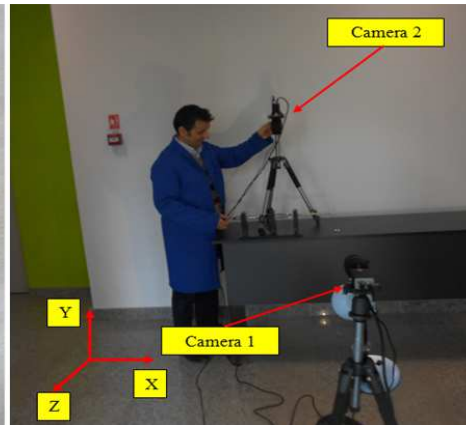


Fig. 6.58 Testare inițială

**Încercările experimentale** pe forma finală a instalației experimentale încep prin a atașa markeri pe vertebrele ce interesează în mod deosebit în vederea obținerii legilor de mișcare. S-au făcut următoarele notații:

- $M_0$  – markerul de referință căruia i se atașează sistemului de coordonate;
- $M_1$  - markerul atașat vertebrei mediane (de schimbare de sens);
- $M_2$  și  $M_3$  - markeri atașați vertebrelor intermediare;
- $M_4$  - markerul atașat vertebrei de capăt;
- $M_5$  - markerul atașat unui reper fix față de care se pot măsura variațiile unghiulare ale unui segment al unității flexibile;
- $M_6$  - marker atașat tijei de acționare corespunzătoare motorului MPP<sub>1</sub>;
- $M_7$  - marker atașat tijei de acționare corespunzătoare motorului MPP<sub>2</sub>;
- $M_8$  - marker atașat pe vertebra 2;
- $M_9$  – marker atașat pe vertebra 3.

Modul de dispunere a markerilor a fost prezentat în figura 6.2, iar poziția acestora este indicată în figura 6.59. În figura 6.60, este prezentat modul de notare a markerilor. Markerii pe care i-am folosit au formă sferică, sunt reflectorizanți, cu diametrul de 6 mm.

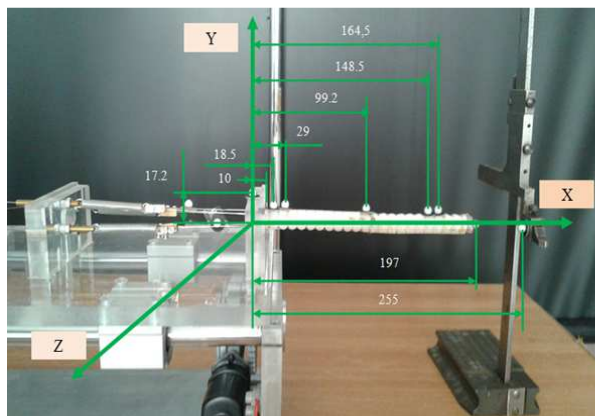


Fig. 6.59 Poziție markeri

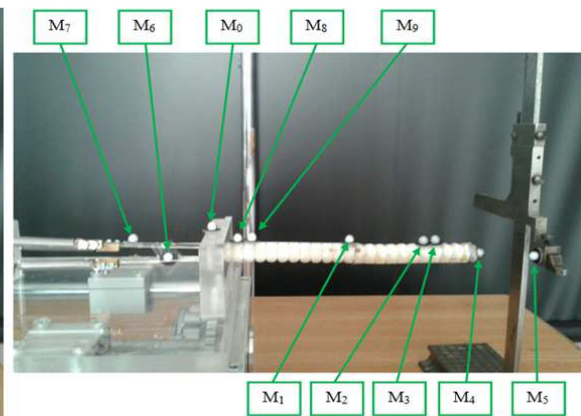


Fig. 6.60 Modul de notare markeri

Testarea experimentală s-a făcut pentru cele trei programe stabilite anterior, pentru varianta de micropășire 1600 pași/rotație.

S-au întocmit ciclogramele de lucru pentru fiecare program în parte: figura 6.61 (P1), figura 6.68 (P2), figura 6.78 (P3). Echipamentul pune în evidență markerii, după ce au fost identificați, cu culoarea roșie, iar traiectoriile acestora cu culoarea verde. Print-urile făcute în mediul de analiză vor pune în evidență începutul de program, poziția de maxim, eventuale poziții intermediare și, în final, sfârșitul ciclului (revenire în poziție inițială), atât pentru planul X-Y (camera 1), cât și pentru planul X-Z (camera 2 - vedere de sus).

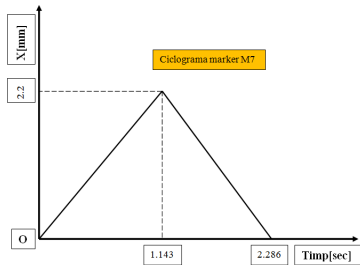


Fig. 6.61 Ciclul marker  $M_7$

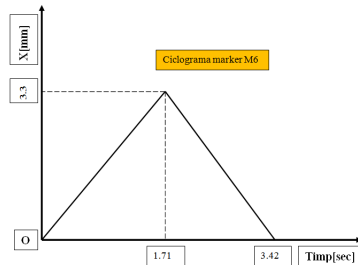


Fig. 6.68 Ciclul marker  $M_6$

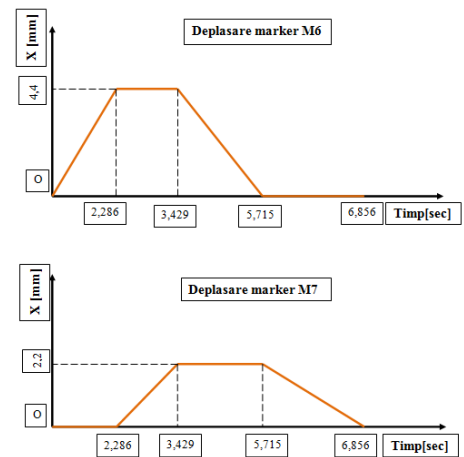


Fig. 6.78 Ciclograma pentru markerii  $M_6$  respectiv  $M_7$

**Analiza și sinteza rezultatelor experimentale** a fost realizată pentru următoarele situații:

- Deplasările în timp ale markerilor de interes (fig 6.60) pentru varianta cu viteza motoarelor pas cu pas de 35 pași/secundă și 1600 pași/rotație;
- Deplasările în timp ale markerilor analizați (fig 6.60) pentru varianta cu viteza motoarelor pas cu pas de 17 pași/secundă și 1600 pași/rotație;
- Deplasările în timp ale markerilor  $M_8$  și  $M_9$  atașați vertebrelor 2 și 3 pentru programul P2 cu viteza de 35 pași/secundă și 1600 pași/rotație.

