



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE

UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI” DIN BACĂU

Calea Mărășești, Nr. 157, Bacău 600115
Tel. +40-234-542411, tel./fax +40-234-545753
www.ub.ro; e-mail: rector@ub.ro



Ing. Cătălina BOLOG (CIOFU)

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Coordonator științific,
Prof.univ.dr.ing. Gheorghe STAN



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE

UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI” DIN BACĂU

Calea Mărășești, Nr. 157, Bacău 600115
Tel. +40-234-542411, tel./fax +40-234-545753
www.ub.ro; e-mail: rector@ub.ro



Ing. Cătălina BOLOG (CIOFU)

**CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA
PARAMETRIILOR CONSTRUCTIVI ȘI
FUNCȚIONALI AI BRAȚELOR ROBOTICE TIP
*TROMPĂ DE ELEFANT***

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Coordonator științific,
Prof.univ.dr.ing. Gheorghe STAN

PREFAȚĂ

Brațele robotice cu structura asemănătoare trompei de elefant prezintă o preocupare tot mai intensă a inginerilor proiectanți pentru utilizarea acestora în aplicații din domeniul industriei, dar și cel medical, datorită posibilității de poziționare spațială, flexibilă și de precizie în interiorul foarte îngust al diferitor corpuri și/sau al organismului uman. Studiul științific privind îmbunătățirea parametrilor constrictivi și funcționali de la brațele robotice tip „trompă de elefant” s-a concretizat prin prezenta teză de doctorat în urma realizării cercetărilor teoretice și experimentale pe o structură nouă de braț robotic care face subiectul tezei.

Am onoarea să adresez sincere mulțumiri tuturor celor care m-au susținut, sprijinit și încurajat în timpul realizării cercetărilor științifice.

Domnului **Prof.univ.dr.ing. Gheorghe STAN**, în calitate de conducător științific, sunt onorată să-i aduc mulțumiri pentru încrederea, toleranța și mai ales pentru expertiza tehnică și rigoarea științifică, acordate în mod părintesc în toată această perioadă. Sunt profund recunoscătoare, de asemenea, pentru oportunitatea de perfecționare profesională, pentru răbdarea, sugestiile și observațiile critice acordate neobosit în scopul finalizării prezentei teze.

Mulțumiri deosebite adresez domnilor referenți științifici pentru observațiile și sugestiile competente acordate. În egală măsură, mulțumesc pentru sprijinul și sugestiile acordate domnului **Conf.univ.dr.ing. Bogdan – Alexandru CHIRIȚĂ** și tuturor membrilor Departamentului **Inginerie și Management, Mecatronică** din cadrul Facultății de Inginerie, Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău. Le mulțumesc colegilor care m-au sprijinit și alături de care am colaborat cu plăcere pe parcursul anilor de studiu: **ing. Paul-Alin BUTUNOI, ing. Andrei LUNCANU, ing. Ana-Lăcrămioara UNGUREANU (CHIRILĂ)**.

Îi mulțumesc soțului meu **ing. Andrian CIOFU** pentru susținere și ajutorul acordat cu inimă deschisă în orice împrejurare. Sunt recunoscătoare întregii familii pentru înțelegerea, sprijinul și susținerea, acordate necondiționat în toată perioada de studiu și cercetare în vederea elaborării prezentei teze.

Autor,

Ing. Cătălina BOLOG (CIOFU)

Cuprins

1. Stadiul actual al realizărilor și cercetărilor privind brațele robotice tip „trompă de elefant”	4/4
1.1. Introducere.....	4/4
1.2. Domenii de utilizare.....	5/5
1.3. Structura brațelor robotice tip „trompă de elefant”.....	6/5
1.4. Spațiul de lucru.....	8/6
1.5. Cercetări privind caracteristicile și particularitățile roboților tip „trompă de elefant” cu raportul mare între lungimea și diametrul brațului.....	9/7
1.6. Cercetări privind soluții constructive de brațele robotice tip „trompă de elefant” adoptate pe plan mondial până în prezent.....	12/9
1.6.1. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu structură robustă.....	12/9
1.6.2. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin roți dințate.....	14/9
1.6.3. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin fire/cabluri dispuse în exteriorul structurii.....	16/10
1.6.4. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin fire/cabluri dispuse în interiorul structurii.....	24/12
1.6.5. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin comprimarea unor resorturi.....	29/13
1.6.6. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin mușchii pneumatici.....	30/14
1.7. Cercetări privind metodele de analiză a cinematicii și dinamicii brațelor robotice tip „trompă de elefant”.....	33/15
1.7.1. Cercetări privind metodele de analiză cinematică a brațelor robotice tip „trompă de elefant”.....	34/15
1.7.2. Cercetări privind analiza dinamică a brațului robotic acționat prin fire.....	39/17
1.8. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor privind structura brațelor robotice tip „trompă de elefant”.....	41/18
1.8.1. Concluzii privind structura și clasificarea prin prisma soluțiilor constructive.....	41/18
1.8.2. Aprecieri critice privind soluțiile constructive adoptate până în prezent.....	43/19
1.8.3. Obiective propuse în vederea întocmirii tezei de doctorat.....	43/20

2. Cercetări teoretice privind determinarea influenței variației parametrilor geometrici asupra preciziei de poziționare.....	44/21
2.1. Analiza pozițională a brațului robotic tip „trompă de elefant”	45/21
2.1.1. Modelul geometric direct al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 8 grade de mobilitate.....	45/22
2.1.2. Modelul geometric direct al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate.....	48/23
2.2. Modelul geometric invers al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate.....	51/24
2.3. Cercetări privind determinarea influenței abaterilor liniare asupra preciziei de poziționare într-un punct la brațul robotic tip „trompă de elefant”	55/25
2.4. Cercetări privind determinarea spațiului de lucru al brațului robotic cu 6 grade de mobilitate.....	62/27
3. Cercetări privind îmbunătățirea preciziei de poziționare la brațele robotice tip „trompă de elefant”	67/29
3.1. Cercetări privind structura acționării și transmisiei axelor controlate la articulațiile tip cuplă cinematică de clasă a V-a.....	67/29
3.2. Cercetări privind variația în lungime a firelor folosite la acționarea cuplelor brațului robotic tip „trompă de elefant”	69/30
3.2.1. Determinarea variației lungimii firelor de acționare a articulației 2.....	70/ -
3.2.2. Determinarea variației lungimii firelor de acționare a articulației 3.....	72/ -
3.2.3. Determinarea variației lungimii firelor de acționare a articulației 4.....	73/ -
3.2.4. Determinarea variației lungimii firelor de acționare a articulației 5.....	76/ -
3.2.5. Concluzii privind deformațiile lungimii firelor de acționare ca urmare a înfășurării-desfășurării pe suprafețele circulare dinamice.....	79/31
3.3. Cercetări privind influența deformației elastice a firelor asupra preciziei de poziționare a cuplelor brațului robotic tip „trompă de elefant”	80/32
3.4. Cercetări privind influența deformațiilor elastice cumulate ale firelor asupra preciziei de poziționare.....	84/34
3.5. Determinarea influenței frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare.....	90/37
3.6. Măsuri de reducere a deformațiilor firelor de acționare a cuplelor.....	92/38
4. Standul de încercări experimentale și lanțurile de măsură și achiziție date.....	98/42
4.1. Standul de încercări experimentale.....	99/43
4.2. Prezentarea structurii brațului robotic tip „trompă de elefant”	102/46
4.3. Aparatura de măsură folosită.....	103/ -

4.4. Cerințe normative privind măsurarea preciziei de poziționare și repetabilității la roboții industriali.....	103/47
4.4.1. Stabilirea preciziei de poziționare bidirecțională.....	104/47
4.4.2. Raportul de încercări.....	105/49
4.4.2.1. Influența abaterilor dimensionale ale elementelor structurale asupra preciziei de poziționare.....	107/ -
4.4.2.2. Influența pretensionării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare.....	107/ -
4.4.2.3. Determinarea deformației elastice a firului în urma pretensionării...	107/ -
4.4.2.4. Determinarea experimentală a diagramelor forță-deformație pentru fiecare din firele de acționare.....	108/ -
5. Rezultatele încercărilor experimentale la determinarea preciziei de poziționare de la brațul robotic tip „trompă de elefant”.....	113/51
5.1. Rezultatele încercărilor experimentale privind determinarea influenței frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare.....	113/51
5.1.1. Determinarea preciziei de poziționare în cazul deplasării bidirecționale a organului terminal între patru puncte de pe traiectoria paralelă cu axa X.....	113/51
5.1.2. Determinarea preciziei de poziționare în cazul deplasării bidirecționale a organului terminal între patru puncte de pe o traiectorie paralelă cu axa Y.....	119/55
5.2. Rezultatele încercărilor experimentale privind determinarea influenței abaterilor dimensionale ale elementelor structurale asupra preciziei de poziționare.....	126/59
5.3. Rezultatele încercărilor experimentale privind determinarea influenței forței de pretensionare din fire asupra preciziei de poziționare.....	134/61
5.4. Concluzii finale ale încercărilor experimentale.....	145/64
6. Concluzii finale, recomandări și contribuții originale.....	146/66
6.1. Concluzii finale și recomandări.....	146/66
6.2. Contribuții originale.....	149/69
6.3. Direcții viitoare de cercetare.....	150/70
Referințe bibliografice.....	151/71

1. Stadiul actual al realizărilor și cercetărilor privind brațele robotice tip „trompă de elefant”

1.1. Introducere

Mecatronica modernă implică prelucrarea informației în procesul tehnologic. Scopul practic al introducerii roboților în procesele industriale este de a înlocui acele tipuri de acțiuni care pentru om sunt dificile, necesită manipularea unor sarcini mari, sunt monotone (repetitive), și/sau periculoase pentru sănătate și viață. Roboții industriali au fost gândiți, în primul rând, pentru efectuarea operațiilor de producție auxiliare (încărcarea și descărcarea mașinilor unelte și a automatelor) și a operațiilor de prelucrare propriu-zisă (sudură, vopsire, debitare, montaj etc.) [10, 40, 123].

În general, roboții industriali sunt construcții care au un număr mic de elemente mecanice legate în serie sau în paralel și care sunt puse în mișcare autonomă pentru a îndeplini diverse sarcini repetitive precum: deplasarea obiectului manipulat în spațiul de lucru; modificarea orientării obiectului manipulat; apucarea și eliberarea obiectului manipulat [35, 76, 100, 102]. S-a constatat că roboții industriali a căror structură este realizată în serie sunt foarte eficienți în efectuarea acestor sarcini, însă prezintă câteva hibe privind manevrabilitatea sau numărul de grade de mobilitate [1, 47, 113] precum și erori de poziționare pentru care s-au dezvoltat diferite metode de calibrare [98, 99, 125], fiind fiabili datorită repetabilității foarte bune dar nu și a preciziei de poziționare. Roboții cu structură redundantă, analogică în funcționare cu mișcarea brațului uman, trompei de elefant, tentaculelor de caracatiță [15, 126], coloanei vertebrale [50], șerpilor [32, 59, 63, 91, 117], viermilor [86], diverselor larve, până la organisme unicelulare, prezintă o mobilitate foarte mare, posibilitate chiar infinită de grade de mobilitate [43, 56, 84]. Printre dezavantajele majore ale structurilor de acest tip realizate până în prezent se numără: spațiul de lucru limitat, deoarece acționarea articulațiilor se face succesiv, și imposibilitatea miniaturizării structurii datorită amplasării cablurilor/firelor de acționare pe exterior.

Brațele robotice poliarticulate comerciale sunt variate, majoritatea fiind în 6 axe. Cuplele acestor brațe sunt toate de rotație. A doua și a treia axă sunt paralele, funcționând împreună pentru producerea mișcării în planul vertical. Prima axă de rotație este a cuplei cinematice de la baza robotului care îl rotește ocupând un volum mare al spațiului de lucru. Nevoia îmbunătățirii specificațiilor tehnice ale brațelor robotice precum: spațiul de lucru, repetabilitatea și sarcina utilă, toate împreună au motivat rafinarea și remodelarea acestora de decenii [17, 46, 67, 82, 84, 88].

Conform [36] realizarea robotilor industriali în perioada anilor 1960 a fost posibilă datorită dezvoltării, din anii precedenți, a sistemelor mecatronice, automatizarea mașinilor unelte prin intermediul comenzii numerice și automatizarea calculelor datorită calculatoarelor electronice. Rezolvarea problemelor legate de manipularea materialelor, cum ar fi a celor radioactive - extrem de nocive organismelor vii, a fost posibilă cu ajutorul mecanismelor articulate.

În țara noastră, robotica este în curs de dezvoltare înregistrând o intensă activitate de cercetare. Conform unei situații statistice a SRR (Societatea de Robotică din România) [127], realizată în 2008, numărul de roboți industriali existenți la noi în țară era de 960. Cei mai mulți dintre aceștia fiind de la firma ABB și sunt folosiți pentru instruire și manipulare, cercetare și educare de mai multe universități din țară, precum și în producție, polizare, paletizare, pulverizare cu plasmă, de firme ca: Brandl Ro Sibiu, Ter Cua Brăila, A.C. Internațional Mioveni, Renault Dacia Mioveni, Comelf Terra SA Bistrița, Ipec SA Alba Iulia, U.M.D. Prahova, Vimercati East Europe SRL Bacău, Tecnostamp Triulzi East Europe SRL Bacău, ș.a.

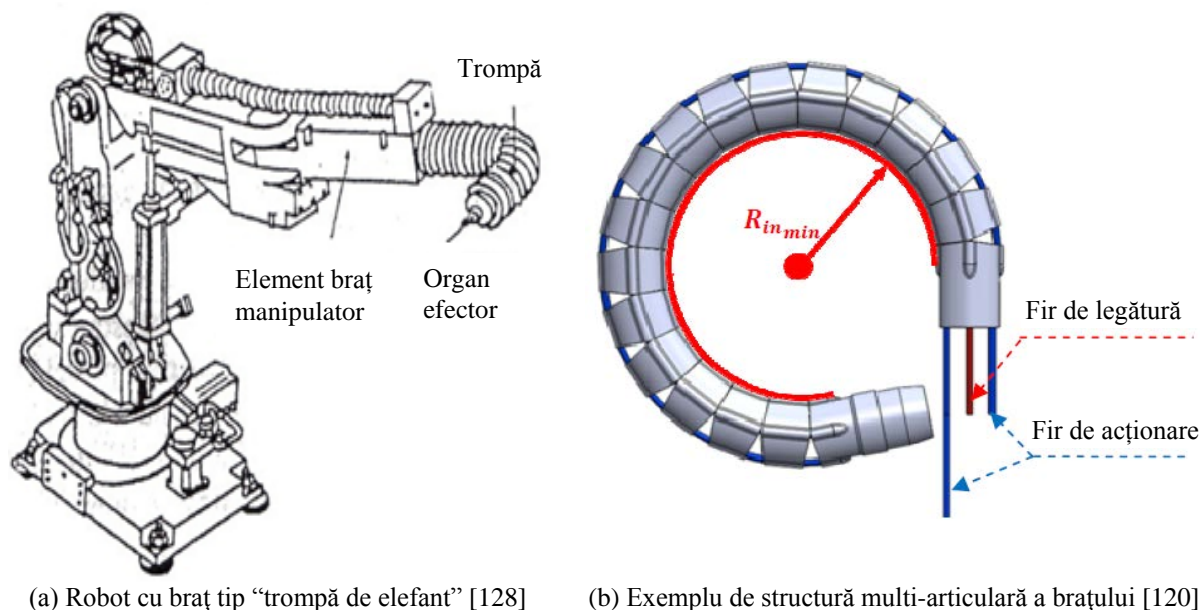
1.2. Domenii de utilizare

Brațele robotice tip „trompă de elefant” cu posibilitatea de poziționare spațială sunt folosite din ce în ce mai mult în intervențiile chirurgicale, și în industrii unde sunt necesare executarea unor traiectorii complexe. Brațele robotice cu un raport ridicat dintre lungimea și diametrul brațului sunt folosiți cu precădere în domeniul medical unde este foarte importantă obținerea unor incizii minime și invazive cu precizie ridicată [29, 42].

Brațele robotice tip „trompă de elefant” a căror cuple cinematice sunt acționate prin intermediul sistemelor de transmisie cu cabluri/fire pot fi folosite în diferite domenii și pentru o varietate de operații precum: a) manipularea unor sarcini grele, inclusiv descărcarea mărfurilor de pe o navă și încărcarea lor pentru transport; b) manipulare de mare viteză; c) mentenanța aeronavelor și inspecția la scară largă, intervenții în spații înguste precum endoscopul PENTAX ES-3801 [66]; d) sisteme de poziționare și măsurare în tunelurile aerodinamice sau în interiorul unor tuburi industriale [105]; e) pentru intervenții chirurgicale și proceduri medicale realizate de micro-roboti [39] sau cei dezvoltați pentru chirurgia sinusurilor, a ligamentelor sau a laringelor [111]; f) metrologie; g) realizarea unor operații specifice precum sudură, vopsire, în funcție de capacitatea de încărcare a brațului; h) reabilitare [25, 44] precum roboții NeReBot și MariBot folosiți pentru recuperare motrică [109]; i) radio-telescoape de dimensiuni mari; j) sport și divertisment; k) servicii de urgență și de salvare în caz de cutremure, pentru diferite operații necesare la salvarea victimelor aflate sub dărâmături precum Robotul „Active Hose II” [64, 110]; l) zugrăvirea și întreținerea construcțiilor; m) brațe robotice folosite la mașini de prelucrat prin electroeroziune permițând realizarea unor alezaje cu axe curbilini de diametre și adâncimi mari precum cel realizat de cercetătorul japonez Tohru Ishida [54].

1.3. Structura brațelor robotice tip „trompă de elefant”

Brațul robotic tip „trompă de elefant”, fig.1.1. (a), realizează deplasarea efectorului dintr-o poziție într-alta, generează o anumită traiectorie, în concordanță cu cerințele procesului tehnologic în care se integrează robotul industrial. Îndeplinește funcțiile lanțului cinematic de ghidare și se compune din mecanismul generator de traiectorii (mecanism de poziționare) și dispozitivul de prehensiune [128].



Standardul Internațional ISO 8373 prevede termenii relevanți roboților industriali de manipulare care se folosesc într-un mediu de fabricație. Robotul industrial este un sistem tehnic complex [10, 33, 34, 36, 55], având în componență mai multe subsisteme, fig.1.1. (a):

~ mecanismul manipulator sau mai simplu manipulatorul este un sistem mecanic mobil, având o bază fixă, și posibilitatea de a deplasa unul dintre elementele sale (elementul efector) într-o varietate foarte mare de poziții;

~ dispozitivul de lucru este atașat solidar organului efector al manipulatorului, și are rolul de a efectua operația specifică aplicației;

~ motoarele sunt de tip electric, hidraulic sau pneumatic, sunt atașate sistemului mecanic mobil, și reprezintă sursa de energie mecanică a robotului. Mișcarea acestora este programată și urmărită în timp real de către sistemul de control;

~ senzorii sunt dispozitive traductoare ale parametrilor fizici în informație digitală utilizată de sistemul de comandă și control. De cele mai multe ori, parametrii urmăriți sunt de natură cinematică (poziție și viteză) și mecanică (forță);

~ sistemul de comandă și control este format dintr-un calculator dotat cu programe specifice, și interfețe pentru transferul informației între acesta și sistemele de senzori pe de o parte, și dispozitivele de comandă ale motoarelor pe de altă parte. Rolul acestui sistem este acela de a programa acțiunea dorită, și de a urmări desfășurarea ei.