În urma postprocesării rezultatelor experimentale, s-a creat o interfață de transfer către softul LS-DYNA Preprocesor [126], în vederea filtrării acestora. Scopul acestui transfer a fost acela de a obține o interpretare precisă a rezultatelor obținute. A fost studiat comportamentul tuturor markerilor precizați anterior, însă din considerente de spațiu analiza s-a axat pe studiul mișcării următorilor markeri:

- markerul  $M_4$  atașat vertebrei de capăt;
- markerul  $M_1$  atașat pe vertebra mediană;
- markerul  $M_6$  atașat tijei de acționare a motorului MPP1;
- markerul  $M_7$  atașat tijei de acționare a motorului MPP2;
- markerul  $M_8$  atașat vertebrei 2;
- markerul  $M_9$  atașat vertebrei 3.

Astfel:

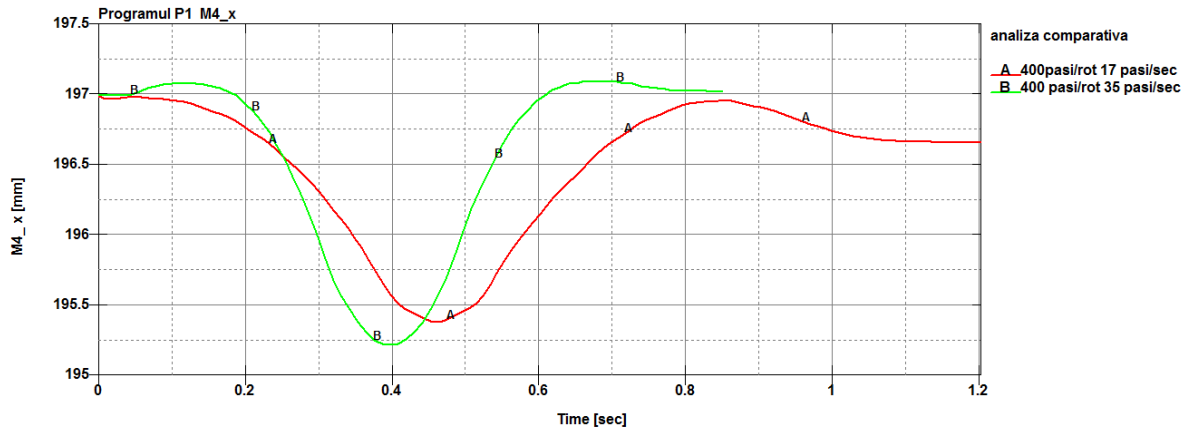
- pentru varianta A (viteza 35 pași/sec respectiv 1600 pași/rotație), s-au determinat diagramele de variație ale deplasărilor în timp, ale markerilor  $M_1$ ,  $M_4$ ,  $M_6$  și  $M_7$  pentru programul P1, pentru programul P2 și pentru programul P3
- pentru varianta B (viteza 17 pași/sec respectiv 1600 pași/rotație), s-au determinat diagramele de variație ale deplasărilor în timp ale markerilor  $M_1$ ,  $M_4$ ,  $M_6$  și  $M_7$  pentru programul P1 și pentru programul P3,
- pentru varianta C (viteza 35 pași/sec respectiv 1600 pași/rotație), s-au determinat diagramele de variație ale deplasărilor în timp ale markerilor  $M_8$  și  $M_9$  pentru programul P2.

**Analiza comparativă** pentru spațiul de lucru realizat de modelul experimental a fost realizată pentru markerul  $M_4$ , corespunzător elementului final al unității flexibile. Prin urmare au fost prezentate diagramele de variație în timp ale parametrilor cinematici:

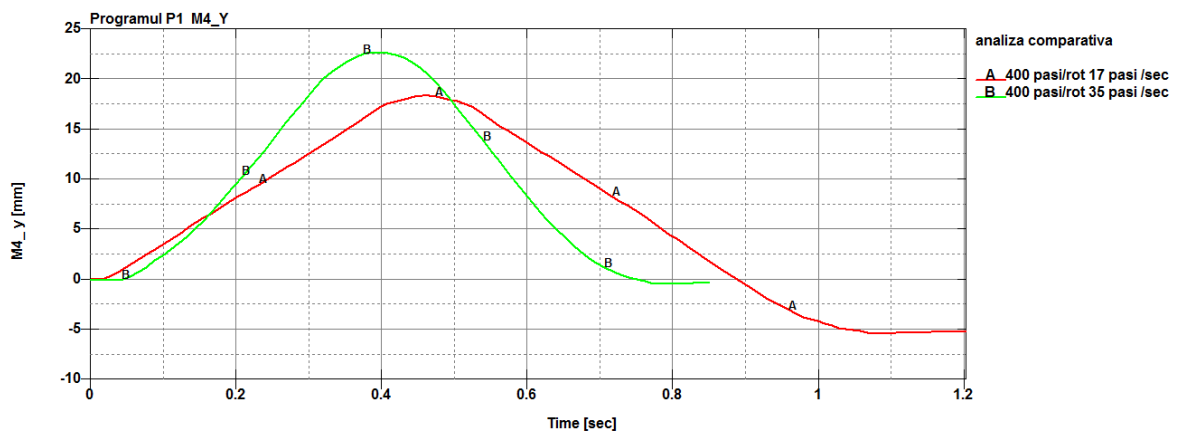
➤ pentru varianta de micropășire de 400 pași/rotație aferente programului P1 în figurile 6.155 ... 6.157, programului P2 în figurile 6.158 ... 6.160, programului P3 în figurile 6.161 ... 6.163,

➤ pentru varianta de micropășire de 1600 pași/rotație aferente programului P1 în figurile 6.164 ... 6.166, programului P3 în figurile 6.167 ... 6.169.