1.4. Spațiul de lucru

Efectele combinate ale structurii cinematice, mecanismului de acționare al axelor și controlul mișcărilor în timp real, toate împreună determină caracteristicile majore de manipulare performantă precum: volumul de acțiune a brațului, sarcina utilă, viteza de poziționare și precizia operațiilor [30, 67, 71, 104].

Forma spațiului de lucru este determinată de cele trei grade de mișcare de bază ale mecanismului generator de traiectorie, respectiv translații sau rotații după cele trei axe de coordonate. În funcție de modul cum sunt combinate aceste grade de mișcare în cadrul schemei cinematice de bază a robotului se obține spațiul de lucru [102], de exemplu fig.1.2.

În cazul brațului robotic MINIR conceput de Ho M., Ananthanarayanan A., Ehrlich L., Gupta S.K., Desai J.P. de la Universitatea din Maryland, College Park, MD, USA, și Gullapalli R., Simard J.M., de la Universitatea de Școală Medicală din Maryland, Baltimore, MD, USA [52] cu un total de 9 cuple de rotație care permit individual o rotire de $\pm 35^\circ$, spațiul de lucru variază între ± 60 mm pe direcția axei X și între -20 mm și 60 mm pe direcția axei Z, fig.1.3.

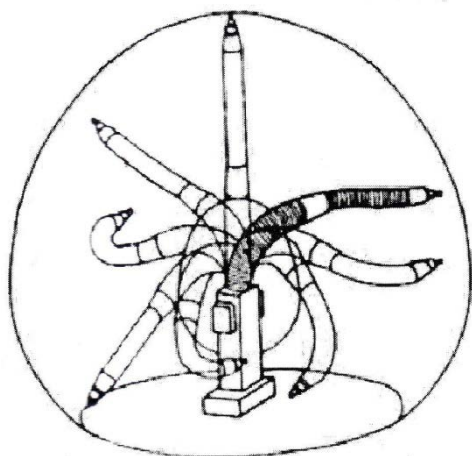


Fig.1.2 Mecanism trompoid [128]

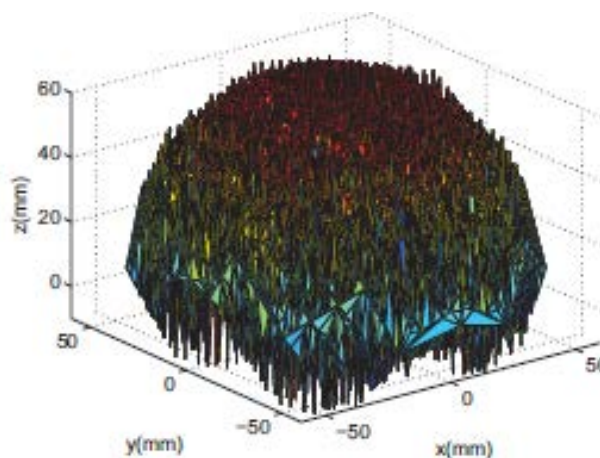


Fig.1.3. Volumul de lucru al robotului MINIR [52]

Eficiența spațiului de lucru se referă la gradul de dexteritate și rapiditate raportat la dimensiunea brațului [67]. În cazul manipulatorilor concepute la standarde înalte, eficiența spațiului de lucru este comparabilă cu a brațelor robotice la care sunt necesare 5 sau mai multe grade de mișcare.

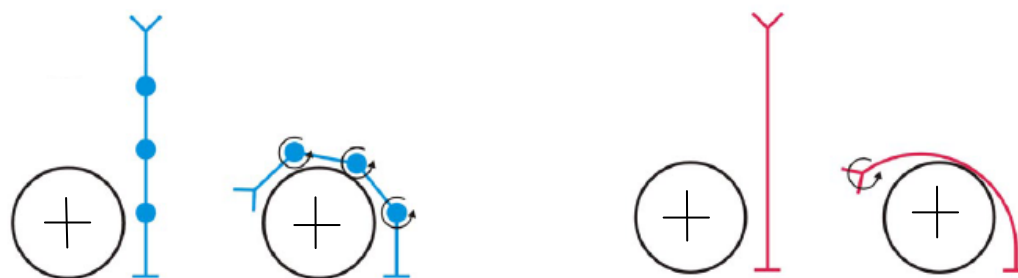
1.5. Cercetări privind caracteristici și particularități ale roboților tip „trompă de elefant” cu raportul mare între lungimea și diametrul brațului

Caracteristicile tehnice ale brațelor robotice tip „trompă de elefant” includ: sistemul de coordonate, dimensiuni de gabarit, valorile deplasărilor realizabile, precizia de poziționare, repetabilitatea, numărul de grade de mobilitate, tipul de acționare, greutatea brațului, volumul spațiului de lucru, capacitatea sistemului de comandă și control, viteză, sarcina transportabilă, condițiile de lucru, parametrii de exploatare [55]. O particularitate a acestor brațe robotice este dată de redundanța cinematică descrisă de STAS 8174/1-77 ca fiind existența într-un dispozitiv a mai mult decât un mijloc pentru îndeplinirea unei funcții specificate. Disponerea în paralel a unor elemente identice (în acest caz, cuple cinematice) este o măsură care se adoptă la proiectarea sistemului pentru asigurarea redundanței în vederea sporirii fiabilității, pentru a evita configurații critice ale articulației, obstacole, singularități și pentru a minimiza consumul de energie [17, 27, 73, 75, 118].

Realizarea structurilor robotice fără a folosi elemente rigide este un proces neobișnuit pentru majoritatea proiectanților de roboți. Însă, câteva principii de proiectare a structurii se pot identifica printr-un studiu meticolos al structurilor biologice [61] precum: limba, trompa elefantului, sau brațele de caracatiță. În particular, grupul de structuri denumite „hidrostate musculare” („muscular hydrostats”) precum: brațele de caracatiță, trompa de elefant, tentaculele de calamar [89], coada peștilor [69] și limbele mamiferelor [56, 65, 79]; au oferit o ramură bogată de perspective pentru proiectanții de roboți tip continuum. Animalele nu sunt, însă, singura sursă de inspirație; vița de vie sau curpenii plantelor agățătoare constituie de asemenea elemente de inspirație pentru inginerii proiectanți [65]. Elementele componente rigide ale structurii unui robot tradițional limitează posibilitatea de mișcare a acestuia în spații înguste, în medii de lucru suprapopulate, sau adaptarea lor la condițiile variate ale mediului în care operează [111].

Hannan M. W. și Walker I. D. insistă asupra diferenței dintre brațele robotice hiper-redundante, brațele robotice convenționale și cele tip continuum în [47]. În fig.1.4 este prezentat modul de curbare a unei secțiuni a brațului robotic de tip continuum; în cazul (a) este necesară acționarea a trei cuple pentru a ocoli obstacolul, iar în cazul (b) este suficientă folosirea unui singur actuator. Deși brațele robotice tip continuum prezintă avantaje în cazul obținerii anumitor configurații ale structurii, folosirea acestora pentru poziționări spațiale de precizie este net inferioară brațelor robotice convenționale. Brațele robotice cu structură serială și redundanță din punct de vedere cinematic au fost studiate de mai multe colective de cercetători care au dezvoltat diferite metode de control al poziționărilor prin optimizarea matricei Jacobiene [49, 72, 83, 97].

Structura caracteristică unui robot serpentină este formată dintr-o serie de legături, precum robotul ACM-Rx dezvoltat de Aoki T. și Hirose S. de la Institutul Tehnologic din Tokio, sau robotul serpentină OmniTread dezvoltat de Borenstein J., Granosika G., de la Universitatea din Michigan și Hansen M. de la Universitatea tehnică din Lodz. Aceste legături sunt articulate prin cuple acționate fiecare în mod independent fig.1.4. (a). Pentru acești roboți serpentină, legăturile și cuplele sunt ambele rigide, conectate în serie. Deși nu sunt continue în totalitate, au suficiente module pentru a forma o structură tip coloană vertebrală. Acestea au fost construite pentru a fi utilizate în inspecții tehnice din reactoarele nucleare și în interiorul diferitor corpuri pentru diverse aplicații chiar și în domeniul medical.



(a) Manipulator cu secțiuni discret rigide

(b) Manipulator cu secțiuni continuum

Fig.1.4. Diferența dintre structura serpentină și structura continuum - Hannan M.W., Walker I.D., 2003 [47]

Roboții continuum [111] pot realiza mișcarea de întindere sau comprimare a structurii și, anumite construcții, chiar de răsucire. Interesul pentru roboții tip coloană vertebrală a început încă din 1960, primul prototip de acest fel, menționat în literatura de specialitate, fiind realizat de Victor C. Anderson și Ronald C. Horn de la Universitatea din California, San Diego [5]. Pentru a aproxima hiper-redundanța robotului tip coloană vertebrală au fost depuse eforturi susținute de către cercetători precum: Chirikjian de la Institutul tehnologic din California, privind cinematica și dinamica generală a acestor roboți și Hirose de la Universitatea din Oxford, privind evoluția formelor structurale și noi soluții constructive prototip; punând astfel bazele teoretice în domeniu.

Roboții de tip continuum au secțiuni de coloană vertebrală continue care se pot armoniza în jurul obiectelor, precum seria OctArm, fig.1.6 - fig.1.7, realizată în SUA cu posibilitate de prehensare [77] și brațul robotic Tendril realizat de NASA pentru inspecții minim invazive și reasamblat parțial la Universitatea din Clemson, SUA [26]. Numeroase structuri robotice de tip continuum au fost propuse până în prezent cu aplicație în domeniul medical, pentru operații chirurgicale în cea mai mare parte [14, 53]. Roboții cu structură suplă precum robotul Softbot realizat la Universitatea Tufts din Boston, SUA, sunt aproape la fel ca formă. Totuși, roboții flexibili și cu structură suplă sunt greu de construit, modelat și de controlat.

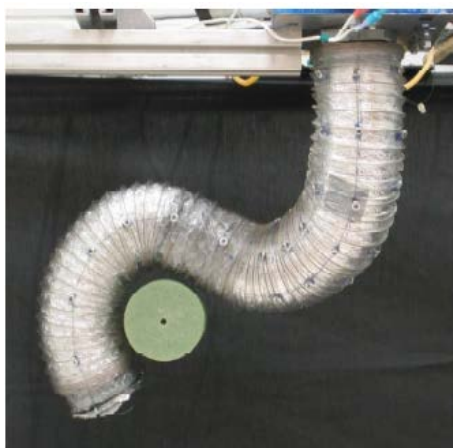


Fig.1.6. Posibilitate de prehensare a brațului Air-Octor [58, 78]

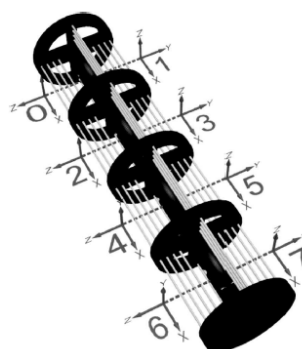


Fig.1.7. Dispunerea firelor de acționare la structura dezvoltată de Hannan M. W. și Walker I. D. [48]

O proprietate comună deținută de aproape toți roboții continuum este aceea de curbură constantă [111], respectiv forma de coloană rezultată în urma rotirii cuplelor brațului robotic aproximează un set de secțiuni de curbe constante conectate în serie.

1.6. Cercetări privind soluții constructive de brațele robotice tip „trompă de elefant” adoptate pe plan mondial până în prezent

Există numeroase alternative disponibile pentru conceperea unei structuri robotice multi-articulară, însă doar un număr restrâns al acestor alternative au fost realizate fizic până azi. Dintre cei mai moderni roboți industriali, majoritatea sunt inspirați constructiv după brațul uman și au în structura mecanică legături discret rigide conectate în serie. Aceste structuri sunt potrivite mediului industrial unde spațiul de lucru este predefinit și structurat, însă majoritatea roboților sunt, la momentul de față, constrânși să facă față unor medii care impun controlarea cu grijă a mișcării acestora și, în același timp, trebuie amplasați la distanță astfel încât să nu fie în contact direct cu omul sau cu mediul său.

1.6.1. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu structură robustă

- Firma Kawasaki are brevetat modelul „trompă” care utilizează pentru transmiterea și conversia mișcării o structură formată din pârghii articulate și un grup de cilindrii hidraulici, mișcarea de rotație (θ) a întregului dispozitiv fiind asigurată de un motor electric, fig.1.8.

Cilindrii hidraulici realizează mișcări de translație (λ); aceștia intervin în definirea poziției structurii articulate situate în aval. Geometria globală echivalentă mecanismului este un arc de curbă într-un plan care conține axa Δ a mișcării de rotație θ , a cărei curbura evoluează în funcție de λ , fig.1.8. (b).

Concluzii: Structura este complexă, mișcarea de „curbură” este realizată într-un plan, numărul cilindrilor de acționare este mare iar prețul de cost este ridicat. Repetabilitatea de $\pm 0.5 \text{ mm}$ este modestă.

1.6.2. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin roți dințate

- Brațul robotic numit Meduza, fig.1.10.(a), cu 12 grade de mobilitate a fost conceput după modelul structurii șarpelui conform [96], fiind destinat operațiilor de căutare și salvare de vieți omenești cu posibilitate de deplasare prin montarea lui pe o platformă mobilă. Componenta cheie a structurii este cupla cinematică de clasă a III-a care permite rotirea după cele trei axe și cu ajutorul celor trei motoare fig.1.10.(b). Elementele de acționare sunt montate în interiorul structurii brațului între cupla cinematică și elementul de legătură. Având structura din legături cuplate în serie orice solicitare exterioară trebuie susținută de fiecare cuplă de-a lungul structurii, spre deosebire de structurile paralele unde solicitările exterioare se împart între mai multe secțiuni ale brațului. Brațul are formă cilindrică cu diametru de 46 mm și lungimea de 186 mm . Unghiul de rotație al cuplei este de $\pm 120^\circ$ la îndoire (rotație după axa X), și posibilitatea de orientare și răsucire pe $\pm 360^\circ$ (rotație după axa Z).

Concluzii: Acest tip de structură prezintă manevrabilitate ridicată și flexibilitate în mișcare, fiind potrivit manevrării în medii complexe și cu obstacole. Cupla de clasă

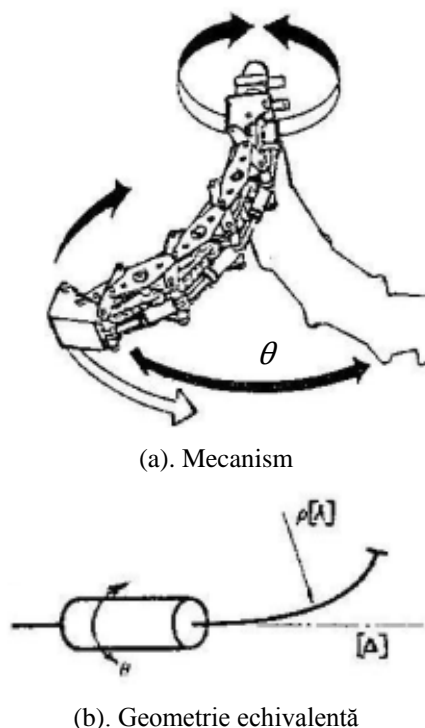


Fig.1.8. Mecanism „trompă de elefant” folosit de robot pentru purtarea dispozitivului de vopsire [74]

a III-a este compactă, rigidă, și cu un spațiu mare de lucru. Transmisia prin roți dințate realizează transferul rotației și a cuplului motor, fig.1.13.

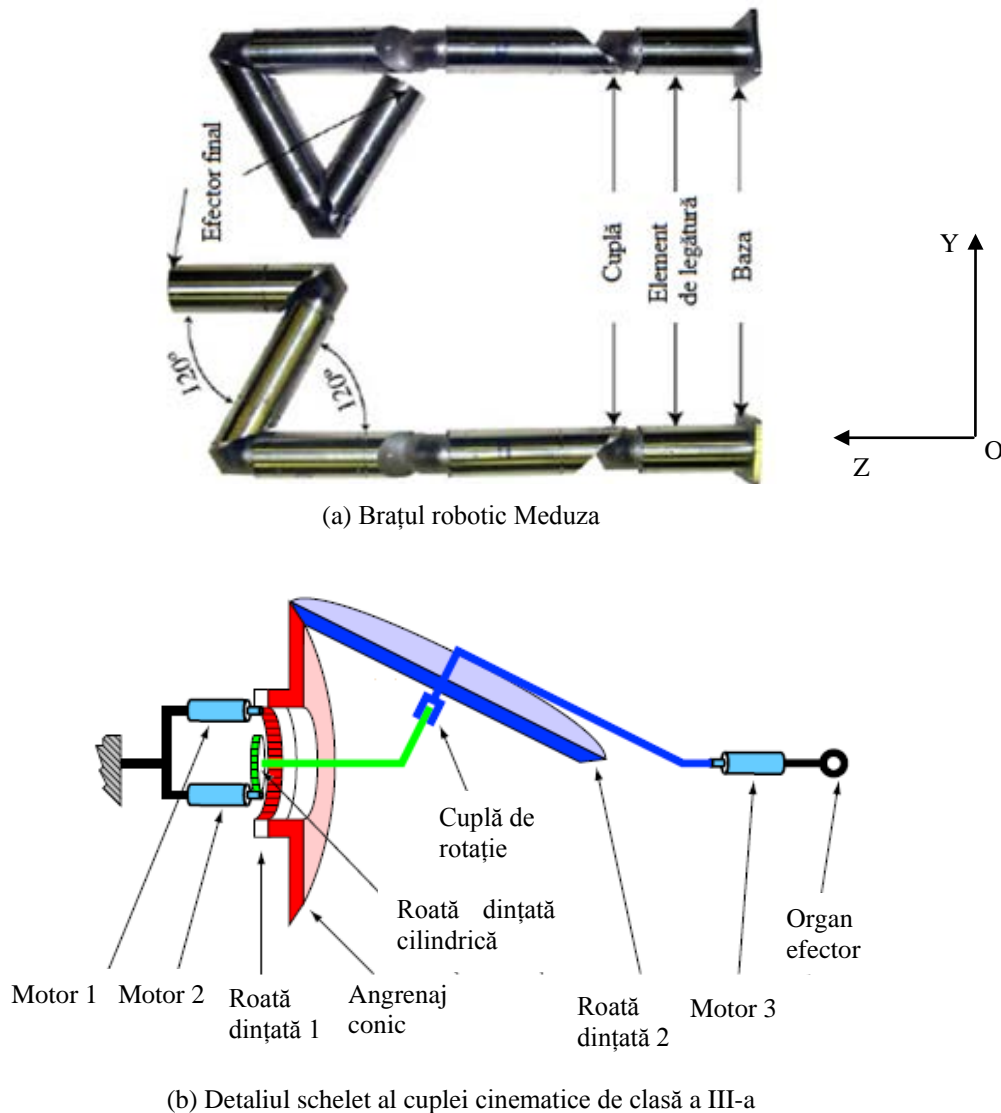


Fig.1.10. Structura brațului robotic conceput de Shammas [96]

Printre avantajele acestor transmisii se numără: durabilitate mare; siguranță mărită în exploatare; asigură raport de transmitere precis; au gabarit redus; produc sarcini mici pe arbori; au randament ridicat. Printre dezavantaje menționăm: tehnologia de fabricare complexă, funcționează cu zgomot și vibrații; au preț de cost ridicat; sunt limitate la o serie de raporturi de transmisie.

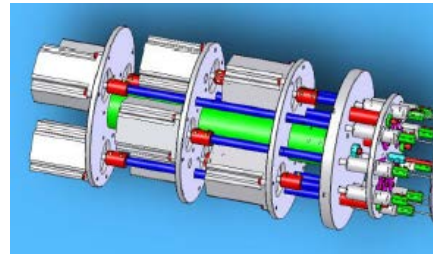
1.6.3. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin fire/cabluri dispuse în exteriorul structurii

Până în prezent au fost propuse diferite variante constructive de roboți acționați prin cabluri. Aceste alternative conduc la realizarea unei posibile clasificări a roboților acționați prin cabluri. Însă, nu există o clasificare universal cunoscută, nici măcar pentru terminologia adoptată [111].

- Brațul robotic conceput de Dumitru S., Cojocaru D., Dumitru N., Ciupitu I., Geonea I. și Dumitru V. de la Universitatea din Craiova, România, prezentat în fig.1.14.(a) [37] are două elemente componente principale: blocul de acționare, fig.1.14.(b), și brațul robotic cu structură flexibilă și cu posibilități de mișcare similare șarpelui. Structura brațului are trei module a căror acționare este independentă, permițând astfel configurații 3D complexe și posibilități cinematice multiple în spațiul de lucru.



(a). Structura brațului



(b). Unitatea bloc de acționare

Fig.1.14. Braț robotic flexibil conceput de Dumitru S. et. al. [37]

Concluzii: Avantajul major al acestei structuri constă în posibilitatea miniaturizării brațului. Ca dezavantaje se pot enumera: precizie de poziționare modestă (3 mm), structură relativ complexă, deplasarea simultană a tuturor vertebrelor la acționarea unui cablu, obligând brațul să realizeze o anumită curbă indiferent de punctul programat. Această structură poate fi folosită pentru poziționare și orientare doar în poziție verticală, suspendat de unitatea de acționare.

- Robotul multi-articulat cu structură 3D, fig.1.18, realizat la Universitatea „Vasile

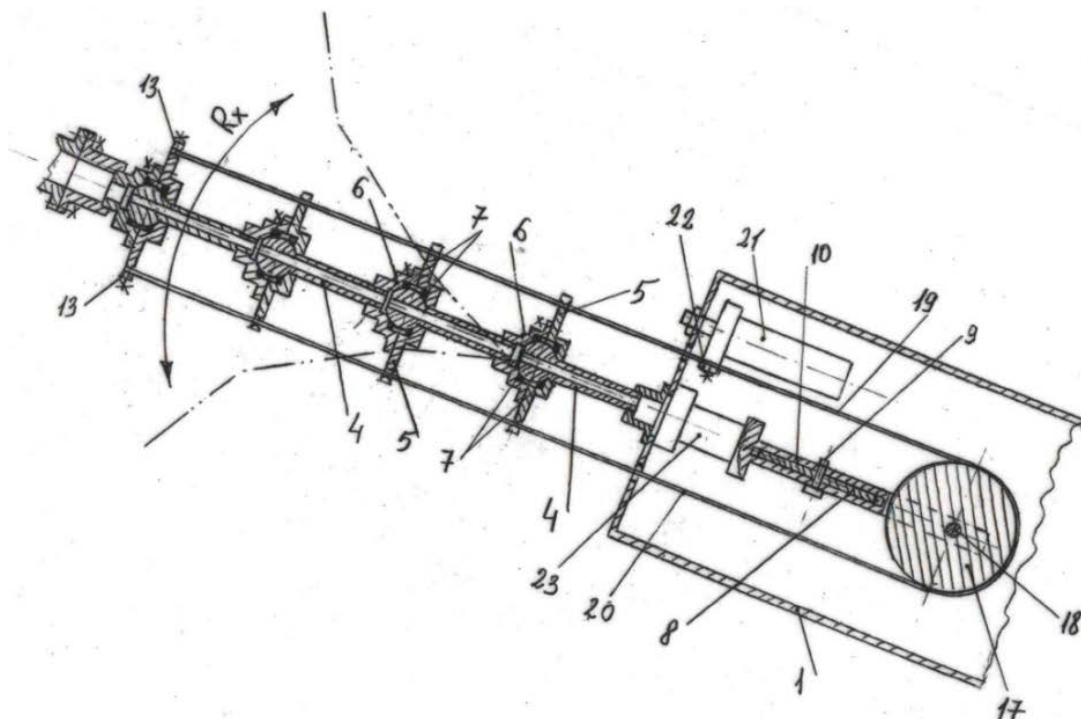


Fig.1.18. Robotul multi-articulat cu structură 3D [103]

Alecsandri” din Bacău este destinat manipulării unor obiecte diverse și asigură realizarea unor traiectorii spațiale sub formă de curbe, necesare operațiilor de sudură.

Concluzii: Datorită posibilității generării unor traiectorii complexe, robotul poate executa ocoliri de obstacole, întoarceri, pătrunderi prin ferestre de dimensiuni mici sau să-și plaseze brațul în spatele unui panou.

Concluzii privind transmisia prin fire/cabluri dispuse în exteriorul structurii. Din cercetările făcute rezultă că cea mai directă variantă de realizare a mișcării după planul transversal și/sau după planul longitudinal a brațelor robotice tip „trompă de elefant” este cu ajutorul acționării la distanță prin cabluri/fire. Structura constructivă este destul de simplă și (relativ) ușor de realizat dar asigură o precizie a poziționării grosieră doar la nivel de orientare [175].

1.6.4. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin fire/cabluri dispuse în interiorul structurii

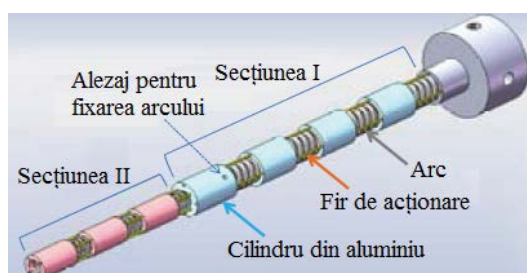
- Brațul robotic „Snake Arm” tip șarpe produs de firma OC Robotics, disponibil în comerț, fig.1.29. (c), este construit din segmente rigid legate între ele în interiorul structurii, având o formă continuă la exterior și este folosit la realizarea inspecțiilor tehnice. Acest braț robotic este articulat prin cuple sferice acționate prin fire amplasate în interiorul brațului. Brațul cu lungimea de 1000 mm și diametrul de 35 mm a fost construit pentru poziționarea camerelor în interiorul unor structuri înguste pentru monitorizarea procesului tehnologic.



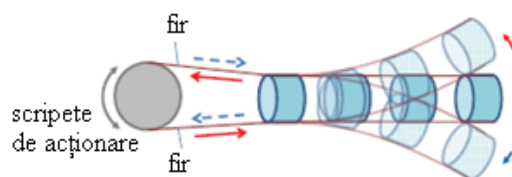
Fig.1.29. Braț robotic pentru inspecții tehnice de la OC Robotics [129]

O altă variantă produsă de OC Robotics are lungimea brațului de 800 mm și diametrul de 60 mm și a fost construit pentru înlocuirea unor conducte deteriorate, și pentru realizarea sudurilor în interiorul unor spații înguste [129].

- Un alt robot folosit în domeniul medical pentru operații chirurgicale laparoscopice este cel conceput de Yoon H. S., Choi Y. și Yi B. J., de la Universitatea din Hanyang, Coreea, menționat în [122] și prezentat în fig.1.32 cu structură flexibilă dar care poate fi acționată pentru mișcarea înapoi și nu doar pentru înaintare cum sunt majoritatea brațelor robotice pentru intervenții chirurgicale construite până azi.



(a) Prezentarea structurii mecanice



(b) Înfășurarea firelor pe scripete

Fig.1.32. Braț robotic pentru intervenții laparoscopice conceput de Yoon, Choi și Yi [122]

Concluzie: Structura brațului are o greutate mică și suplețe, având posibilitatea atașării unei camere la organul terminal. Structura brațului prezintă potențial de utilizare în diferite intervenții chirurgicale ca laparoscopia sau chirurgia sinusurilor. Precizia de poziționare de la o astfel de structură este modestă, iar rigiditatea brațului este foarte mică.

Concluzii privind transmisia prin fire/cabluri dispuse în interiorul structurii. Roboții acționați prin fire/cabluri dispuse în interiorul structurii prezintă siguranța intrinsecă a operării și interacționării cu mediul de lucru. Dintre principalele avantaje ale transmisiei prin fire precizăm [9]:

- posibilitatea transmiterii mișcării (translație și/sau rotație) la distanță în condiții de siguranță, realizând brațe robotice cu diametre mici și foarte mici, iar lungimile sunt rezonabile;

- elementele componente ale lanțului cinematic (manipulatorului sau robotului industrial) au masă redusă, fapt ce conduce la reducerea forțelor de inerție;

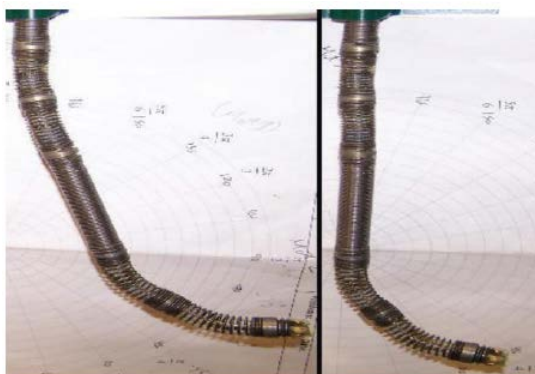
- au o funcționare lină, fără zgomot; amortizează șocurile;

- prezintă protecție contra suprasarcinilor prin alunecarea firului pe roată (tambur);

- au preț de cost scăzut în comparație cu structurile ce utilizează roți dințate.

1.6.5. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin comprimarea unor resorturi

- Hirose S., de la Institutul tehnologic din Tokyo, Japonia, a realizat recent o astfel de structură folosind resorturi, soluție întâlnită și la NASA Johnson Space Center, prin construcția „Tendrîl”, fig.1.34. Coloana structurii robotice construită din resorturi asigură proprietatea de a fi compliantă în mod natural (direct). Însă, folosirea resorturilor în structură face ca aceasta să fie dificil de controlat în timpul mișcării, datorită pierderii acțiunii de control prin compresie. Aceeași situație apare și în cazul acționării pneumatice prin intermediul mușchilor artificiali. O soluție simplă pentru rezolvarea compresiei incontroleabile este folosirea unei tije incompresibile ca element de legătură între resorturile din coloana structurii robotice.



(a) Brațul robotic Tendril [111]



(b) Secțiune de la un braț robotic [47]

Fig.1.34. Exemple de transmisii prin comprimarea unor resorturi

Concluzii: Această soluție are mai multe avantaje printre care: reducerea diametrului structurii și obținerea unui comportament predictibil. Dezavantajul este, desigur, acela că folosirea tije împiedică structura să se întindă. Cu toate acestea, conceptul de structură robotică incompresibilă tip coloană vertebrală a înregistrat popularitate și succes, fiind elementul de bază al unor numeroase alte concepții. Dezavantajul major al acestei structuri rămâne realizarea modestă a preciziei de poziționare a organului terminal datorită

elementelor elastice ale coloanei. Orice sarcină aflată în organul terminal produce deformări elastice necontrolate.

1.6.6. Brațe robotice tip „trompă de elefant” cu transmisii mecanice prin mușchii pneumatici

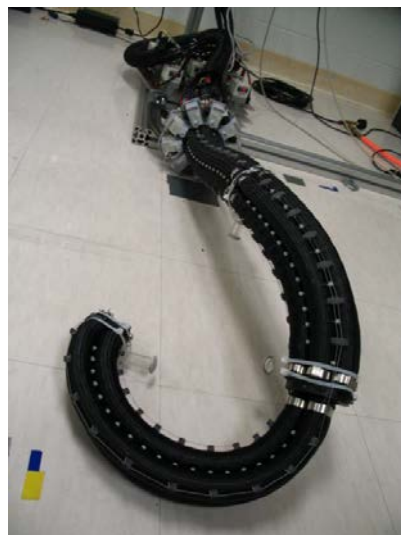
O alegere în acționarea coloanelor structurilor robotice continuum este folosirea tuburilor pneumatice. Manipulatorul KSI Tentacle, fig.1.36 are la bază acționarea prin fire cu ajutorul unor camere pneumatice extensibile. Această structură permite acționarea firelor atât după planul longitudinal cât și după planul transversal.

De obicei structurile robotice acționate local sunt formate din mușchi pneumatici tip „McKibben”, fig.1.37, similar robotului acționat pneumatic local din seria „Octarm”, deși numeroase versiuni folosesc aliaje cu memoria formei. Strategia este să se formeze coloana structurii din secțiuni acționate independent [94].

Fiecare secțiune a structurii este construită (în general) din trei mușchi acționați independent și conectați împreună pe toată lungimea lor. Mușchii pneumatici se pot „întinde” (cresc în lungime în funcție de micșorarea presiunii) și „comprima” (micșorare în lungime în funcție de creșterea presiunii).

Când presiunea este mărită sau micșorată în mod egal în toate cele trei elemente de acționare ale unei secțiuni verticale, lungimile secțiunilor cresc sau descresc. Când se aplică presiuni diferite în dispozitivele de acționare, coloana structurii se încovoiește sub forma unei curbe aproximativ constante. Planul curbei este determinat de mărimile celor trei presiuni. În general, structura se întinde, sau se contractă, și își schimbă curba și planul curbei în funcție de cele trei presiuni aplicate. Forma rezultată a coloanei structurii robotice este astfel un set de segmente în formă de curbe aproximativ constante legate în serie (a căror tangente finale coincid).

Concluzii: Structurile de roboți continuum acționate local au avantajul că asigură în mod firesc extensia, flexia și torsiunea structurii tip „trompă de elefant” (numită și încovoierea 2D). Această caracteristică nu se găsește în structurile acționate prin fire sau prin tuburi concentrice. Dezavantajele acționării locale a structurilor robotice continuum includ generarea unor forțe capabile relativ scăzute, cel puțin pentru acționarea pneumatică, necesitatea folosirii unui compresor și a unor valve de complexitate ridicată și de reglare a presiunilor externe prin echipamente specifice.



(a) Structura brațului



(b) Legarea furtunilor pentru alimentare cu aer comprimat

Fig.1.36. Braț robotic OctArm [8]

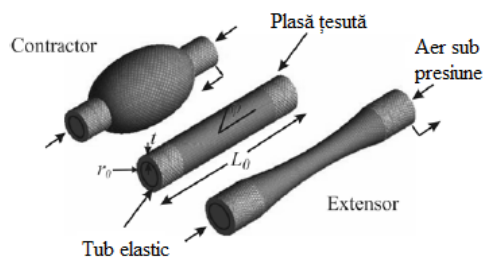


Fig.1.37. Exemplu de mușchi pneumatic [80]

1.7. Cercetări privind metode de analiză a cinematicii și dinamicii brațelor robotice tip „trompă de elefant”

Pentru a coordona mișcările disponibile structurilor tip „trompă de elefant” trebuie stabilite modelele cinematice care descriu relația de legătură între variabilele Configurației (forma structurii) și parametrii efectorului final și cei ai actuatorului. Modelele de bază pentru planificarea mișcării și algoritmi de control al mișcării sunt pașii critici pentru dezvoltarea brațului din stadiul de prototip în stadiul practic de implementare hardware.

Modelele de analiză a acestor structuri diferă de cel al structurilor cu legături rigide datorită posibilității de schimbare a formei în orice punct de-a lungul structurii lor. De exemplu în cazul degetelor robotice folosite pentru apucarea-eliberarea obiectelor de diferite forme și dimensiuni, precizia poziționării flexibile împreună cu viteza de poziționare sunt parametrii definitorii, iar îmbunătățirea acestora se realizează plecând de la modelul dinamic al structurii [28, 95]. În cazul structurilor robotice cu legături rigide, schimbarea formei brațului este posibilă doar în puncte fixe de-a lungul structurii lor (în articulațiile dintre legăturile rigide). Convenția Denavit-Hartenberg (D-H) este foarte bine stabilită în cazul legăturilor rigide și prevede un cadru de bază general pentru analiza modelelor cinematice și dinamice [90, 112, 115].

În cazul roboților tip „trompă de elefant”, modelarea cinematică a brațului robotic trebuie să țină cont de modul în care variază forma structurii local și continuu de-a lungul ei. Cercetătorii au stabilit două metode de abordare a analizei cinematice [111]:

- o metodă de analiză care pleacă de la detaliile structurale ale brațului robotic, modelul fiind construit prin exploatarea convenției D-H astfel încât să se potrivească structurii cu legături “virtual rigide” ale acestor roboți;

- o metodă de analiză care ține cont de ideea generală că forma structurii este o curbă continuă și a cărei model tratează în mod explicit această caracteristică pentru a formula modelul de analiză.

1.7.1. Cercetări privind metode de analiză cinematică a brațelor robotice tip „trompă de elefant”

I. Analiza cinematică în funcție de parametrii structurali

Această abordare, de altfel cea mai inspirată, exploatează cu rigurozitate cinematica roboților tip „trompă de elefant” ale căror secțiuni iau forma unei curbe de lungime constantă în timpul mișcării la majoritatea structurilor, construite până azi. Metoda se bazează pe faptul că evoluția curbei de la un capăt la celălalt al structurii poate fi reprezentată în plan prin trei transformări discrete: (1) o rotație pentru a defini tangenta la începutul curbei față de punctul final al curbei; (2) o translație de-a lungul noii direcții de la capătul inițial la cel terminal al curbei; și (3) o a doua rotație (de aceeași valoare egală în modul cu prima rotație) pentru a realinia direcția traiectoriei tangentă la curba capătului structurii, fig.1.39 [111].