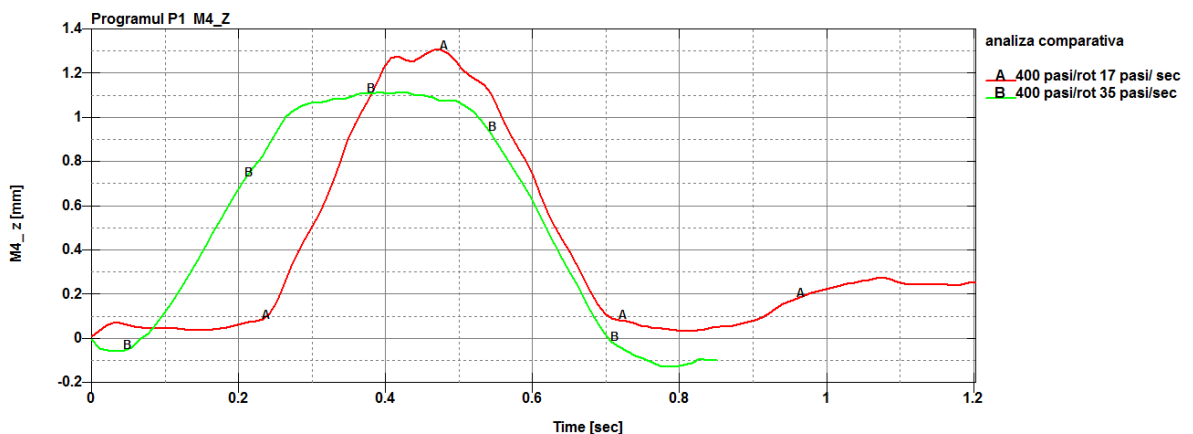
**Varianta 400 pași/rot - Programul P1**