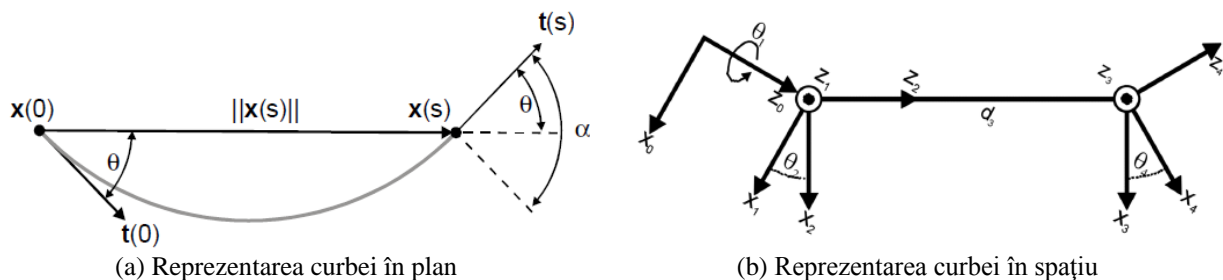


Fig.1.39. Reprezentarea mișcării de rotație [47]

II. Analiza cinematică folosind matricele omogene de trecere

Analiza cinematică a brațului poate fi realizată în două moduri [111], după cum este prezentat în fig.1.41. Prima analiză se referă la legătura dintre spațiul de acționare (ex. lungimea firului l) și spațiul de configurare (ex. unghiul de încovoiere Θ și unghiul direcției de încovoiere Φ). Analiza cinematică pentru un segment al brațului robotic, fig.1.40, constă în analiza îndoirii unei secțiuni a robotului flexibil acționat prin fire. Fenomenul poate fi descris de unghiul de încovoiere Θ și de unghiul direcției de încovoiere Φ . Θ este unghiul central al arcului de cerc și Φ este unghiul dintre axa X și planul de încovoiere, în cazul nostru de 90° . Aceste două unghiuri sunt determinate prin schimbarea lungimii firelor de acționare, în cazul nostru se modifică doar unghiul de încovoiere după direcția X și după direcția Z brațul robotic fiind poziționat perpendicular pe planul XOY și axa OZ fiind paralelă cu structura brațului.

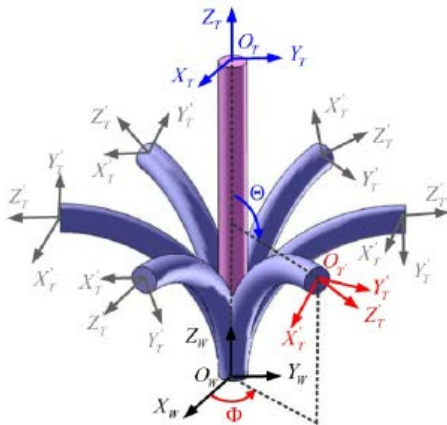


Fig.1.40. Reprezentarea încovoierii unei secțiuni a brațului robotic [124]

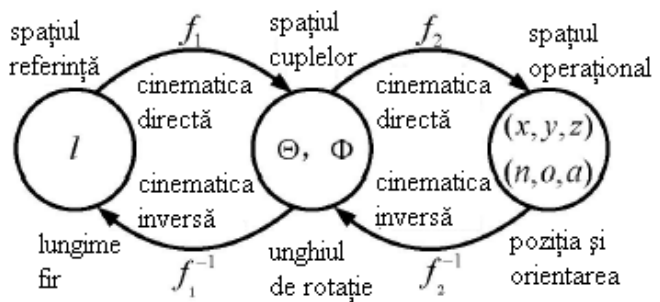


Fig.1.41. Diagrama modelării cinematice a brațului robotic [124]

Calculul poziției efectorului final, ținând cont de lungimile cablurilor, respectiv abordarea cinematicii directe a roboților acționați prin fire în stare slab tensionată nu este comună, și poate duce la obținerea unor soluții reale pentru aranjamentele spațiale. În plus soluțiile depind de forțele aplicate, ceea ce complică analiza considerabil [111].

III. Analiza cinematicii inverse la brațelor robotice cu un număr mare de grade de mobilitate

Cinematica inversă a manipuloarelor redundante a fost analizată de mai multe colective de cercetători [3, 4, 45, 50, 56-59, 92, 107, 108, 114, 119]. Ahmmad S.M., de la Universitatea Internațională Islamică a Malaeziei, Kuala Lumpur [2], propune un algoritm de calcul simplificat al cinematicii inverse a roboților hiper-redundanți. În cadrul acestei metode de calcul se consideră structura robotului ca un ansamblu de sub-roboți (SR1 format din primele două cuple și legături, și SR2 format din următoarele două) formate din câte două legături și a căror cinematică inversă se rezolvă analitic pentru fiecare variabilă a cuplelor, în mod succesiv. Algoritmii sunt validați prin încercări experimentale ale unei structuri prototip formată din 4 legături și în urma cărora se obțin valori ale repetabilității bune. Prototipul este conectat la un PC cu un sistem de afișaj grafic-vizual evoluat GUI (Graphic User Interface).

Algoritmii propuși stabilește inițial câteva configurații posibile în ipostaze singulare ale brațului, pe care le reconfigurează eliminând configurațiile critice. În acest fel se obțin soluții cinematice ale structurii fără configurații critice (cu soluții unice).

Concluzii. Algoritmii propuși rezolvă problema analizei cinematice pentru un număr mic de cuple, pentru un număr mai mare de cuple devine complexă. Rezultatele

experimentale obținute sunt orientative, autorul neținând cont de poziționarea din mai multe direcții la atingerea punctului final. De asemenea, nu este prezentat nici sistemul etalon de măsură ce poate fi integrat în posibilitățile structurale ale robotului. Se remarcă faptul că robotul realizează deplasările în plan, dar în spațiu algoritmul de analiză cinematică, cât și erorile de poziționare, complică mult dezvoltarea acestei metode.

1.7.2. Cercetări privind analiza dinamică a brațului robotic acționat prin fire

I. Analiza dinamicii brațului robotic cu fire ideale

În cadrul acestei analize se stabilesc următoarele ipoteze [60]: masa și elasticitatea firelor sunt ignorate; analiza dinamicii robotului se reduce la efector.

Astfel, ținând cont de ipotezele stabilite, dinamica sistemului este exprimată prin ecuația vectorială (1.36):

$$M(x)\ddot{x} + N(x, \dot{x}) = -J^t \tau, \tau \geq 0 \quad (1.36)$$

în care:

$$N(x, \dot{x}) = C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) \quad (1.37)$$

unde $M(x)$ reprezintă matricea masei robotului, $C(x, \dot{x})\dot{x}$ este termenul Coriolis și centrifugal, $G(x)$ este vectorul termenilor gravitaționali, J este matricea Jacobiană a robotului, și x este vectorul coordonatelor generalizate ale poziției și orientării efectoului final.

II. Analiza dinamicii brațului robotic cu fire elastice (reale)

În cadrul analizei se realizează modelarea generală a unui robot acționat prin n fire la care: L_{1i} cu $i = 1, 2, \dots, n$, reprezintă lungimea celui de-al i -lea fir tensionat, și L_{2i} cu $i = 1, 2, \dots, n$, reprezintă lungimea celui de-al i -lea fir netensionat [60]. Dacă sistemul este rigid, atunci $L_{1i} = L_{2i}$.

$$L = (L_{11}L_{12} \dots L_{1n}, L_{21}L_{22} \dots L_{2n})^t = (L_1^t, L_2^t)^t \quad (1.43)$$

În final autorul prezintă ecuațiile finale ale mișcării care pot fi scrise sub forma:

$$M(x)\ddot{x} + N(x, \dot{x}) = J^t k(L_2 - L_1) \quad (1.48)$$

$$I_m \ddot{q} + rk(L_2 - L_1) + D\dot{q} = u \quad (1.49)$$

în care:

$$N(x, \dot{x}) = C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x)$$

$$L_2 - L_0 = rq$$

În aceste ecuații $\dot{L}_1 = J\dot{x}$ și ceilalți termeni au fost descriși anterior. Ecuațiile (1.48) și (1.49) reprezintă modelarea robotului acționat prin fire ca un sistem neliniar de cuple. Această modelare ține cont atât de rigiditatea cât și de flexibilitatea subsistemelor și interacțiunea dintre ele.

Concluzii: Cercetările făcute sub aspectul analizei dinamice atât prin utilizarea firelor ideale, cât și a celor reale, pun în evidență stabilirea regimului tranzitoriu la organul terminal al brațului robotic, regim tranzitoriu care este diferit atunci când sunt făcute diferite poziționări spațiale. Autorii pun în evidență influența majoră asupra comportării dinamice a servomotoarelor dar și a maselor puse în mișcare din „porțiunea” de braț robotic tip „trompă de elefant”. De asemenea, autorii pun în evidență influența regimurilor dinamice asupra diferitelor poziții spațiale ale formei „trompei de elefant” fără a stabili un model matematic de legătură cu eroarea traiectoriei a organului terminal.

1.8. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor privind structura brațelor robotice tip „trompă de elefant”

Cercetările recente acordă mai mult interes îmbunătățirii versatilității și adaptabilității roboților la medii de lucru complexe adoptând soluția brațului robotic cu structură multi-articulară și sistem de transmitere prin fire.

1.8.1. Concluzii privind structura și clasificarea prin prisma soluțiilor constructive

1. Brațele robotice tip „trompă de elefant” reprezintă un gen de structură serială, unde efortul este direcționat în obținerea unui braț cu diametrul cât mai mic și lungimea cât mai mare și care să poată realiza orientări spațiale. Mai mult, domeniul interesat de acest tip de robot este cel medical, unde sunt solicitate poziționări spațiale ale brațului, dar și posibilități de avansare/pătrundere pe o anumită traiectorie spațială impusă. Aceste cerințe ale practicii medicale au impus diverse abordări constructive ale brațului robotic și mai ales ale acționării cuplelor constitutive brațului.

2. Din analiza tipurilor de cuple cinematice utilizate la constituirea brațului robotic tip „trompă de elefant” predomină cele elastice a căror elasticitate este dată de coloana centrală, sau prezența unor arcuri elicoidale înseriate, sau diverse tuburi împărțite în secțiuni. Aceste soluții au condus la obținerea de brațe subțiri și lungime mare. Cu un compromis al raportului lungime/diametru au fost concepute și brațe robotice tip „trompă de elefant” care au cuple cinematice rigide, ale căror mișcări generează traiectorii regulate și care pot descrie și controla într-o oarecare precizie poziționarea punctelor în spațiu.

3. Sistemele de acționare și transmitere a mișcării la cuplele brațului robotic tip „trompă de elefant” întâlnite la majoritatea structurilor cercetate sunt: 1) – Utilizarea motoarelor electrice și pneumatice care transmit mișcarea la cuple prin fire. Motoarele sunt amplasate la baza brațului robotic, iar firele pot să transmită mișcarea la cuple prin interiorul sau exteriorul brațului. În acest fel sunt create premise de micșorare a diametrului brațului robotic. 2) – Folosirea motoarelor electrice care transmit mișcarea la cuple prin roți dințate. Motoarele electrice fiind plasate, de obicei, la baza brațului robotului, iar transmisia se face printr-un tren de roți dințate cilindrice și conice. Această soluție are avantaje, dar și dezavantaje. 3) – Folosirea motoarelor electrice/pneumatice amplasate pe fiecare cuplă din structura brațului tip „trompă de elefant”, care are avantaje, dar mai multe dezavantaje, motiv pentru care este puțin utilizată.

4. Din punct de vedere istoric, brațele robotice poliarticulate din industrie nu au avut aplicații care să necesite precizie în funcționare sau procesul tehnologic să impună diferite configurări pentru realizarea unor traiectorii complexe.

5. Structurile roboților tip „trompă de elefant” acționați prin mușchi artificiali au în comun următoarele caracteristici: (1) forma asemănătoare coloanei vertebrale, fiind constituită din serii finite de secțiuni ale căror puncte caracteristice sunt definite de terminațiile firelor de-a lungul structurii; (2) forțele antrenate cu ajutorul dispozitivului sunt relativ mari (firele generează forțe relativ ridicate); (3) prezintă necesitatea găsirii unor modalități de prevenire a tensiunilor mari în fire și a jocurilor; (4) structura constructivă necesită dispunerea elementelor de acționare la baza robotului, acestea ocupând un spațiu relativ voluminos.

6. Structura simplă a roboților tip „trompă de elefant” prezintă câteva avantaje: (1) Sistemul de acționare prin cabluri permite acționarea de la distanță a elementelor componente, respectiv a cuplelor (arcuri, flanșe, cilindrii, inele). Astfel, dispunerea actuatorilor se face de obicei la baza brațului robotic. (2) Prezintă grad ridicat de

manevrabilitate, iar cu o ajustare adecvată a complianței brațului robotic tip „trompă de elefant“ se poate obține cu fidelitate mișcarea naturală a analogiei. (3) Datorită controlului independent al curburii secțiunilor, utilizatorul brațului poate manevra fiecare secțiune în funcție de necesitate permițându-i mișcări ample și traiectorii complexe în zona de lucru.

7. La toți roboții acționați prin cabluri apar constrângeri constructive ce țin de structura brațului, simultan cu limitarea posibilităților de acționare doar prin tracțiune. În acelaș timp prezența scripeților ce asigură o frecare de rostogolire a firelor este limitată datorită gabaritului mic al diametrului brațului, astfel majoritatea structurilor utilizează frecarea de alunecare între cabluri și ghidajele interioare.

8. Problema menținerii tensiunilor pozitive în fire/cabluri a fost tratată de mai mulți cercetători, referindu-se cu precădere la strategia de planificare optimă a traiectoriei în timp util, asigurându-se că tensiunile din cabluri pot fi menținute în domeniul elastic în timpul mișcării brațului.

9. În studiul caracteristicilor brațelor robotice tip „trompă de elefant”, problema rigidității firelor are influențe multiple datorate structurii seriale (legării în serie) a cuplelor constitutive ale brațului. Influențele menționate mai sus se datorează, în principal, valorii unghiurilor de rotație a fiecărei cuple la diferite poziții (forme) ale brațului, care influențează proporțional lungimile firelor ce acționează fiecare cuplă. Simultan cu influențele precizate mai sus apar forțele rezistente datorate greutateii sarcinii manipulate. În consecință, la realizarea optimizării pretensionării firelor apar probleme complexe influențate de mai mulți factori perturbatori. Aceste perturbări se regăsesc și în comportamentul dinamic al brațului robotic tip „trompă de elefant”, astfel încât pe spațiul de lucru vor fi comportări dinamice diferite cât și precizii de poziționare diferite.

10. Dispozitivele de compensare a alungirii firelor prin tensionare asigură elementului flexibil (firului) o tensiune a cărei valoare calculată anterior să determine funcționarea în condiții optime a mecanismului însă îngreunează structura și limitează posibilitatea miniaturizării structurii datorită amplasării acestora la nivelul cuplei.

11. Pentru acționarea unei singure cuple din lanțul cinematic deschis înseriat al brațului, fără a influența mișcările din celelate cuple, sunt folosite mecanismele de decuplare amplasate la nivelul fiecărei cuple care, de asemenea, îngreunează structura și limitează posibilitatea miniaturizării acesteia.

1.8.2. Aprecieri critice privind soluțiile constructive adoptate până în prezent

Roboții acționați prin fire au câteva avantaje foarte importante, însă și anumite limite în funcționare mai mult sau mai puțin severe în funcție de topologia structurii:

1. Precizia de poziționare și repetabilitatea la roboții cercetați reprezintă parametrii doar orientativ. La majoritatea structurilor cercetate, unde raportul lungime/diametru este mare, practic se fac doar orientări în spațiu ale brațului robotic și nu se poate vorbi despre o precizie de poziționare spațială. Acest fapt este cauzat de „calitatea” cuplelor cinematice din structura brațului (caracterul elastic) care sunt supuse simultan la solicitări complexe și diferite în funcție de configurația supusă solicitării la un moment dat.

2. Sistemele de acționare utilizate la brațele robotice cercetate nu sunt realizate în buclă închisă și nu sunt constituite în axe controlate, astfel explorarea controlată și programată a spațiului de lucru nu poate fi realizată cu precizie.

3. Acționarea pneumatică/hidraulică întâlnită la unele structuri tip „trompă de elefant” nu asigură potențial de a obține precizie de poziționare spațială datorită dificultăților mari de a realiza o axă controlată cu bucla de reacție.

4. La majoritatea structurilor robotice cercetate se remarcă pe lângă realizarea unei precizii grosiere și lipsa de control a formei spațiale a brațului robotic tip „trompă de elefant” în orice moment, situație impusă de majoritatea aplicațiilor din domeniul medical și nu numai.

5. O consecință a lipsei preciziei de poziționare spațiale, cât și a controlului formei spațiale a brațului tip „trompă de elefant” a încetinit extinderea utilizării acestor roboți în domeniul ingineriei industriale, la executarea găurilor curbe spațiale, la controlul suprafețelor interioare spațiale etc.

6. Din cercetările efectuate se observă că majoritatea preocupărilor privind brațele robotice tip „trompă de elefant” au fost îndreptate mai mult spre găsirea de noi brațe robotice care să reducă diametrul și să crească lungimea și mult mai puțin asupra creșterii preciziei de poziționare spațiale.

1.8.3. Obiective propuse în vederea întocmirii tezei de doctorat

- Stabilirea de noi structuri pentru brațul robotic tip „trompă de elefant” în scopul minimizării brațului robotic și pentru realizarea orientării spațiale de precizie.

- Dezvoltarea modelului matematic pentru analiza cinematică a noilor structuri de brațe robotice tip „trompă de elefant”.

- Îmbunătățirea sistemului de acționare și ghidare în scopul creșterii preciziei de poziționare spațială.

2. Cercetări teoretice privind determinarea influenței variației parametrilor geometrici asupra preciziei de poziționare

Brațele robotice cu structură articulată tip „trompă de elefant” au apărut ca urmare a necesității realizării unor mișcări complexe în spațiul de lucru și pătrunderea brațului în spații înguste. Toate axele de rotație comandate au erori în poziționarea unghiulară a cuplelor care cresc pe măsură ce unghiul de rotație este mai mare, se cumulează de-a lungul brațului datorită cuplelor legate în serie și limitează precizia de poziționare [7, 67]. Totuși, structurile constructive noi ale brațelor robotice poliarticulate demonstrează o îmbunătățire continuă a repetabilității, și cu metodele de calibrare potrivite pot conduce la creșterea preciziei de poziționare de până la două – trei ori repetabilitatea [106]. În acest context, s-au efectuat cercetări intense privind cinematica și dinamica brațelor multi-articulate, studiile fiind axate asupra anumitor influențe precum: studiul cinematicii inverse [2, 16, 87], rigiditatea structurii [119], jocurile în cuplele articulare [74, 124], frecarea în cuple [117]. De asemenea, au fost dezvoltate dispozitive automate complexe pentru corecția și controlul poziției elementului mobil [2, 84]. Însă, cercetări privind influența abaterilor dimensionale ale elementelor constitutive ale brațului robotic tip „trompă de elefant” au fost mai puțin abordate.

Determinarea analitică a poziției organului terminal de la brațul robotic tip „trompă de elefant” într-un punct se realizează plecând de la modelul geometric direct conform fig.2.1.