**Fig. 6.155 Variația deplasării după axa X, pentru două viteze motoare**



**Fig. 6.156 Variația deplasării după axa Y, pentru două viteze motoare**



**Fig. 6.157 Variația deplasării după axa Z, pentru două viteze motoare**

Programul P2

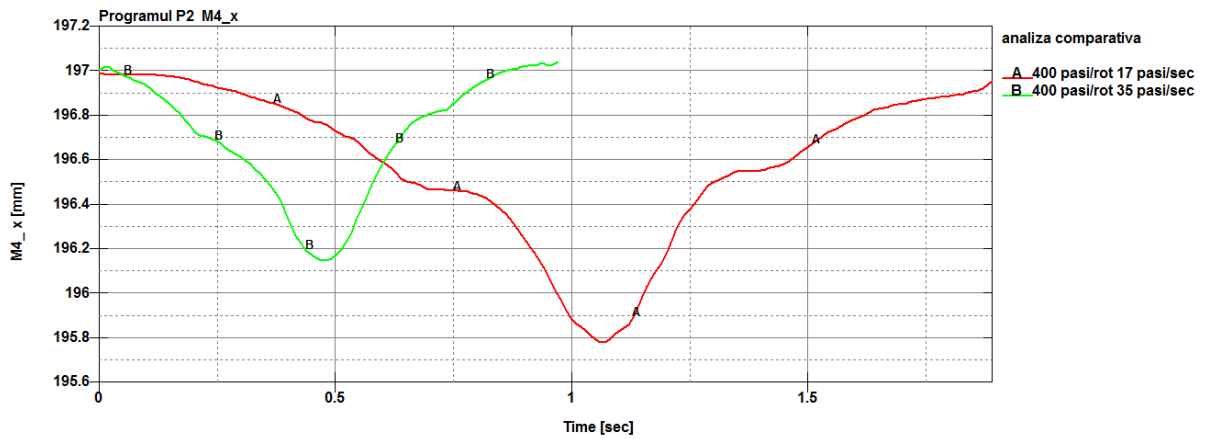


Fig. 6.158 Variația deplasării după axa X, pentru două viteze motoare

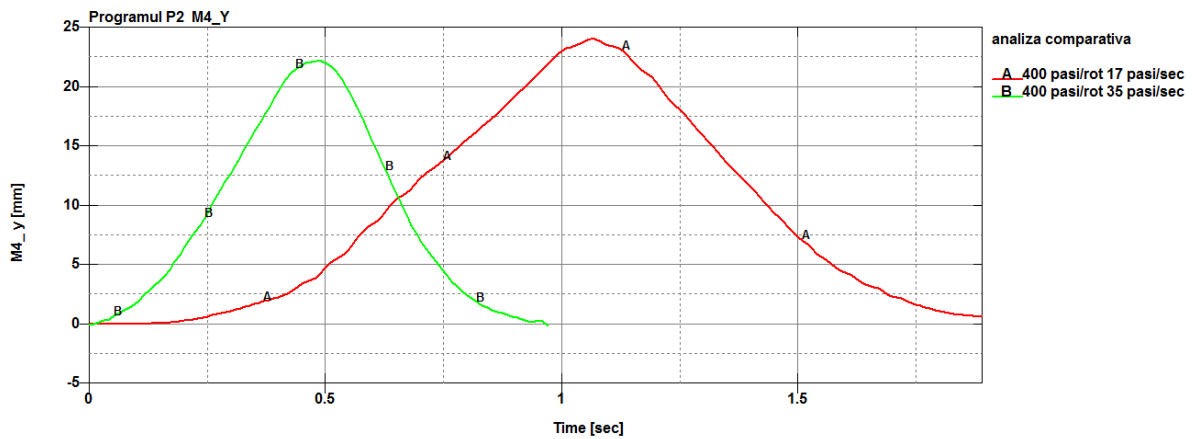


Fig. 6.159 Variația deplasării după axa Y, pentru două viteze motoare

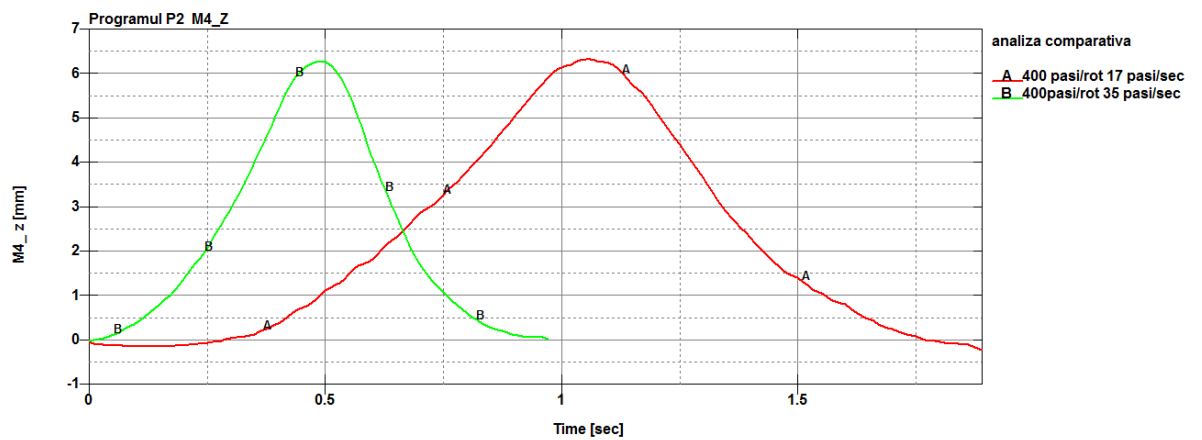


Fig. 6.160 Variația deplasării după axa Z, pentru două viteze motoare

Programul P3

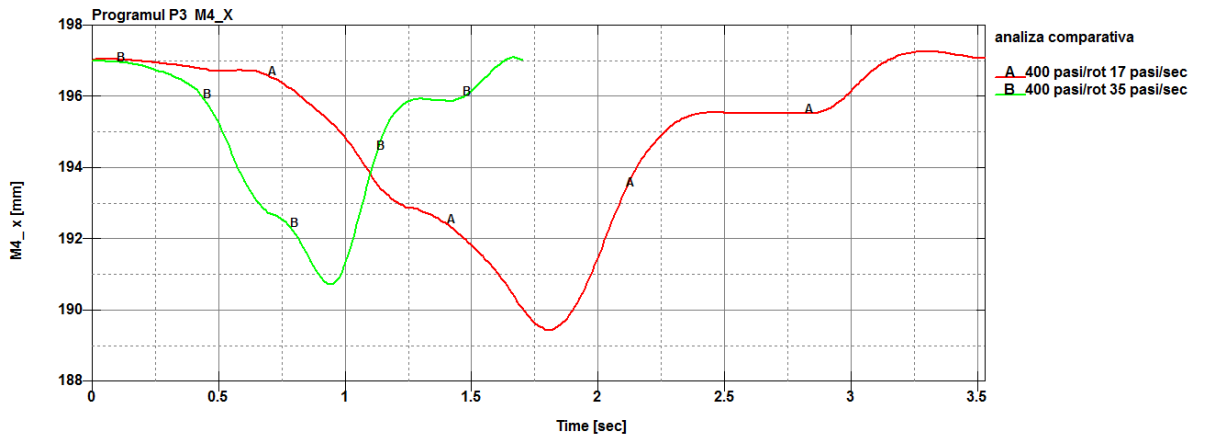


Fig. 6.161 Variația deplasării după axa X, pentru două viteze motoare

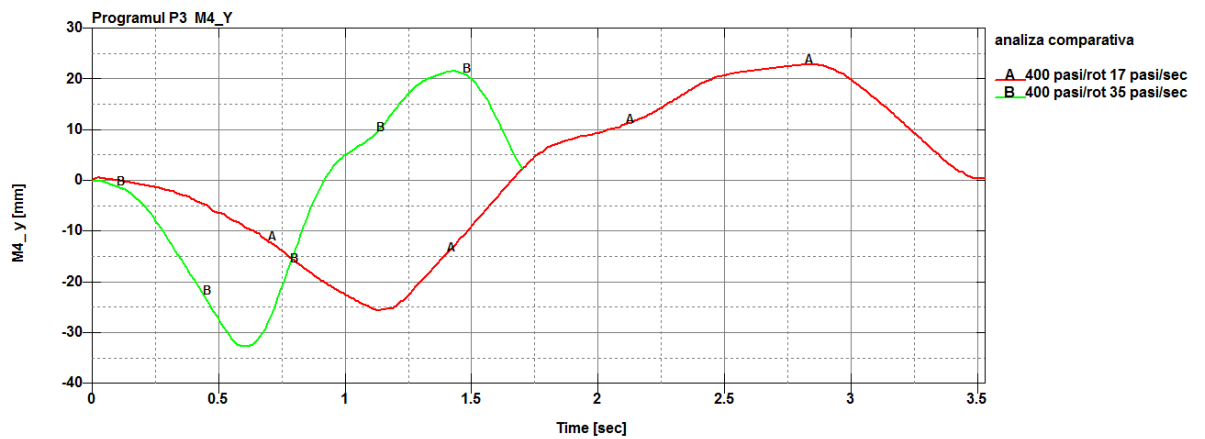


Fig. 6.162 Variația deplasării după axa Y, pentru două viteze motoare

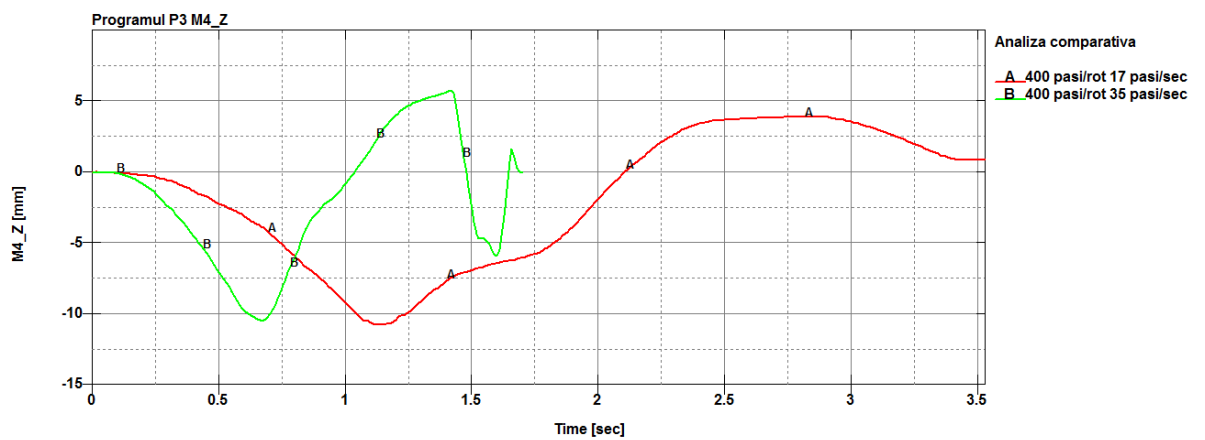


Fig. 6.163 Variația deplasării după axa Z, pentru două viteze motoare

Varianta 1600 pasi/rot  
Programul P1

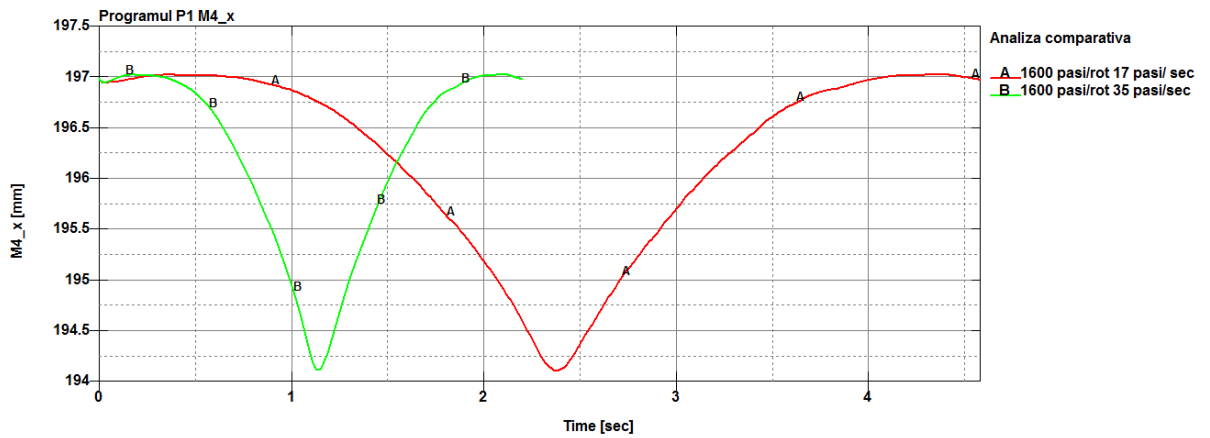


Fig. 6.164 Variația deplasării după axa X, pentru două viteze motoare

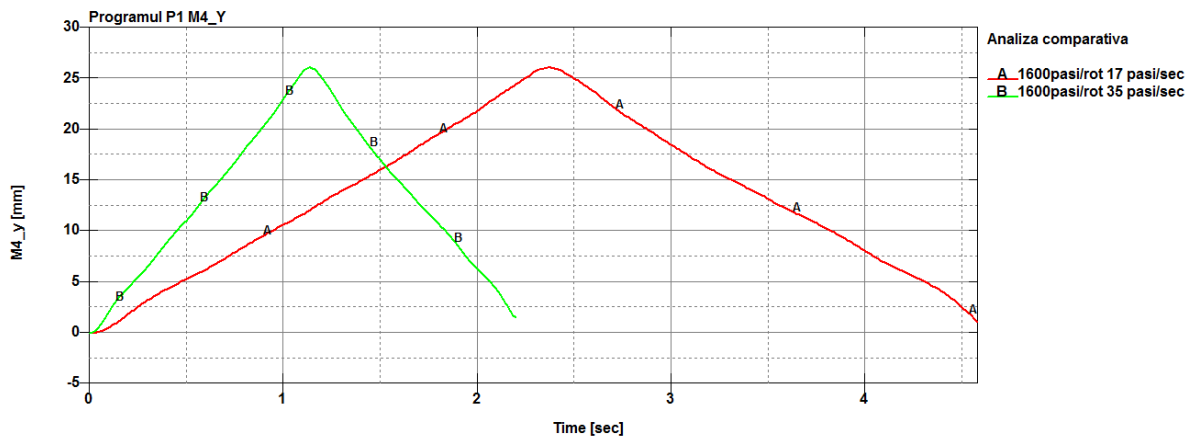


Fig. 6.165 Variația deplasării după axa Y, pentru două viteze motoare