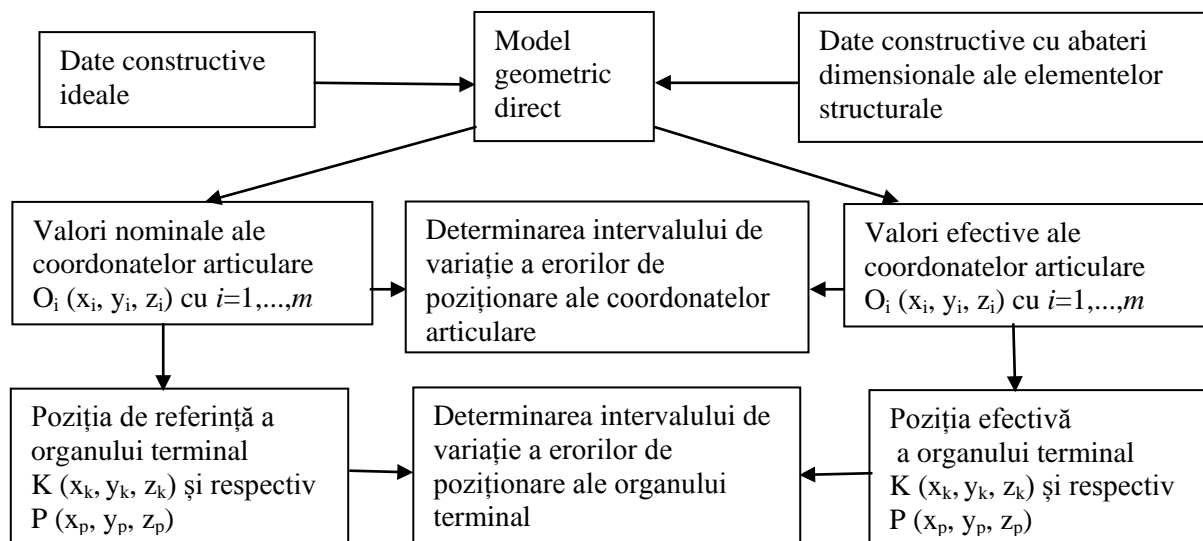


Fig.2.1. Schema bloc de determinare a preciziei de poziționare afectată de abaterile dimensionale ale elementelor structurale

Conform STAS 9283 [27] precizia de poziționare unidirecțională la roboți reprezintă diferența dintre poziția nominală (comandată) și baricentrul norului de puncte atinse (media poziționării atinse) când apropierea de poziționarea comandată se face din aceeași direcție.

2.1. Analiza pozițională a brațului robotic tip „trompă de elefant”

Analiza pozițională în funcție de variația dimensiunilor elementelor componente din structura brațului robotic presupune determinarea modelului geometric direct și invers. Pentru a pune în evidență precizia de poziționare a brațului robotic tip „trompă de elefant” se determină în continuare parametrii de poziționare în cazul a două structuri diferite.

2.1.1. Modelul geometric direct al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 8 grade de mobilitate

Geometria lanțului cinematic spațial al brațului robotic tip „trompă de elefant” având cuple cinematice de clasă a IV-a, fig.2.1.1.(a), este descrisă prin atașarea unui sistem de coordonate ortogonal $O_i X_i Y_i Z_i$ în centrul fiecărei cuple cinematice i de clasă a IV-a care este o cuplă sferică ce se poate roti în două plane perpendiculare, fig.2.1.1.(b). Se stabilește sistemul de bază fix $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ al modelului în partea inferioară a structurii, după care din aproape în aproape se stabilesc sistemele de referință aferente cuplelor, raportate la sistemul de referință anterior stabilit în funcție de parametrii constructivi și cinematici ai structurii.

De asemenea, se atașează sistemul de coordonate $O_5 X_5 Y_5 Z_5$ în punctul de extremitate al organului terminal, respectiv punctul caracteristic $K(x_K y_K z_K)$. Poziționările organului terminal sunt definite de matricea totală de trecere $[M_{50}]$, relația (2.1.1).

$$[M_{50}] = [T_{10}^{(z)}] \cdot [R_{10}^{(x)}] \cdot [R_{10}^{(y)}] \cdot [T_{21}^{(z)}] \cdot [R_{21}^{(x)}] \cdot [R_{21}^{(y)}] \cdot [T_{32}^{(z)}] \cdot [R_{32}^{(x)}] \cdot [R_{32}^{(y)}] \cdot [T_{43}^{(z)}] \cdot [R_{43}^{(x)}] \cdot [R_{43}^{(y)}] \cdot [T_{54}^{(z)}] \quad (2.1.1)$$

Matricele $[R_{i,i-1}^{(x)}]$ și $[R_{i,i-1}^{(y)}]$ reprezintă matricele de rotație pe direcția axei X și respectiv pe direcția axei Y a cuplei i față de originea sistemului $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$, relația (2.1.2).

$$[R_{i,i-1}^{(x)}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{xi} & -\sin \theta_{xi} & 0 \\ 0 & \sin \theta_{xi} & \cos \theta_{xi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [R_{i,i-1}^{(y)}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{yi} & 0 & \sin \theta_{yi} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{yi} & 0 & \cos \theta_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

Matricea $[T_{i,i-1}^{(z)}]$ reprezintă matricea translație pe direcția axei Z a originii sistemului $O_i X_i Y_i Z_i$ față de originea sistemului $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$, iar $[T_{54}^{(z)}]$ reprezintă matricea translație a

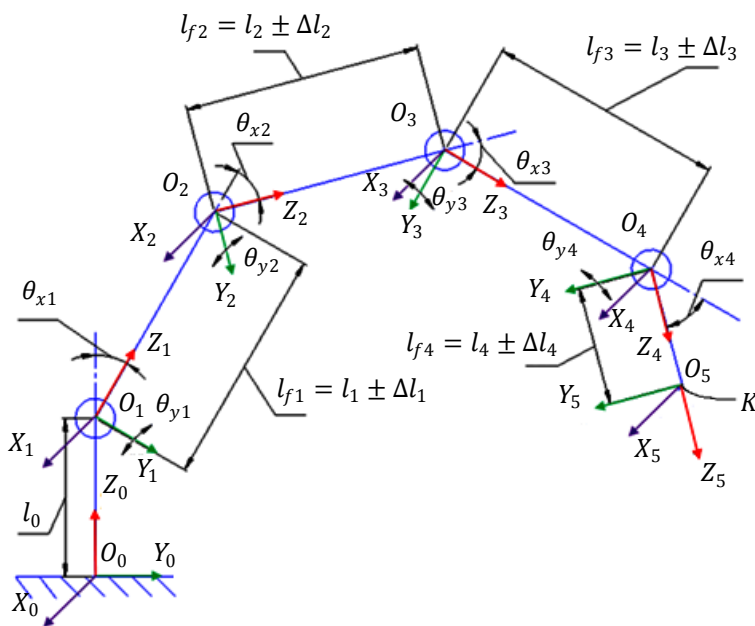


Fig.2.1.1.(a). Geometria lanțului cinematic al brațului robotic cu 8 grade de mobilitate având cuple cinematice de clasă a IV-a

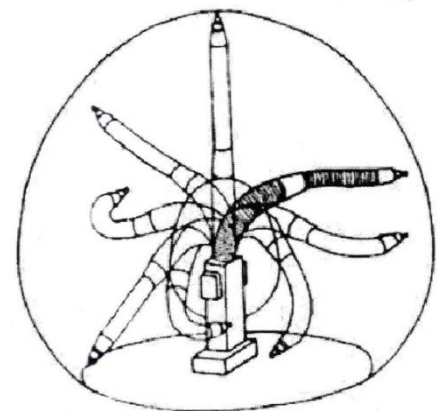


Fig.2.1.1.(b) Poziții intermediare ale brațului având cuple cinematice de clasă a IV-a [128]

originii sistemului $O_5X_5Y_5Z_5$ atașat elementului final al brațului (punctului caracteristic K) față de originea sistemului cuplei 4, respectiv $O_4X_4Y_4Z_4$, relația (2.1.3).

$$\begin{bmatrix} T_{i,i-1}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{f,i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} T_{54}^{(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{f4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.3)$$

Ecuțiile obținute sunt folosite pentru a stabili analitic influența abaterilor sistematice a parametrilor geometrici din cuple asupra preciziei de poziționare prin simulare numerică în cadrul limbajului de calcul MatLab.

2.1.2. Modelul geometric direct al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate

Geometria lanțului cinematic spațial al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate din fig.2.1.2 este descrisă prin atașarea unui sistem de coordonate ortogonal $O_iX_iY_iZ_i$ în centrul fiecărei cuple cinematice i ($i=1,\dots,5$) de clasă a V-a care permit rotația față de axa X și o cuplă pentru rotația întregului braț robotic față de axa Z. Punctului P de la extremitatea organului terminal, i se atașează sistemul de coordonate $O_6X_6Y_6Z_6$.

Modelul brațului robotic, în acest caz, este descris de matricea omogenă totală de trecere $[M_{60}]$, relația (2.1.17). Matricele $[R_{i,i-1}^{(x)}]$ și $[R^{(z)}]$ reprezintă matricele de rotație pe direcția X și respectiv, pe direcția Z a cuplei i față de originea sistemului $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$, relația (2.1.18).

$$M_{60} = [R^{(z)}] \cdot [T_{10}^{(z)}] \cdot [R_{10}^{(x)}] \cdot [T_{21}^{(z)}] \cdot [R_{21}^{(x)}] \cdot [T_{32}^{(z)}] \cdot [R_{32}^{(x)}] \cdot [T_{43}^{(z)}] \cdot [R_{43}^{(x)}] \cdot [T_{54}^{(z)}] \cdot [R_{54}^{(x)}] \cdot [T_{65}^{(z)}] \quad (2.1.17)$$

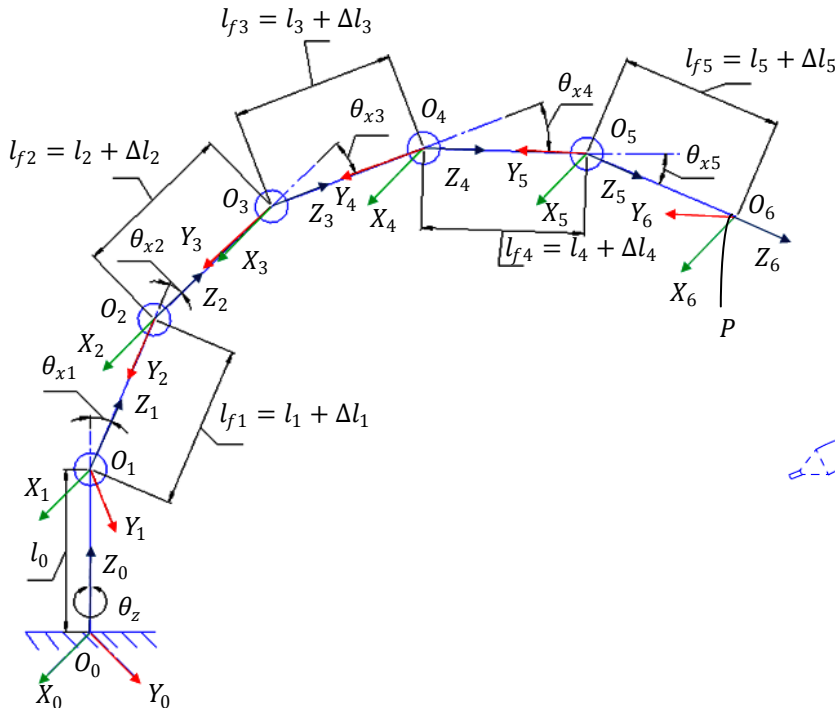


Fig.2.1.2.a. Geometria lanțului cinematic al brațului robotic cu 6 grade de mobilitate având cuple cinematice de clasă a V-a

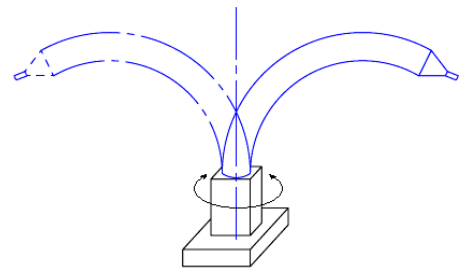


Fig.2.1.2.b Poziții intermediare ale brațului având cuple cinematice de clasă a V-a

Elementele matricelor omogene totale de trecere de la structura brațului robotic cu 6 grade de mobilitate sunt definite de unghiurile de rotație ale cuplelor cinematice motoare și de distanțele dintre cuple. Se poate observa din ecuațiile anterioare că abateri ale unghiurilor de rotație și/sau a distanțelor dintre cuple afectează precizia de poziționare și de orientare a organului terminal. Ecuațiile obținute în cazul brațului robotic având cuple cinematice de clasă a V-a au putut fi aduse sub o formă simplificată care permite stabilirea influenței abaterilor parametrilor geometrici ai cuplelor asupra preciziei de poziționare a organului terminal. Din ecuațiile de poziționare se observă că abaterile unghiurilor de rotație a cuplelor care se află spre extremitatea brațului robotic afectează cel mai puțin precizia de poziționare atunci când rotația tuturor cuplelor este în aceeași direcție.

2.2. Modelul geometric invers al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate

Abateri unghiulare variabile de la nivelul articulațiilor se transmit la organul terminal afectând precizia acestuia de poziționare cu variații elementare Δx_P , Δy_P , Δz_P ale coordonatelor punctului P atașat. Pentru determinarea poziției organului terminal în funcție de abaterile unghiulare $\Delta\theta_{f_i}$ se parcurg o serie de etape pornind de la algoritmul de calcul de la problema inversă a deplasărilor finite conform fig.2.5.2.

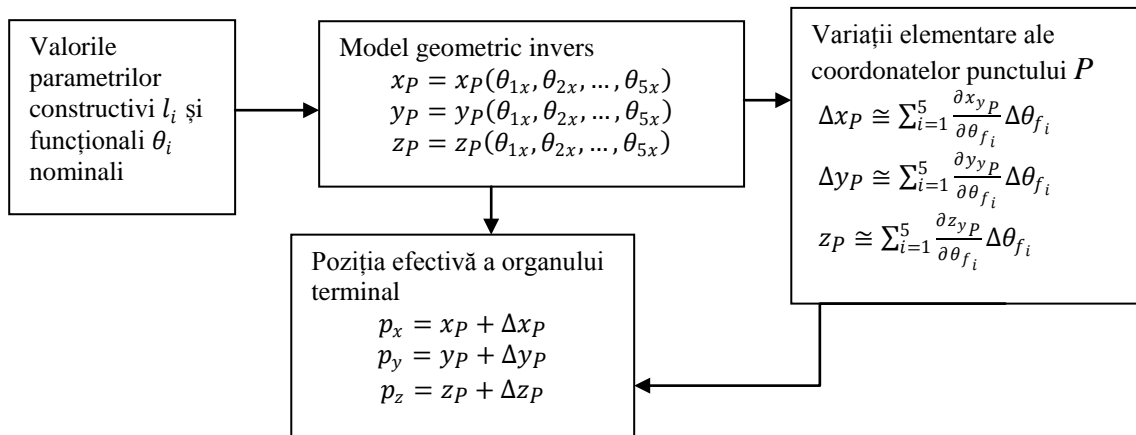


Fig.2.5.2. Schema bloc de determinare a preciziei de poziționare afectată de abaterile unghiulare $\Delta\theta_{f_i}$

În cadrul modelului geometric invers al brațului robotic tip „trompă de elefant” se determină legile de variație ale coordonatelor generalizate ale brațului, fiind cunoscute caracteristicile geometrice ale acestuia și legile de variație ale pozițiilor absolute a punctului caracteristic, respectiv ale punctului atașat organului terminal $P(x_P, y_P, z_P)$.

Se consideră schema cinematică structurală a brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate din fig.2.1.2 prezentată în subcapitolul 2.1.2. Pentru a determina influența abaterilor unghiulare $\Delta\theta_{f_i}$ trebuie ca poziția punctului atașat organului terminal să fie raportată la sistemele de referință atașate articulațiilor.

Astfel, putem scrie forma generalizată pentru coordonatele de poziționare ale punctului P de la brațul robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate, definite de coordonatele sistemului de referință $O_6X_6Y_6Z_6$ față de baza brațului robotic $O_0X_0Y_0Z_0$, conform relației (2.2.13).

$$x_6 = 0 \quad (2.2.13)$$

$$y_6 = \frac{l_0}{\sin \theta_1 + \cos^2 \theta_1} \cdot \cos \sum_{i=0}^4 \theta_{i+1} - l_1 \cdot \sin \sum_{i=1}^4 \theta_{i+1} - l_2 \cdot \sin \sum_{i=2}^4 \theta_{i+1} - l_3 \cdot \sin \sum_{i=3}^4 \theta_{i+1} - l_4 \cdot \sin \theta_5$$

$$z_6 = \frac{l_0}{\sin \theta_1 + \cos^2 \theta_1} \cdot \sin \sum_{i=0}^4 \theta_{i+1} - l_1 \cdot \cos \sum_{i=1}^4 \theta_{i+1} - l_2 \cdot \cos \sum_{i=2}^4 \theta_{i+1} - l_3 \cdot \cos \sum_{i=3}^4 \theta_{i+1} - l_4 \cdot \cos \theta_5 - l_5$$

Având date coordonatele de poziționare ale punctului P atașat organului terminal de la brațul robotic cu 6 grade de mobilitate se pot determina mișcările de rotație ale cuplelor cu ajutorul ecuațiilor de poziționare determinate prin analiza cinematicii inverse a brațului, respectiv ecuațiile 2.2.12. În cazul nostru avem 5 necunoscute, unghiurile θ_{ix} , și 2 ecuații, cele ce definesc coordonatele y_6 și z_6 . Pentru valori cunoscute ale coordonatelor punctului P , mișcările de rotație ale cuplelor date de unghiurile θ_{ix} nu au o soluție unică. Astfel, sistemul de ecuații (2.2.13) are o infinitate de soluții și se impun restricții suplimentare pentru determinarea unică a mișcărilor de rotație a cuplelor. Cinematica inversă a brațelor robotice flexibile cu număr mare de grade de mobilitate a fost tratată de mai multe colective de cercetători și s-au stabilit metode de simplificare pentru determinarea soluțiilor unice [124]. Ecuațiile obținute pot fi folosite pentru studiul analitic al influenței abaterilor sistematice $\Delta\theta_{ix}$ asupra preciziei de poziționare.

2.3. Cercetări privind determinarea influenței abaterilor liniare asupra preciziei de poziționare într-un punct la brațul robotic tip „trompă de elefant”

În practică, execuția elementelor componente din structura brațului robotic este realizată într-o clasă de precizie căreia îi corespund abateri cu anumite câmpuri de toleranță de ordinul micrometrilor specifice clasei de precizie. Erorile de natură geometrică ale elementelor constructiv structurale de la brațul robotic tip „trompă de elefant” influențează precizia poziționării și orientării organului terminal. În cadrul studiului se consideră valorile abaterilor limită ale dimensiunilor liniare, respectiv abaterea superioară și abaterea inferioară, în clasa de precizie 7. Conform SR EN 20 286 - 1:1997, pentru dimensiunea nominală $l_i=50 \text{ mm}$ vom avea în clasa de precizie IT7 un câmp de toleranță de $\pm 25 \mu\text{m}$. Pentru a scoate în evidență influența abaterilor asupra preciziei de poziționare în funcție de clasa de precizie în care se prelucrează elementele componente din structura brațului robotic tip „trompă de elefant” s-au studiat erorile de poziționare și ponderea lor în cuple și pentru clasa de precizie IT6 respectiv IT8.