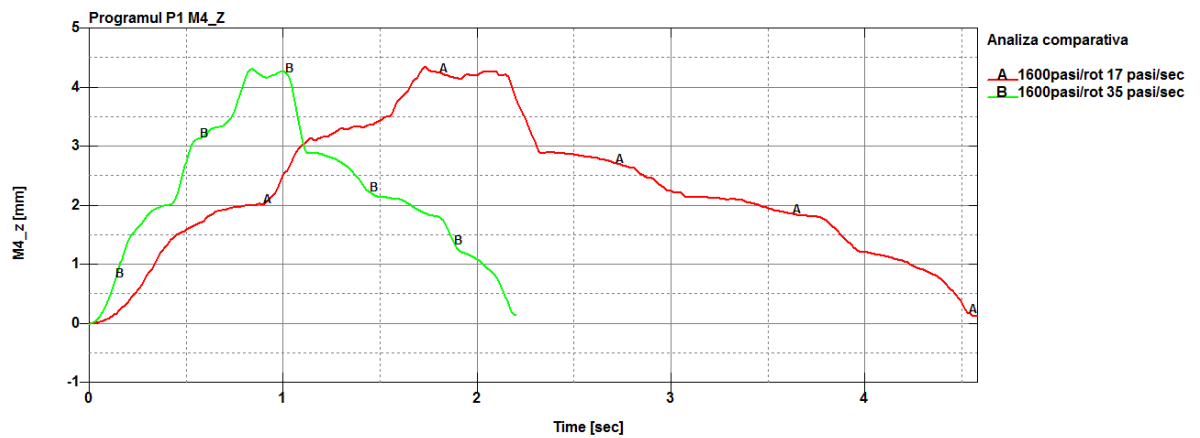


Fig. 6.166 Variația deplasării după axa Z, pentru două viteze motoare

Programul P3

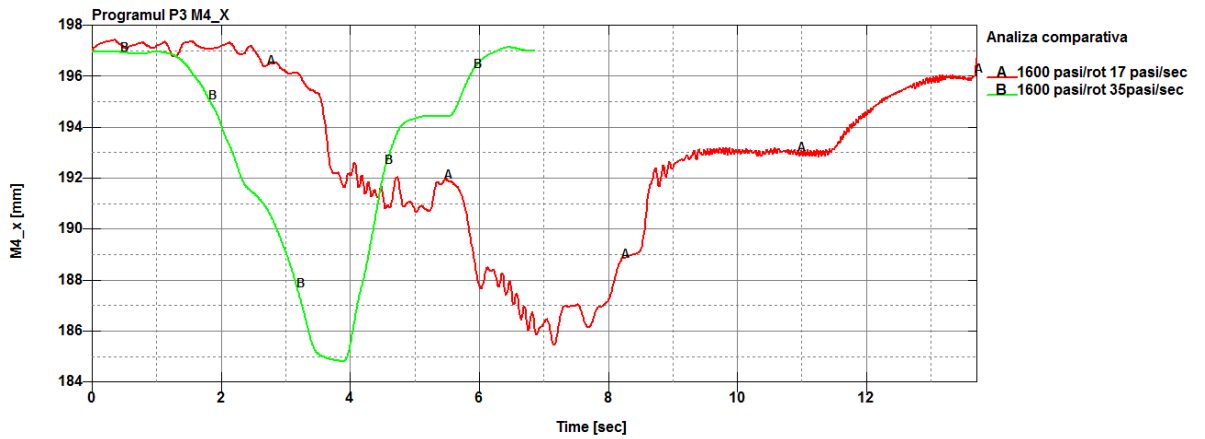


Fig. 6.167 Variația deplasării după axa X, pentru două viteze motoare

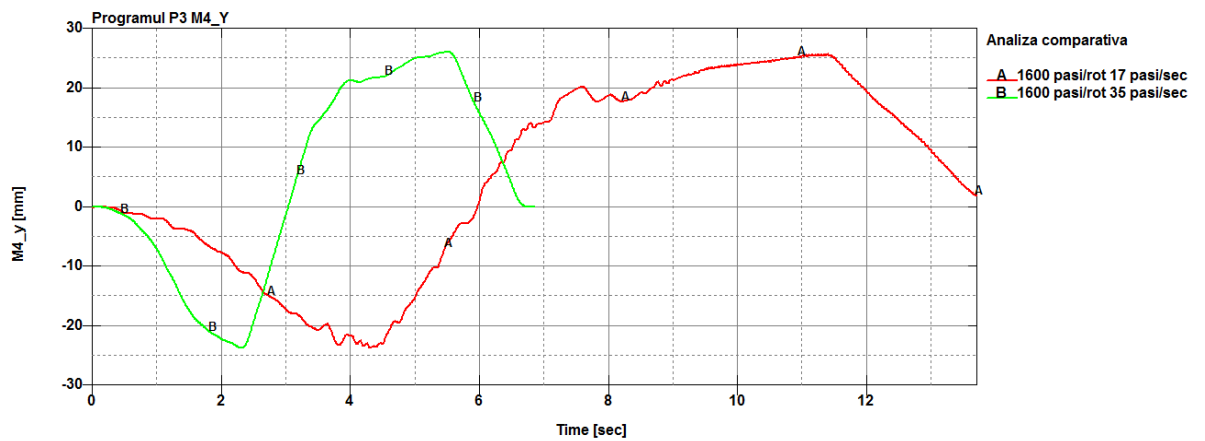


Fig. 6.168 Variația deplasării după axa Y, pentru două viteze motoare

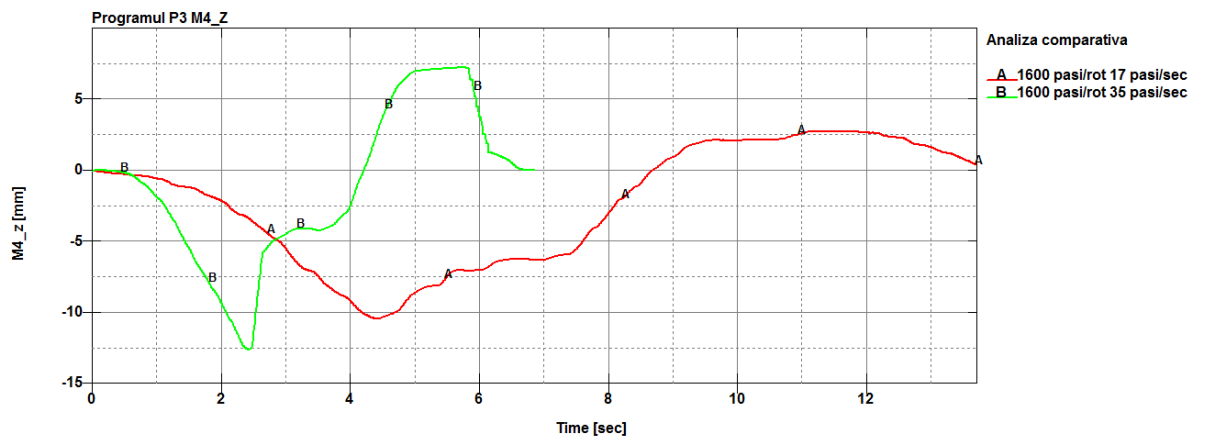
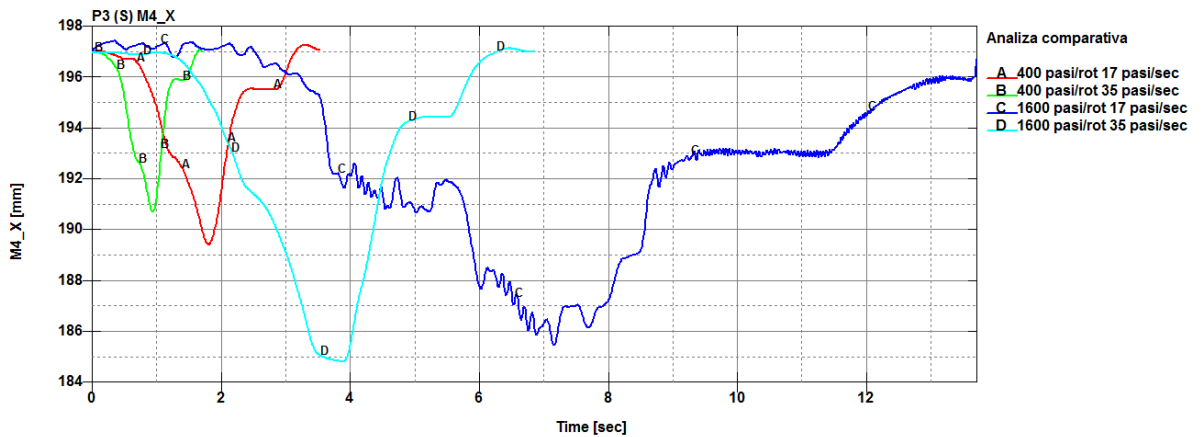


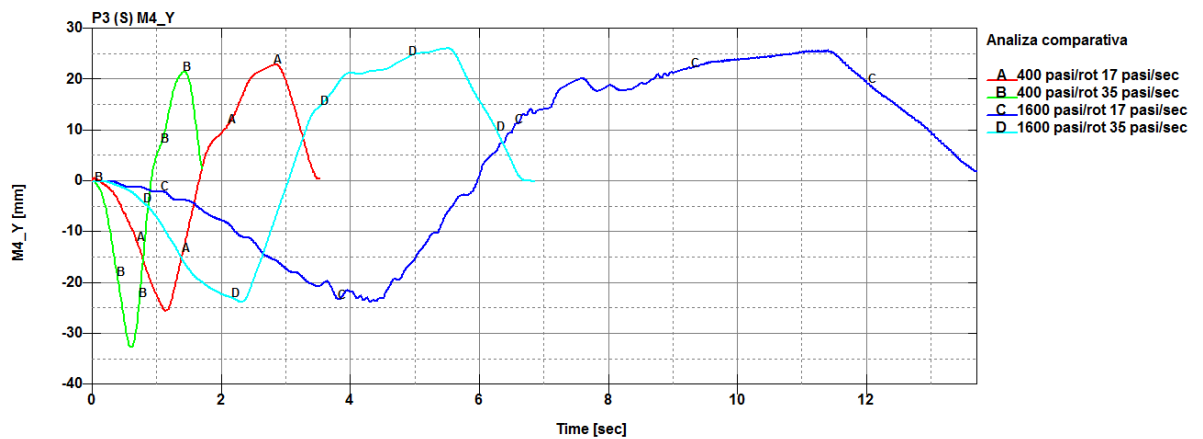
Fig. 6.169 Variația deplasării după axa Z, pentru două viteze motoare

De asemenea, a fost realizată o analiză comparativă a diagramelor de variație, după cele trei axe, pentru toate protocoalele de testare, figurile 6.170, 6.171, 6.172.

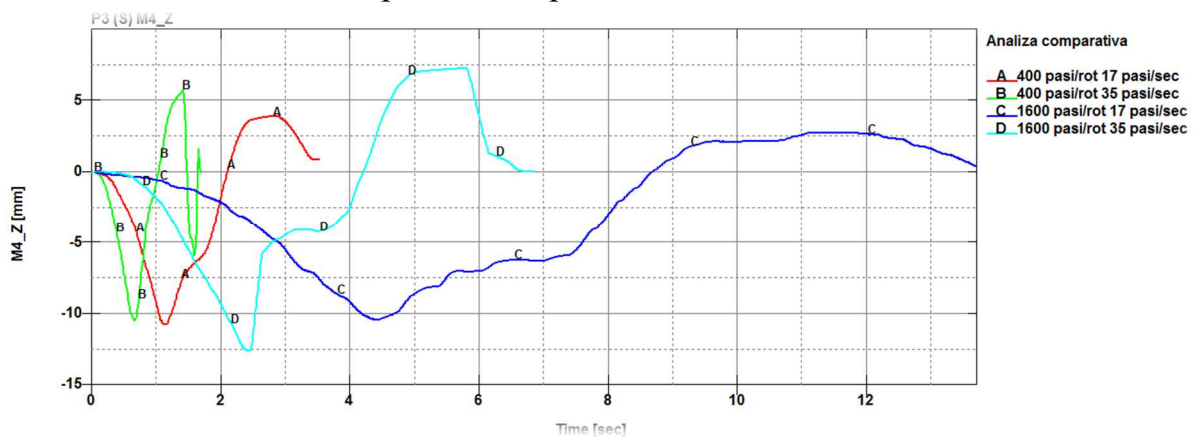




**Fig. 6.170** Analiza comparativă a diagramelor de variație, după axa X, pentru toate protocoalele de testare



**Fig. 6.171** Analiza comparativă a diagramelor de variație, după axa Y, pentru toate protocoalele de testare



**Fig. 6.172** Analiza comparativă a diagramelor de variație, după axa Z, pentru toate protocoalele de testare

Această analiză a scos în evidență date suplimentare privind comportamentul unității flexibile în diferite condiții de lucru:

- vertebra de capăt a unității flexibile urmează aceeași traiectorie;
- caracterul compact al mișcării;

- sensibilitate și acuratețe ridicată la schimbările de sens;
- atingerea aceluiași punct al poziției finale;
- folosirea variantei de micropășire cu un număr mare de pași/rotație oferă unității flexibile o mișcare mult mai uniformă, atingerea mai multor puncte din spațiul de lucru, deci o precizie ridicată, chiar dacă crește durata mișcării;
- simetria mișcării înregistrată pe fiecare axă demonstrează stabilitatea unității flexibile.

În concluzie, se constată că în unele grafice apar fluctuații ale traiectoriei markerilor studiați, care pot avea mai multe cauze:

- Modul de funcționare al motoarelor pas cu pas;
- Erori de măsurare date de modul de înregistrare al camerelor video (captarea imaginii prin număr de cadre/secundă);
- Eventuale mișcări relative ale markerilor față de vertebre sau față de tije de acționare (markerii M6 și M7);
- Existența unei mișcări cu frecare cu alunecare între vertebre, care este mai pronunțată cu cât forțele de pretensionare sunt mai mari.

Din analiza rezultatelor obținute, se constată că mișcarea unității flexibile este continuă, vertebra de capăt pleacă din poziția de echilibru și ajunge la terminarea ciclului în aceeași poziție, fapt care arată că soluția folosită satisface criteriile de stabilitate și repetabilitate.

Datorită faptului că fluctuațiile au valori foarte mici (de ordinul zecimilor de milimetru uneori chiar și mai mici) și se manifestă pe perioade foarte mici de timp (de ordinul zecimilor sau sutimilor de secundă), ne face să credem că soluția propusă pentru unitatea flexibilă atinge obiectivele pentru care a fost proiectată.

#### ***Contribuții originale:***

1. Realizarea unei baze de date cu cercetări teoretice și experimentale privind concepția și implementarea unui sistem mecanic flexibil cu aplicații în medicină;
2. Concepția și prototiparea virtuală a modelelor 3D pentru un număr de 16 variante de unități flexibile, variante originale;
3. Elaborarea criteriilor de ordin structural, cinematic și dinamic care au stat la baza alegerii variantei optime a unității flexibile;
4. Testarea și încercarea variantei propuse prin simulări numerice, care au stat la baza prototipării virtuale cu programul Adams și identificarea metodei optime sub aspect constructiv și funcțional de prototipare rapidă a variantelor rezultate din sinteză;
5. Analiza modal dinamică a sistemului robotic cu programul Adams;
6. Prototiparea virtuală cu programul Ansys, cu identificarea modelelor dinamice pentru contactul dintre două solide deformabile, cu metoda elementului finit, și identificarea legilor de variație ale parametrilor cinematici și dinamici, inclusiv tensiuni și deformații, pe intervale de timp compatibile cu protocoalele stabilite pentru testarea și încercarea experimentală a sistemului robotic;
7. Modelele cinematice și dinamice realizate cu Adams și Ansys sunt concepute în regim parametrizat cu posibilitatea optimizării cinematice sau dinamice a întregii structuri;
8. Elaborarea modelelor matematice pentru studiul cinematic al sistemului robotic cu considerarea contactului dintre vertebre și a particularităților sistemului de acționare al acestora;