Abaterile liniare aferente câmpului de toleranță sunt mărimi statice care determină erori sistematice de poziționare ale organului terminal. Influența abaterilor liniare ferente câmpului de toleranță Δl_i ($i=0,1,2,3,4,5$) asupra preciziei de poziționare de la brațul robotic tip „trompă de elefant” se determină analitic folosind ecuațiile de poziționare determinate prin analiza cinematicii directe. Astfel, se consideră în cadrul matricei de translație parametrul l_{f_i} care reprezintă suma dintre distanța nominală între cuple l_i și abaterea liniară Δl_i . Iar matricea de translație $\left[T_{f_{i+1,i}}^{(z)} \right]$ care definește trecerea de la sistemul de coordonate $O_i X_i Y_i Z_i$ la sistemul de coordonate $O_{i+1} X_{i+1} Y_{i+1} Z_{i+1}$ este dată de relația (2.3.1).

$$\left[T_{f_{i+1,i}}^{(z)} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{f_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_i + \Delta l_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

Matricea omogenă totală de trecere devine $[M_{f_{60}}]$ conform relației (2.3.2):

$$\begin{aligned} [M_{f_{60}}] &= \begin{bmatrix} n_{f_x} & s_{f_x} & a_{f_x} & p_{f_x} \\ n_{f_y} & s_{f_y} & a_{f_y} & p_{f_y} \\ n_{f_z} & s_{f_z} & a_{f_z} & p_{f_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= [R^{(z)}] \cdot [T_{f_{10}}^{(z)}] \cdot [R_{10}^{(x)}] \cdot [T_{f_{21}}^{(z)}] \cdot [R_{21}^{(x)}] \cdot [T_{f_{32}}^{(z)}] \cdot [R_{32}^{(x)}] \cdot [T_{f_{43}}^{(z)}] \cdot [R_{43}^{(x)}] \cdot \\ &\cdot [T_{54}^{(z)}] \cdot [R_{54}^{(x)}] \cdot [T_{f_{65}}^{(z)}] \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Variațiile abaterilor Δl_i se introduc în matricea omogenă totală de trecere $[M_{50}]$, ecuația (2.1.4), pentru determinarea analitică a poziției punctului caracteristic, respectiv $p_{x,efectiv}$, $p_{y,efectiv}$ și $p_{z,efectiv}$ în raport cu originea sistemului fix $O_0X_0Y_0Z_0$ pentru fiecare caz considerat anterior. Erorile de poziționare ale punctului caracteristic P se definesc prin diferența dintre coordonatele de poziționare rezultate analitic și cele nominale din ecuația (2.3.3), respectiv $[P_{efectiv}] = [p_{x,efectiv} \ p_{y,efectiv} \ p_{z,efectiv}]^t$ și $[P] = [p_x \ p_y \ p_z]^t$, date sub forma vectorului coloană al erorilor $[\varepsilon_P] = [\varepsilon_{x,P} \ \varepsilon_{y,P} \ \varepsilon_{z,P}]^t$.

$$[\varepsilon_P] = [P_{efectiv}] - [P] = \begin{bmatrix} p_{x,efectiv} - p_x \\ p_{y,efectiv} - p_y \\ p_{z,efectiv} - p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x,P} \\ \varepsilon_{y,P} \\ \varepsilon_{z,P} \end{bmatrix} \quad (2.3.3)$$

Erorile de poziționare $\varepsilon_{x,P}$, $\varepsilon_{y,P}$ și $\varepsilon_{z,P}$ obținute efectiv reprezintă un interval de erori care variază între un minim și un maxim. În fig.2.3.1 s-au reprezentat erorile maxime de poziționare în modul ale punctului P , raportate la un sistem de referință fix.

Abaterea medie pătratică sau rădăcina pătrată a erorilor de poziționare a punctului P va fi dată de relația (2.3.4)

$$\Delta_P = \sqrt{\varepsilon_{x,P}^2 + \varepsilon_{y,P}^2 + \varepsilon_{z,P}^2} \quad (2.3.4)$$

În cazul brațului robotic cu 6 grade de mobilitate, vectorul de poziție al punctului K atașat organului terminal este $[K_{efectiv}] = [k_{x,efectiv} \ k_{y,efectiv} \ k_{z,efectiv}]^t$ și prezintă variații ale preciziei de poziționare. Poziția nominală a punctului K este dată de matricea coloană $[K] = [k_x \ k_y \ k_z]^t$ din cadrul matricei totale de trecere omogenă $[M_{60}]$, relația (2.1.17). Precizia de poziționare a brațului robotic tip „trompă de elefant” va fi dată de matricea coloană a erorilor de poziționare $[\varepsilon_K] = [\varepsilon_{x,K} \ \varepsilon_{y,K} \ \varepsilon_{z,K}]^t$ care reprezintă diferența dintre vectorul de poziție efectivă $[K_{efectiv}]$ și vectorul de poziție nominal $[K]$ conform relației (2.3.5).

$$[\varepsilon_K] = [K_{efectiv}] - [K] = \begin{bmatrix} p_{f_x} - p_x \\ p_{f_y} - p_y \\ p_{f_z} - p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x,K} \\ \varepsilon_{y,K} \\ \varepsilon_{z,K} \end{bmatrix} \quad (2.3.5)$$

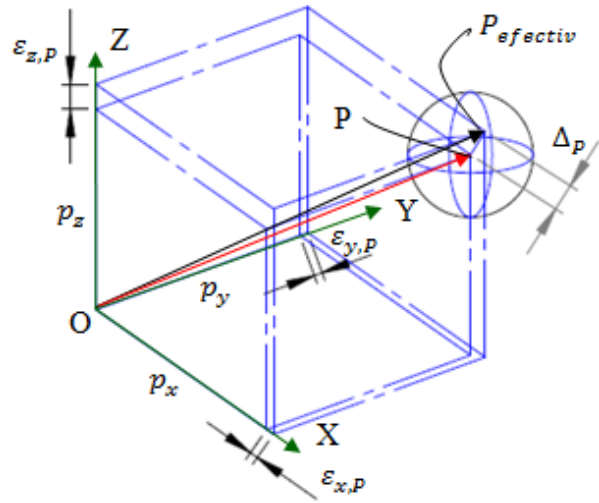


Fig.2.3.1. Precizia de poziționare unidirecțională a punctului P afectată de erori sistematice

Erorile de poziționare $\varepsilon_{x,K}$, $\varepsilon_{y,K}$ și $\varepsilon_{z,K}$ obținute în practică sunt un interval de erori al căror maxim în modul s-a reprezentat în fig.2.3.2 raportate la un sistem de referință fix.

Abateră medie pătratică sau rădăcina pătrată a erorilor de poziționare a punctului K va fi dată de relația (2.3.6).

$$\Delta_K = \sqrt{\varepsilon_{x,K}^2 + \varepsilon_{y,K}^2 + \varepsilon_{z,K}^2} \quad (2.3.6)$$

Ecuția (2.3.6) definește precizia maximă de poziționare afectată de abaterile sistematice ΔI_i .

2.4. Cercetări privind determinarea spațiului de lucru al brațului robotic cu 6 grade de mobilitate

Spațiul de lucru al brațului robotic este definit prin intermediul matricei omogene totale de trecere raportată la sistemul de referință atașat bazei fixe a robotului. În alte cazuri în care robotului i se adaugă o axă suplimentară de mișcare (cale de rulare), poziția sistemului atașat bazei robotului se va modifica pe parcursul procesului de lucru. Situația piesei în spațiul de lucru este definită în raport cu dispozitivele de prindere/fixare, benzile transportoare sau platformele rotative din spațiul de lucru al robotului. Matematic, este reprezentată de transformarea ce are loc între sistemul de referință atașat piesei și sistemul de referință al celei robotizate.

Determinarea dimensiunilor spațiului de lucru de la brațul robotic tip „trompă de elefant” se poate realiza implementând algoritmul de modelare în limbajul de calcul MatLab conform schemei descrise în fig.2.4.1.

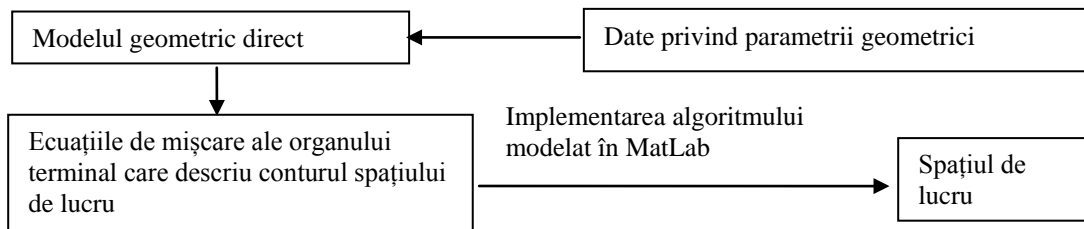


Fig.2.4.1. Schema bloc a metodei de determinare a spațiului de lucru al brațului robotic

Pentru stabilirea ecuațiilor de mișcare ale organului terminal care descriu conturul spațiului de lucru de la brațul robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate se ține cont de mișcarea cuplurilor cinematice de clasă a V-a, respectiv: mișcarea de rotație după direcția axei X cu unghiul α_1 a primelor patru cuple (1)-(4), mișcarea de rotație după direcția axei X cu unghiul α_5 a cuplei (5), mișcarea de rotație a întregului braț robotic cu unghiul α_z , și de distanțele dintre cuple, considerate egale între ele, de lungime l , conform fig.2.4.2.

Ecuțiile de poziționare a organului terminal determinate pentru punctele B, C, D, E, F, G și H pot fi folosite pentru a determina spațiul erorilor sistematice de poziționare. Introducând în ecuații valorile erorilor sistematice se obțin ecuațiile de poziționare efective ale organului terminal de pe conturul spațiului de lucru.

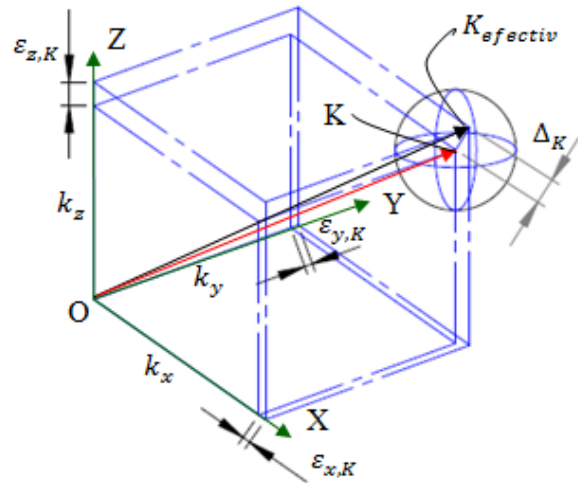


Fig.2.3.2. Precizia de poziționare unidirecțională a punctului K afectată de erori sistematice

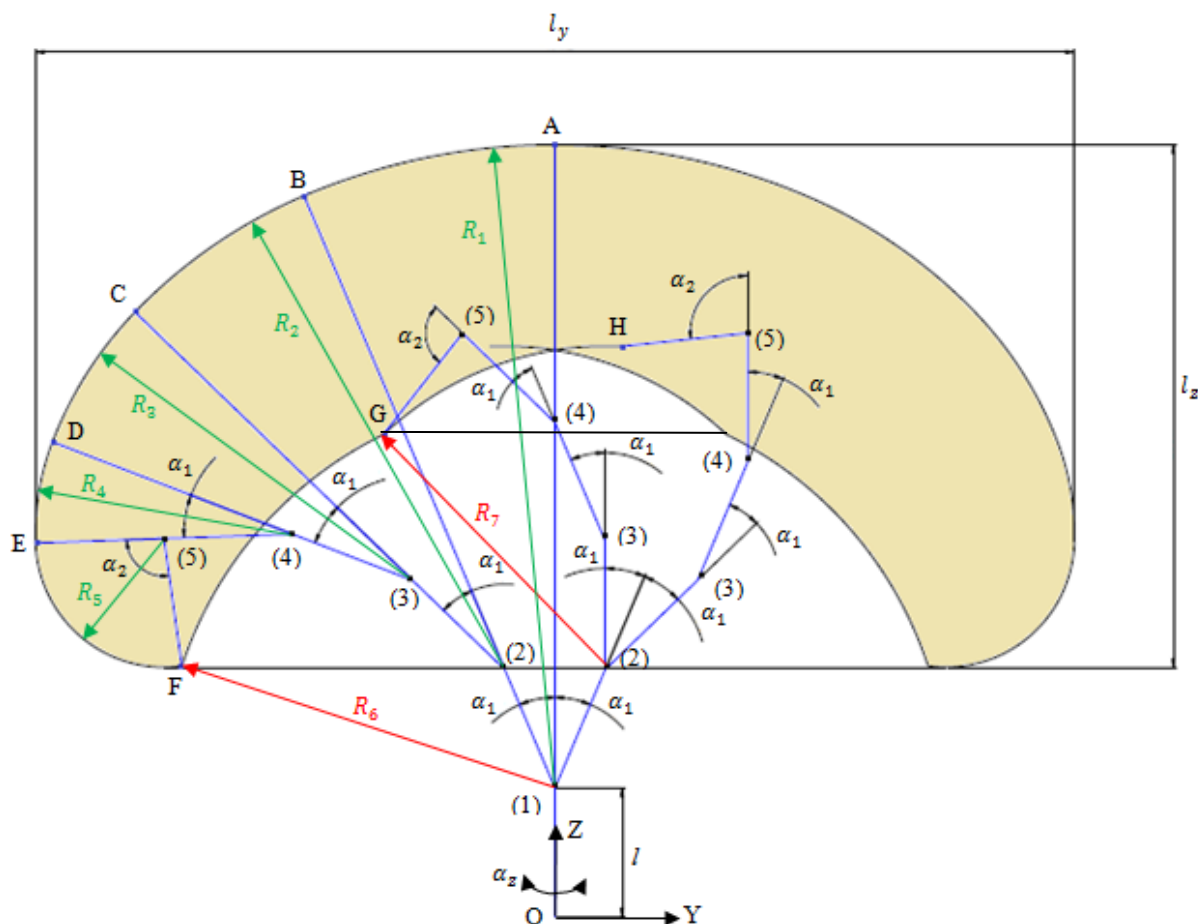


Fig.2.4.2. Spațiul de lucru al brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate

Astfel, diferența dintre poziționările efective și cele nominale obținute la poziționarea organului terminal pe conturul spațiului de lucru definește conturul spațiului erorilor de poziționare sistematice.

Concluzii:

- Studiul influenței abaterilor liniare Δl_i asupra preciziei de poziționare oferă posibilitatea determinării variației erorilor sistematice de poziționare a organului terminal de la brațul robotic tip „trompă de elefant” încă din faza de proiectare constructivă.
- Din rezultatele cercetărilor teoretice se constată că abaterile dimensionale ale distanțelor mai apropiate de organul terminal, au o influență crescută asupra preciziei de poziționare.
- Gradul de influență al abaterilor dimensionale asupra preciziei de poziționare este variabil în spațiul de lucru. Acest aspect este evidențiat prin modificarea parametrului ε_p în raport cu unghiul θ_{ix} .
- Optimizarea finală a structurii brațului robotic din punct de vedere al abaterilor dimensionale se va face după terminarea operațiilor de prelucrare a elementelor constitutive, în acest fel se vor cunoaște efectiv abaterile dimensionale și pe baza lor se vor stabili valorile de corecție pentru sistemul de control.

3. Cercetări privind îmbunătățirea preciziei de poziționare la brațele robotice tip „trompă de elefant”

Brațele robotice tip „trompă de elefant” au structura realizată din cuple cinematice legate în serie și flexibilitate în poziționare. Folosirea cablurilor sau a firelor pentru acționarea cuplelor unor astfel de structuri este adoptată pentru a acționa cuplele de la distanță, actorii fiind montați la baza brațului robotic conferă o greutate mai mică brațului. Acționarea prin sisteme de transmisie fir-scripete cu firele dispuse în interiorul structurii prezintă avantajul că brațul robotic poate avea diametre foarte mici și, astfel, posibilitatea pătrunderii în spații foarte înguste [41].

La brațe robotice cu structură similară trompei de elefant unde pentru acționarea cuplelor se folosesc un număr mai mic de actuatori decât numărul cuplelor se pune problema controlului mișcării prin intermediul unui cablu sau a unui tub elastic introdus în interiorul structurii brațului [68, 70, 124]. Alte tipuri de brațe robotice cu structură asemănătoare „trompei de elefant” folosesc dispozitive PID pentru a compensa erorile de poziționare a căror sursă nu poate fi indentificată, [19, 38, 93]. Mai multe colective de cercetători au dezvoltat diferite metode de îmbunătățire a sistemului de comandă în buclă închisă și de control prin dispozitive PID [6, 51, 62, 116] sau control dinamic al poziționărilor [18] pentru a crește precizia de mișcarea după o traiectorie dată și de poziționare a brațelor robotice cu structură tip „trompă de elefant”. Elasticitatea firelor de acționare și frecările acestora cu suprafețele de contact aduc în atenție problema optimizării preciziei de poziționare prin compensarea erorilor date de deformația elastică a firelor [60, 81, 101].

Problematika determinării și compensării erorilor de poziționare sistematice a cuplelor datorate frecărilor sistemului fir-scripete cu proprietăți motoare este tratată în acest capitol pentru structura particulară a unui braț robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate.

3.1. Cercetări privind structura acționării și transmisiei axelor controlate la articulațiile tip cuplă cinematică de clasă a V-a

Structura celor cinci cuple cinematice de clasă a V-a de la brațul robotic tip „trompă de elefant” considerat pentru cercetare permite mișcarea de rotație θ_{ix} după direcția axei X prin intermediul unor fire prinse de cilindrul de rază R_c prin bolțurile diametral opuse în interiorul structurii conform fig.3.1. Fiecărei cuplei C_i ($i=1, \dots, 5$) îi corespunde un ghidaj G_i prin interiorul căruia trec firele de acționare a cuplelor $i+1$. Structura de comandă în buclă închisă este formată din circuite independente pentru fiecare grad de mobilitate.

Mecanismul de acționare al cuplelor C_i este un mecanism de transmitere tangențială a mișcării prin fire și un sistem scripete cu proprietăți motoare ce este fixat pe axul de ieșire al unui reductor. Axul reductorului este legat de roata canelată (scripete) care transmite mișcarea de rotație către cupla cinematică prin intermediul a două fire prinse de aceasta și de cuplă. Mecanismul de acționare de acest tip este specific brațelor robotice tip „trompă de elefant” însă introduce erori datorită jocurilor și deformațiilor elastice. Problematika determinării și compensării erorilor sistematice datorate sistemului scripete cu proprietăți motoare este tratată în subcapitolul 3.4.

Sistemul de acționare al unei axe de la brațului robotic tip „trompă de elefant” este format dintr-un servomotor cu turație variabilă (M_i), care deplasează printr-o mișcare unghiulară axa (cupla) i a brațului robotic și permite un sistem de control în buclă închisă. Fiecărei axe de mișcare îi corespunde o masă pe care o deplasează și un moment de inerție. Momentele de inerție sunt proporționale cu vitezele de deplasare al axelor.