9. Elaborarea unui program sub mediul de programare Maple cu un caracter flexibil, ușor de extrapolat pentru mai multe componente ale unității flexibile, care permite rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare, ce definesc configurația cinematică a unității flexibile;
10. S-a proiectat o interfață între procesarea modelelor matematice, prototiparea virtuală complexă cu programul Adams și cercetarea experimentală care a permis realizarea unor analize comparative a rezultatelor obținute prin procesarea modelelor matematice și cercetarea experimentală, respectiv modelarea matematică și analiza numerică cu programul Adams;
11. Concepția și proiectarea într-o variantă absolut originală a soluției constructive adoptată pentru unitatea flexibilă a sistemului robotic;
12. Concepția și proiectarea sistemului de acționare și a sistemului de comandă și control;
13. Elaborarea softului pentru comanda și controlul întregului ansamblu;
14. Elaborarea unei metodologii având la bază sistemul de analiză ultra-rapidă a imaginii (Contemplas);
15. Concepția și elaborarea protocoalelor de încercare și testare experimentală a sistemului robotic;
16. Concepția și execuția în variantă originală, cu elaborarea de programe în comandă numerică a elementelor componente pentru cele două părți distincte ale sistemului robotic, respectiv unitatea flexibilă și sistemul de acționare, comandă și control;
17. Elaborarea unei metodologii experimentale pentru etalonarea și testarea sistemului elastic de pretensionare;
18. Analiza și sinteza rezultatelor experimentale;
19. Realizarea de analize comparative pe modelul matematic, virtual și experimental.

Cercetările ulterioare se pot orienta pentru dezvoltarea de soluții în scopul optimizării răspunsului cinematic sau dinamic al unității flexibile, astfel:

- Folosirea unui material pentru vertebrele unității flexibile care să prevină alunecarea.
- Un sistem de acționare al tijelor care să ofere posibilitatea controlului tensiunii din tije.
- Concepția unui sistem de control al tensiunii din tije.
- Sistem de ghidare al vârfului unității flexibile (senzori magnetici) coroborat cu un sistem de control al motoarelor de acționare.
- Folosirea altui tip de actuatoare.
- Realizarea unui mecanism de acționare a tijelor care să dea posibilitatea reducerii numărului de actuatoare.
- Reducerea frecării dintre tije și alezajele de trecere din vertebre, fie mecanic (constructiv), fie prin folosirea unor materiale cu coeficient de frecare redus.
- Folosirea unor sisteme electronice avansate pentru controlul deplasărilor (înregistrator de deplasare pe mai multe axe).

## ***Bibliografie***

24. Craig R.R. and Bampton, M.C.C., “*Coupling of Substructures for Dynamics Analyses*”, AIAA Journal, 6(7):1313–1319, 1968.
25. Degani A., Choset H., Wolf A., Ota T., Zenati M.A., “*Percutaneous Intrapericardial Interventions using a Highly Articulated Robotic Probe*”, Proceedings of First IEEE/EBIB International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob’06), 2006, pp. 7-12.
27. Dong X., Axinte D., Palmer D., Cobos S., Raffles M., Rabani A., Kell J. , “*Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines*”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing ,Volume 44, April 2017, p. 218-229.
39. Dupont P., Lock J., Itkowitz B. and Butler E., “*Design and control of concentric tube robots*” IEEE Transactions Robotics, vol. 26(2), pp. 209-225, 2010.
70. Kim Y.J., Cheng S., Kim S. and Iagnemma K., “*A Stiffness-Adjustable Hyperredundant Manipulator Using a Variable Neutral-Line Mechanism for Minimally Invasive Surgery*” , IEEE Transactions on Robotics, vol. 30, no. 2, April 2014.
78. Mahvash M. and Zenati M., “*Toward a Hybrid Snake Robot for Single-Port Surgery*”, 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS Boston, Massachusetts USA, August 30 - September 3, 2011.
105. Tappe S., Kotlarski J., Ortmaier T., D’orbaum M., Mertens A., Ponick B., “*The Kinematic Synthesis of a Spatial, Hyper-Redundant System based on Binary Electromagnetic Actuators*” International Conference on Automation, Robotics and Applications, Queenstown, New Zealand, Feb 17-19, 2015.
112. Webster R. J., Okamura A.M. and Cowan N.J., “*Toward Active Cannulas: Miniature Snake-Like Surgical Robots*”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, October 9 - 15, 2006.
116. Xu K., Goldman R.E., Ding J., Allen P.K., Fowler D. L. and Simaan N., “*System Design of an Insertable Robotic Effector Platform for Single Port Access (SPA) Surgery*”, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems St. Louis, USA, oct. 11-15, 2009.
118. Yip M. C. and Camarillo D. B., “*Model-less hybrid position/control: A minimalist approach for continuum manipulators in unknown, constrained environments*” , IEEE Robot. Autom. Lett. (2016) 1–8, Jan 2016.
119. Yip M.C., Sganga J.A., Camarillo D.B., “*Autonomous Control of Continuum Robot Manipulators for Complex Cardiac Ablation Tasks* “, Journal of Medical Robotics Research, Vol. 2, No. 1 1750002 (13 pages), 2017.
123. <https://simcompanion.mscsoftware.com>
124. [http://ecourses.ou.edu/fem/manuals/Workbench\\_Users\\_Guide.pdf](http://ecourses.ou.edu/fem/manuals/Workbench_Users_Guide.pdf)
126. <http://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r9.0-vol-i>
127. <http://print3dcad.ro/tehnologii-print-3d/cjp-3d-systems/>
128. <http://print3dcad.ro/tehnologii-print-3d/dmp-3d-systems/>
129. <http://print3dcad.ro/tehnologii-print-3d/mjp-3d-systems/>
132. <http://ro.axiomet.eu/product/axiomet/tahometru/ax-2901>

133. <http://suncormotor.com/content/?380.html>
134. <http://tera-term.en.lo4d.com/>
137. <http://www.qreferat.com/referate/mecanica/Prototiparea-rapida645.php>
139. <http://www.stratasys.com/>
140. [https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene)
143. <https://www.3dhubs.com/3d-printers/wanhao-duplicator-4>
144. <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
145. <https://www.contemplas.com/>
147. <https://www.optimusdigital.ro/ro/filamente-abs/3894-filament-pentru-imprimanta-3d-175-mm-abs-1-kg-albastru.html>
149. [http://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_EN.pdf](http://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_EN.pdf)
151. [www.tehnoelectric.ro](http://www.tehnoelectric.ro)
152. <https://support.makerbot.com/.../makerbot...software/softwar...>