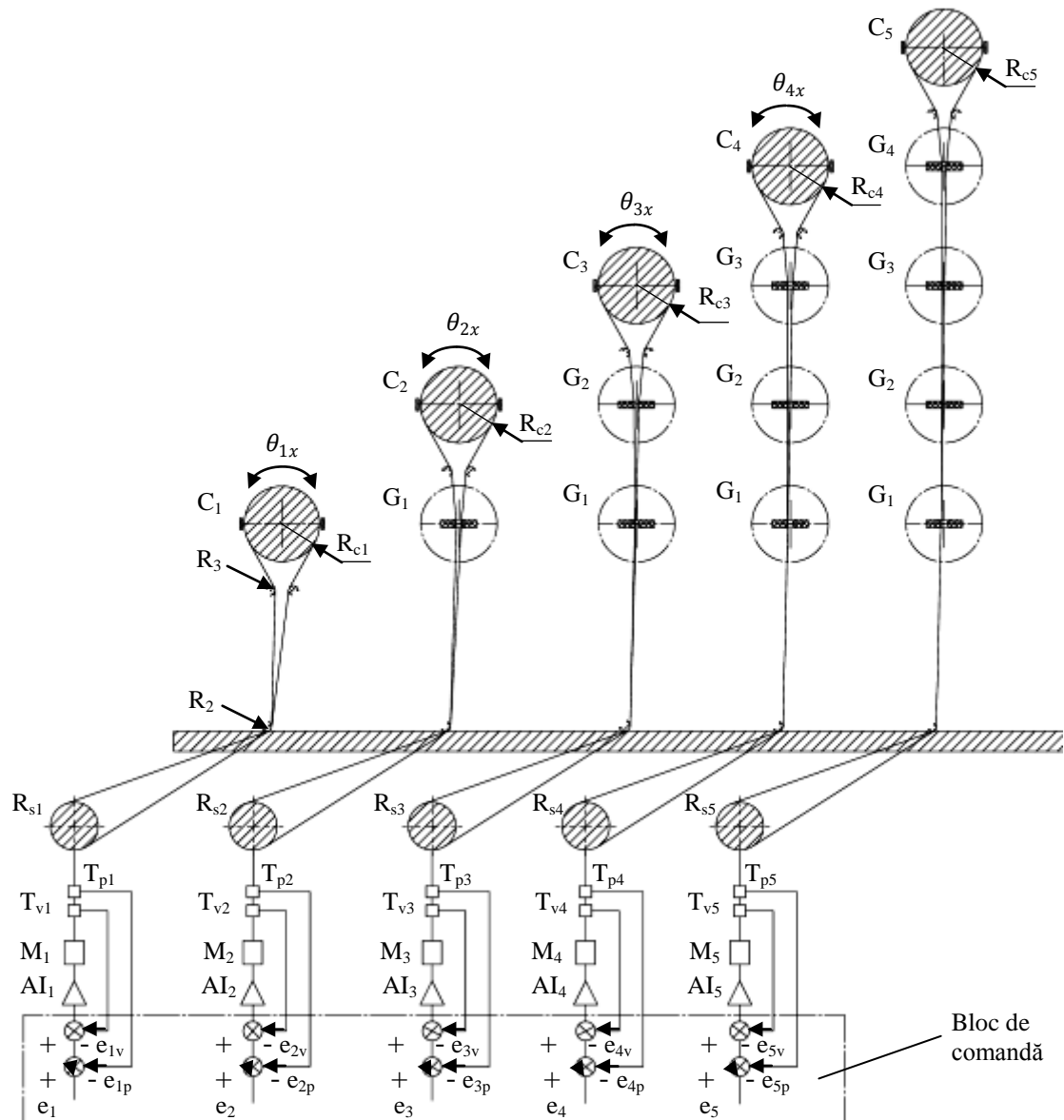


Fig.3.1. Schema bloc de comandă a axelor de mișcare

e_i -impuls de intrare; e_{ip} - impuls de ieșire din bucla de poziție; e_{iv} - impuls de ieșire din bucla de viteză;
 M_i -servomotor; T_{vi} -traductor de viteza; T_{pi} -traductor de poziție; C_i -cupla i a brațului robotic

Concluzii. Acționarea cuplei cinematice prin interiorul acesteia cu ajutorul unui sistem scripete cu fire tensionate oferă posibilitatea micșorării diametrului brațelor robotice de acest tip. Modulul de acționare al acestor brațe robotice este constituit din servomotoare de c.a. care acționează firele în mod controlat, în buclă închisă. În acest fel pot fi realizate brațe robotice tip „trompă de elefant” cu diametre foarte mici și cu posibilitatea poziționării spațiale cu precizie.

3.2. Cercetări privind variația în lungime a firelor folosite la acționarea cuplelor brațului robotic tip „trompă de elefant”

În timpul mișcării, brațul robotic tip „trompă de elefant” prezintă variații în lungime a firelor de acționare datorită pozițiilor variabile ale articulațiilor ce produc momente rezistente variabile. Variația în lungime a firelor apare ca urmare a înfășurării și desfășurării firelor pe suprafețele circulare ale elementelor componente din interiorul structurii. În cadrul structurii,

trecerea firelor de la scripetele amplasat pe axul reductorului, până la fusul cilindric al cuplei, este particulară fiecărei cuple cinematice. În fig.3.2.1 este prezentată poziția firelor în interiorul structurii brațului robotic după relizarea cursei maxime θ_{ix} a celor cinci cuple cilindrice, $i=1,\dots,5$.

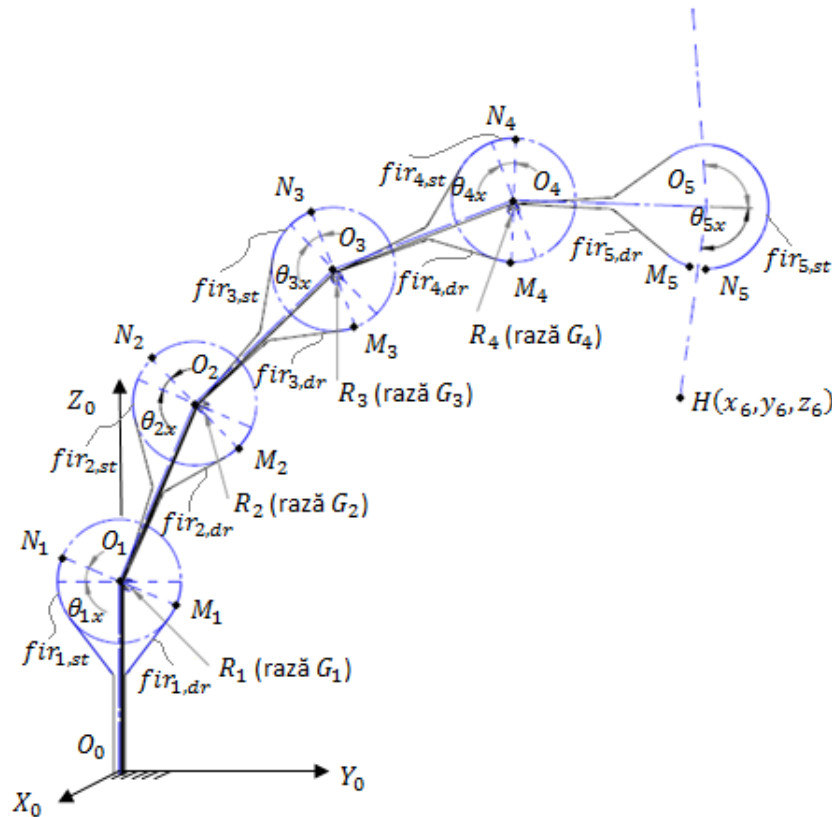


Fig.3.2.1. Înfășurarea firelor pe suprafețele circulare ale elementelor din structura brațului robotic tip „trompă de elefant”

Fiecare cuplă i este acționată de două fire, un fir pentru a roti cupla spre stânga și altul pentru a roti cupla spre dreapta, respectiv $fir_{i,st}$ și $fir_{i,dr}$ conform fig.3.2.1. Firele sunt prinse de fusul cilindric prin intermediul unor bolțuri în punctele N_i și M_i pentru $fir_{i,st}$ și respectiv $fir_{i,dr}$. De asemenea fiecare articulație i cu excepția articulației de la organul terminal, este prevăzută cu un ghidaj interior G_j de rază R_j ($j=1,\dots,4$) a cărui origine O_i a sistemului de coordonate cartezian este identic cu cel al articulației.

Se constată că lungimea firelor de acționare este variabilă în timpul mișcării datorită înfășurării și desfășurării pe suprafața de rază R_j a ghidajului G_j care își modifică poziția în timpul mișcării brațului robotic. În cazul primei cuple firele de acționare nu sunt supuse variațiilor în lungime deoarece suprafețele pe care le înfășoară de la scripete până la prinderea de cilindru cuplei nu își modifică poziția în timpul mișcării, respectiv sunt fixe. Firele de acționare a cuplelor în aval cuplei de la baza brațului robotic prezintă o variație în lungime a cărei mărime depinde de numărul ghidajelor din structura brațului pe care le înfășoară-desfășoară în timpul mișcării.

În subcapitolele următoare sunt analizate variațiile în lungime a firelor de acționare în mod particular pentru fiecare articulație.

3.2.5. Concluzii privind deformațiile lungimii firelor de acționare ca urmare a înfășurării-desfășurării pe suprafețele circulare dinamice

Pentru structura brațului robotic tip „trompă de elefant” având cuple cinematice de clasă a V-a se poate stabili forma generalizată a variațiilor lungimii firelor de acționare. Din

triunghiul $A_i O_i B_i$, fig.3.2.10, se determină lungimea segmentului $\overline{A_i B_i} = \overline{B_i C_i} = a_i$, folosind relația (3.2.20).

$$\operatorname{tg} \frac{\theta_i}{2} = \frac{a_i}{R_i} \rightarrow a_i = R_i \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_i}{2} \quad (3.2.20)$$

Indiferent de sensul de rotație al cuplei, lungimea teoretică a firelor de acționare a cuplei i de pe porțiunea dintre punctele A_i și C_i este suma segmentelor $A_i B_i$ și $B_i C_i$ conform relației (3.2.21).

$$\overline{A_i B_i} + \overline{B_i C_i} = 2a_i = 2R_i \cdot \operatorname{tg} \frac{|\theta_i|}{2} \quad (3.2.21)$$

Lungimea reală a firelor de pe porțiunea punctelor de tangentă A_i și C_i este lungimea arcului de cerc $A_i C_i$ dată de relația (3.2.22).

$$A_i C_i = \frac{\pi \cdot R_i \cdot |\theta_i|}{180^\circ} \quad (3.2.22)$$

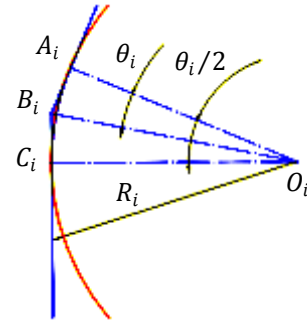


Fig.3.2.10. Înfășurarea firelor de acționare a cuplei C_{i+1} pe suprafața circulară de rază R_i a ghidajului G_i

Variația lungimii unui fir, ΔL_i , va fi dată de diferența dintre lungimea teoretică și lungimea reală a porțiunii ce întâlnește cele două puncte de tangentă A_i și C_i de pe suprafața ghidajelor anterioare cuplei i înfășurate conform relației (3.2.23). De asemenea, variația lungimii firului i de acționare a cuplei i depinde de numărul k de cuple rotite anterior cuplei analizate.

$$\Delta L_i = 2R_i \cdot \sum_{k=1}^{i-1} \operatorname{tg} \frac{|\theta_k|}{2} - \frac{2\pi R_i}{360^\circ} \sum_{k=1}^{i-1} |\theta_k| = 2R_i \left(\sum_{k=1}^i \operatorname{tg} \frac{|\theta_k|}{2} - \frac{\pi}{360^\circ} \sum_{k=1}^{i-1} |\theta_k| \right) \quad (3.2.23)$$

Variația lungimii firului ΔL_i introduce abateri ale mișcării de rotație $\Delta \theta_i$ conform relației (3.2.24).

$$\Delta \theta_i = \frac{360^\circ}{\pi \cdot R_i} \cdot \Delta L_i \quad (3.2.24)$$

Variațiile în lungime a firelor de acționare sunt distincte și particulare fiecărei cuple de la brațul robotic tip „trompă de elefant”. Aceste variații apar datorită înfășurării-desfășurării firelor pe suprafața circulară și interioară ghidajului, motiv pentru care raza suprafeței interioare ghidajului afectează variațiile în lungime a firelor de acționare în timpul mișcării cuplelor brațului robotic. Astfel, cu cât această rază este mai mare cu atât variația în lungime a firelor de acționare este mai mare.

De asemenea, variația în lungime a firelor de acționare este influențată de numărul cuplelor puse în mișcare anterior cuplei acționate. Astfel, cu cât numărul cuplelor anterioare celei acționate este mai mare cu atât variația în lungime a firelor de acționare este mai mare.

Rotației cuplelor respectiv parametrii cinematici θ_{ix} ($i = 1, \dots, 5$), influențează, de asemenea, variațiile în lungime a firelor de acționare a cuplelor, aflându-se într-un raport direct proporțional. Variația lungimii firelor de acționare influențează direct rigiditatea sistemului de transmitere a mișcării și implicit afectează precizia de poziționare a brațelor robotice tip „trompă de elefant”.

3.3. Cercetări privind influența deformației elastice a firelor asupra preciziei de poziționare a cuplelor brațului robotic tip „trompă de elefant”

La brațele robotice tip „trompă de elefant” unde acționarea cuplelor se face cu ajutorul firelor amplasate prin interiorul structurii brațului se pune problema rigidității firelor care

afectează precizia de poziționare a cuplelor. Un alt factor major care influențează precizia de poziționare a unei cuple este momentul rezistent calculat la nivelul cuplei și care depinde de: greutatea obiectului manipulat, greutatea elementelor în aval de cupla analizată și momentul rezistent propriu al cuplei.

Cei trei factori precizați au valori variabile:

- greutatea elementelor în aval își modifică „brațele” punctelor de aplicație în funcție de unghiul de rotire al fiecărei cuple;
- obiectele manipulate au valori diferite ale greutății și „brațe” diferite ce depind de unghiurile fiecărei cuple;
- momentul rezistent propriu fiecărei cuple depinde de variația primilor doi factori precizați anterior.

În fig.3.3.1 este prezentat schematic structura unui braț cu cinci cuple C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 și cu încărcarea aferentă: G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – greutatea elementelor; G_{OM} – greutatea variabilă a obiectului manipulat O.M.; M_{rp1-5} – momentul rezistent propriu al fiecărei cuple. De exemplu, determinarea momentului rezistent M_{r1} în cazul cuplei C_1 va fi:

$$M_{r1} = M_{rp1} + (G_1 \cdot l_1 + G_2 \cdot l_2 + G_3 \cdot l_3 + G_4 \cdot l_4 + G_5 \cdot l_5) + G_{OM} \cdot l_{OM} \quad (3.3.1)$$

Deoarece toți cei trei factori componenți ai lui M_{r1} sunt variabili pe întreaga cursă a cuplei C_1 , rezultă că deformația firelor care realizează acționarea cuplei C_1 va fi variabilă și în consecință precizia de poziționare va fi variabilă pe întreaga cursă.

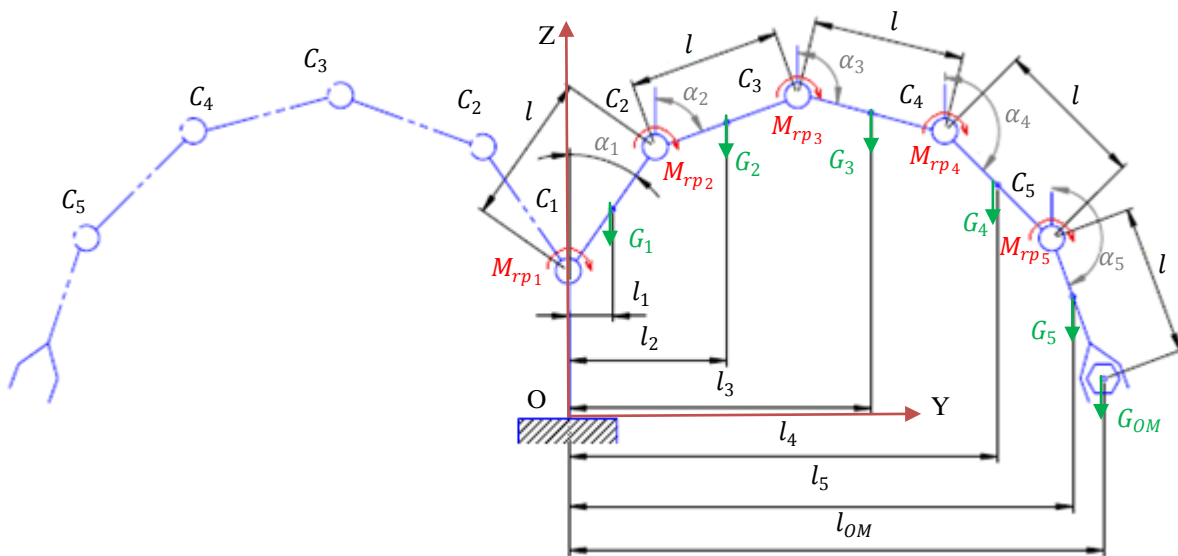


Fig.3.3.1. Structura unui braț robotic cu cinci articulații de clacă a V-a și încărcările aferente

Înlocuind în relația (3.3.6) valoarea variabilă a deformației elastice Δl_1 rezultă:

$$\Delta \alpha_1 = \frac{360^\circ}{\pi d_1} \cdot \frac{2}{d} \cdot \frac{L_1}{EA_f} \cdot \left[\begin{aligned} &M_{rp1} + G_1 \frac{l}{2} \sin \alpha_1 + G_2 \cdot l \left(\sin \alpha_1 + \frac{\sin \alpha_2}{2} \right) + \\ &G_3 \cdot l \left(\sum_{i=1}^2 \sin \alpha_i + \frac{\sin \alpha_3}{2} \right) + G_4 \cdot l \left(\sum_{i=1}^3 \sin \alpha_i + \frac{\sin \alpha_4}{2} \right) + \\ &G_5 \cdot l \left(\sum_{i=1}^4 \sin \alpha_i + \frac{\sin \alpha_5}{2} \right) + G_{OM} \cdot l \left(\sum_{i=1}^5 \sin \alpha_i + \sin \alpha_5 \right) \end{aligned} \right] \quad (3.3.7)$$

Relația (3.3.7) pune în evidență valoarea abaterii preciziei de poziționare a cuplei C_1 și are caracter variabil depinzând în mod direct de valorile unghiurilor α_i și de greutatea obiectului manipulat G_{OM} . Astfel, bucla de poziție a fiecărei cuple cinematice nu poate să compenseze automat aceste valori deoarece traductorul de poziție nu emite semnale în acest sens.

În cazul brațului robotic tip „trompă de elefant” cu geometria lanțului cinematic prezentat în subcapitolul 2.1.2, se ține cont de abaterea de rotație a cuplei 1, $\Delta\alpha_1$, în ecuațiile de poziționare finale iar unghiul de rotație al primei cuple devine $\theta_{1x} = \theta_1 + \Delta\alpha_1$ conform relațiilor (3.3.8 - 3.3.10).

$$p_{xf} = \sin \theta_z \cdot (\sin(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cdot l_5 + \sin(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot l_4 + \sin(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3) \cdot l_3 + \sin(\theta_{1x} + \theta_2) \cdot l_2 + \sin \theta_{1x} \cdot l_1) \quad (3.3.8)$$

$$p_{yf} = -\cos \theta_z \cdot (\sin(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cdot l_5 + \sin(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot l_4 + \sin(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3) \cdot l_3 + \sin(\theta_{1x} + \theta_2) \cdot l_2 + \sin \theta_{1x} \cdot l_1) \quad (3.3.9)$$

$$p_{zf} = \cos(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cdot l_5 + \cos(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot l_4 + \cos(\theta_{1x} + \theta_2 + \theta_3) \cdot l_3 + \cos(\theta_{1x} + \theta_2) \cdot l_2 + \cos \theta_{1x} \cdot l_1 + l_0 \quad (3.3.10)$$

În cazul în care se cunosc parametrii cinematici ai brațului robotic se poate determina precizia de poziționare pe spațiul de lucru folosind ecuațiile (3.3.11 - 3.3.13):

$$\Delta p_x = p_{xf} - p_x \quad (3.3.11)$$

$$\Delta p_y = p_{yf} - p_y \quad (3.3.12)$$

$$\Delta p_z = p_{zf} - p_z \quad (3.3.13)$$

în care p_x , p_y și p_z reprezintă ecuațiile de poziționare inițiale ale organului terminal fără a se ține cont de abaterile sistematice ale unghiurilor de rotație datorate solicitărilor din cuple, și sunt definite conform relațiilor (2.1.38 – 2.1.40).

Concluzii: Firele de acționare ale cuplelor sunt supuse unor solicitări care determină deformații elastice variabile în timpul mișcării brațului robotic tip „trompă de elefant”. Aceste variații ale lungimii firelor de acționare afectează precizia de poziționare pe spațiul de lucru a organului terminal.

În cazul brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate prezentat în subcapitolul 3.1.2 se obțin variații maxime ale deformațiilor elastice pentru firele de acționare ale primei cuple, C_1 , până la $38 \mu m$. Deformațiile elastice din fire afectează parametrul cinematic θ_{1x} al primei cuple și, astfel, unghiul α_1 va avea o abatere $\Delta\alpha_1$ variabilă în funcție de rotațiile cuplelor θ_{ix} (respectiv în funcție de parametrul α_i) până la maxime de $8,5'$, conform fig.3.3.4. Variațiile $\Delta\alpha_1$ se transmit la organul terminal afectând precizia de poziționare cu valori maxime de aproximativ $0.43 mm$ pe direcția axei Z, conform fig.3.3.5.

3.4. Cercetări privind influența deformațiilor elastice cumulate ale firelor asupra preciziei de poziționare

Firele de acționare din sistemul de transmisie de la brațul robotic tip „trompă de elefant” sunt supuse unor deformații elastice care apar ca urmare a solicitărilor din structură după cum s-a arătat în subcapitolul anterior (greutatea obiectului manipulat, greutatea structurii brațului în aval de cupla analizată, momentul rezistent). De asemenea, firele prezintă variații în lungime datorită înfășurării-desfășurării acestora pe suprafața circulară a elementelor din structura brațului robotic cu poziția variabilă în timpul mișcării.

În continuare se determină analitic influența acestor variații în lungime a firelor de acționare asupra preciziei de poziționare ca urmare a cumulului de variații datorate solicitărilor din structura brațului cât și a înfășurării-desfășurării pe suprafețe interioare structurii.

Astfel, variația în lungime a firelor care acționează cupla C_i va fi suma dintre deformațiile elastice datorate solicitărilor din cuple și a momentelor rezistente, Δl_i , și variațiile sistematice, $\Delta l'_j$, relația (3.4.1).

$$\Delta l_{f_i} = \Delta l_i + \Delta l'_j, \quad i = 1, \dots, 5, j = 0, \dots, 4 \quad (3.4.1)$$

în care Δl_i reprezintă deformația elastică a firelor care fac acționarea cuplei C_i și $\Delta l'_j$ reprezintă variația în lungime a firelor de acționare a cuplei C_i ca urmare a înfășurării-desfășurării pe suprafața G_k , $k = 1, \dots, 4$, conform fig.3.2.1 din subcapitolul 3.2.

Sistemul de transmisie prin fire al brațului robotic nu face parte din interiorul buclei de reacție a sistemului de comandă, motiv pentru care deformațiile elastice Δl_{f_i} vor influența în mod direct precizia de poziționare datorită abaterilor unghiulare $\Delta \theta_{f_i}$ pe care le introduce conform relației (3.4.12):

$$\Delta \theta_{f_i} = \frac{180^\circ}{\pi d_i} \cdot \Delta l_{f_i} \quad (3.4.12)$$

în care d_i - diametrul de rostogolire a fusului/cilindrului articulației C_i .

Relația (2.2.12) din subcapitolul 2.2 reprezintă legea de variație a pozițiilor nominale ale punctul caracteristic atașat organului terminal. Pentru a determina precizia de poziționare a organului terminal se stabilesc legile de variație ale abaterilor Δx_6 , Δy_6 și Δz_6 generate de variațiile $\Delta \theta_{ix}$ a celor cinci articulații ($i = 1, \dots, 5$) conform relațiilor (3.4.13 – 3.4.15).

$$\begin{aligned} \Delta x_6 &\cong \sum_{i=1}^5 \frac{\partial x_6}{\partial \theta_{f_i}} \Delta \theta_{f_i} \\ \Delta y_6 &\cong \sum_{i=1}^5 \frac{\partial y_6}{\partial \theta_{f_i}} \Delta \theta_{f_i} \\ \Delta z_6 &\cong \sum_{i=1}^5 \frac{\partial z_6}{\partial \theta_{f_i}} \Delta \theta_{f_i} \end{aligned} \quad (3.4.13)$$

Introducând expresiile din relațiile (3.4.13) în relația (2.2.12), după efectuarea tuturor calculelor obținem expresiile din relațiile (3.4.14 – 3.4.16).

$$\Delta x_6 \cong 0 \quad (3.4.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_6 &\cong \left[-\frac{l_0 \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_{1x})}{\operatorname{tg} \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} \cdot \cos \left(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix} \right) + \frac{l_0 \operatorname{tg} \theta_{1x}}{(\operatorname{tg} \theta_{1x} + \cos \theta_{1x})^2} \cdot \cos \left(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix} \right) \right. \\ &\quad \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_{1x} - \sin \theta_{1x}) - \frac{l_0}{(\operatorname{tg} \theta_{1x} + \cos \theta_{1x})^2} \\ &\quad \left. \cdot \sin \left(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix} \right) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \theta_{1x} - \sin \theta_{1x}) \right] \Delta \theta_{1x} + \\ &+ \left\{ \frac{l_0}{\operatorname{tg} \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\operatorname{tg} \theta_{1x} \cdot \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] - l_1 \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) \right\} \Delta \theta_{2x} + \\ &+ \left\{ \frac{l_0}{\operatorname{tg} \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\operatorname{tg} \theta_{1x} \cdot \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] - l_1 \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \right. \end{aligned} \quad (3.4.15)$$

$$\begin{aligned}
 & l_2 \cos(\sum_{i=3}^5 \theta_{ix}) \} \Delta\theta_{3x} + \\
 & + \left\{ \frac{l_0}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\text{tg } \theta_{1x} \cdot \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] - l_1 \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \right. \\
 & l_2 \cos(\sum_{i=3}^5 \theta_{ix}) - l_3 \cos(\theta_{4x} + \theta_{5x}) \} \Delta\theta_{4x} + \\
 & + \left\{ \frac{l_0}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\text{tg } \theta_{1x} \cdot \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] - l_1 \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \right. \\
 & l_2 \cos(\sum_{i=3}^5 \theta_{ix}) - l_3 \cos(\theta_{4x} + \theta_{5x}) - l_4 \cos \theta_{5x} \} \Delta\theta_{5x} \\
 & \Delta z_6 \cong \left[\frac{l_0 \cdot (1 + \text{tg}^2 \theta_{1x})}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} \cdot \sin \left(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix} \right) - \frac{l_0 \text{tg } \theta_{1x}}{(\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x})^2} \cdot \sin \left(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix} \right) \right. \\
 & \quad \cdot (1 + \text{tg}^2 \theta_{1x} - \sin \theta_{1x}) - \frac{l_0}{(\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x})^2} \\
 & \quad \left. \cdot \cos \left(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix} \right) \cdot (1 + \text{tg}^2 \theta_{1x} - \sin \theta_{1x}) \right] \Delta\theta_{1x} + \\
 & + \left\{ \frac{l_0}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\text{tg } \theta_{1x} \cdot \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] + l_1 \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) \right\} \Delta\theta_{2x} + \\
 & + \left\{ \frac{l_0}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\text{tg } \theta_{1x} \cdot \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] + l_1 \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \right. \\
 & l_2 \cos(\sum_{i=3}^5 \theta_{ix}) \} \Delta\theta_{3x} + \\
 & + \left\{ \frac{l_0}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\text{tg } \theta_{1x} \cdot \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] + l_1 \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \right. \\
 & l_2 \cos(\sum_{i=3}^5 \theta_{ix}) + l_3 \cos(\theta_{4x} + \theta_{5x}) \} \Delta\theta_{4x} + \\
 & + \left\{ \frac{l_0}{\text{tg } \theta_{1x} + \cos \theta_{1x}} [\text{tg } \theta_{1x} \cdot \cos(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) - \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix})] + l_1 \sin(\sum_{i=2}^5 \theta_{ix}) + \right. \\
 & l_2 \cos(\sum_{i=3}^5 \theta_{ix}) + l_3 \cos(\theta_{4x} + \theta_{5x}) + l_4 \cos \theta_{5x} \} \Delta\theta_{5x}
 \end{aligned} \tag{3.4.16}$$

Analizând expresiile din relațiile (3.4.14 – 3.4.16) se observă că precizia de poziționare la brațele robotice cu structură tip „trompă de elefant” depinde de precizia de realizare a mișcărilor de rotație a cuplelor.

Concluzii: Abaterile unghiulare din articulații sunt datorate variațiilor în lungime a firelor de acționare. În cazul brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate s-a determinat analitic variațiile preciziei de poziționare pe direcția axelor Y și Z ca urmare a rotației cuplelor pe direcția axei X. Variațiile elementare ale poziției organului terminal de la brațul robotic tip „trompă de elefant” sunt afectate de mișcarea de rotație a cuplelor cu abaterile unghiulare $\Delta\theta_{ix}$ rezultate în urma solicitărilor din fiecare cuplă și a momentelor rezistente variabile.

3.5. Determinarea influenței frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare

La brațul robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de libertate apare problema frecării firelor de suprafețele interioare structurii. Frecarea firelor este o frecare de alunecare pe suprafețe interioare pe care le înfășoară-desfășoară. Firele din oțel inoxidabil acoperit cu teflon intră în contact cu suprafețe metalice (duraluminu, oțel) și din teflon, din structura brațului robotic. Frecarea firelor de acționare pe suprafața circulară a ghidajeje G_i din teflon, fig.3.5.1, este neglijabilă datorită lubrifianților din aceste material plastice.

Firele de acționare ale cuplelor brațului robotic intră în contact cu diferite suprafețe metalice interioare ale structurii brațului unde apar coeficienții de frecare μ_1, μ_2 și unghiurile de înfășurare α_1, α_2 pentru suprafețele metalice circulare de rază R_2 și, respectiv R_3 , fig.3.5.2.

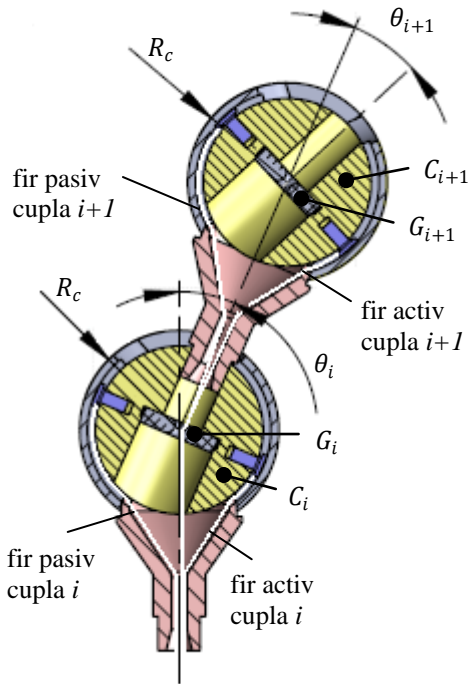


Fig.3.5.1. Trecerea firelor peste suprafețele interioare structurii cuplelor de la brațului robotic

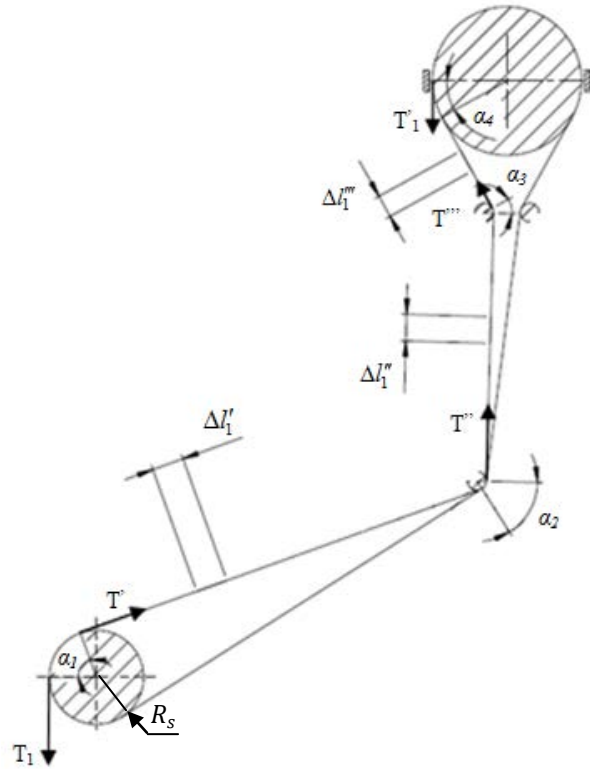


Fig.3.5.2. Unghiurile de înfășurare pe suprafețele interioare cuplei cinemate de clasă a V-a

Datorită frecărilor între firul activ care face rotația cuplei i și suprafețele interioare ale structurii brațului robotic apar deformații elastice suplimentare ale firului pe porțiunile care delimitează prezența unghiurilor de înfășurare α_1 și α_2 conform fig.3.5.2.

Înlocuind ecuațiile (3.5.2 – 3.5.4) în ecuația (3.5.10), obținem ecuația (3.5.11) care descrie deformația elastică datorată frecărilor firului de acționare a cuplei i de suprafețele interioare structurii brațului robotic în funcție de forța din ramura condusă T_i , respectiv cea aplicată la roata canelată R_{ci} .

$$\Delta l_1 = \left(e^{\mu_1 \alpha_1} \cdot l_1' + e^{\sum_{j=1}^2 \mu_j \alpha_j} \cdot l_1'' + e^{\sum_{j=1}^3 \mu_j \alpha_j} \cdot l_1''' + e^{-\sum_{j=1}^4 \mu_j \alpha_j} \cdot l_1'''' \right) / (E \cdot A_s) \quad (3.5.11)$$

Lungimea l_1' definește lungimea porțiunea de fir dintre punctul de prindere a firului de la roata canelată și punctul de tangență a firului înaintea înfășurării suprafeței cu unghiul α_2 .

Lungimea l_1'' definește lungimea porțiunea de fir dintre punctul de tangență de unde începe înfășurarea porțiunii circulare cu unghiul α_2 și punctul de tangență a firului înaintea înfășurării suprafeței circulare cu unghiul α_3 .

Lungimea l_1''' definește lungimea porțiunii de fir dintre punctul de prindere a firului de la cupla i și punctul de tangență a firului după înfășurarea suprafeței cu unghiul α_3 .

Lungimile l_1' și l_1'' variază în timpul mișcării în funcție de rotația cuplei θ_i conform ecuațiilor (3.5.12 – 3.5.13).

$$l_1' = l_{1,i}' + R_s \cdot \theta_i \cdot (R_s/R_c) \cdot (\pi/180) \quad (3.5.12)$$

$$l_1'' = l_{1,i}'' - R_c \cdot \theta_i \cdot (\pi/180) \quad (3.5.13)$$

În ecuațiile (3.5.11 – 3.5.12) s-au notat cu $l'_{i,i}$ și $l'''_{i,i}$ lungimile porțiunilor de fir l'_i și l'''_i când cupla i se află în origine, respectiv unghiul θ_i este zero.

Coeficienții de frecare depind de calitatea suprafeței cu care intră în contact firul din oțel acoperit cu nailon, respectiv de rugozitatea suprafețelor metalice.

Concluzii: La brațul robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de libertate acționarea cuplei cinematice se realizează prin interiorul structurii acesteia cu ajutorul unui sistem scripete cu fire tensionate oferind astfel posibilitatea micșorării diametrului brațelor robotice de acest tip. În urma analizei se constată frecările firelor de acționare pe suprafața interioară structurii brațului stabilesc valoarea randamentului sistemului de transmisie al cuplelor.

Modulul de acționare al acestor brațe robotice este constituit din servomotoare de curent continuu sau alternativ care acționează firele în mod controlat, în buclă închisă. În acest fel pot fi realizate brațe robotice tip „trompă de elefant” cu diametre foarte mici și cu posibilitatea poziționării spațiale cu precizie.

Însă, erorile de poziționare provenite în urma deformației elastice a firelor de acționare datorate frecărilor pe suprafețele interioare structurii brațului sunt în afara buclei de control și necesită aplicarea unor metode de compensare sau de reducere a lor. Deformațiilor elastice rezultate în urma frecării firelor de acționare pe suprafețele interioare structurii brațului robotic dau variații ale preciziei de poziționare a cuplelor.

Erorilor de poziționare obținute în cadrul analizei sunt erori sistematice și pot fi compensate prin aplicarea corecțiilor în cadrul algoritmului de programare a brațului robotic conform cu abaterile de poziționare obținute în cadrul calcului analitic.

3.6. Măsuri de reducere a deformațiilor firelor de acționare a cuplelor

Structurile de brațe robotice având cuplele acționate prin fire și scripeți sunt caracterizate de punerea în mișcare a cuplelor prin întinderea firelor și nu prin comprimarea lor. În acest mod, firele de acționare sunt supuse unor tensiuni constante care determină o creștere a deformațiilor elastice. Transmisiile mecanice prin fire sunt folosite la acționarea brațelor robotice cu structuri particulare, pentru poziționare flexibilă și un spațiu de lucru mare comparativ cu dimensiunile acestora. Solicitățile la care este supusă structura brațului robotic împreună cu momentele rezistente din cuple au valori variabile în timpul mișcării cuplelor și determină deformații elastice ale firelor de acționare care afectează rigiditatea structurii. Brațele robotice tip „trompă de elefant” acționate prin transmisii mecanice cu fire prezintă principala problemă a rigidității structurii din cauza deformațiilor elastice din firele de acționare care afectează precizia de poziționare. Influența deformațiilor elastice asupra preciziei de poziționare este redusă în general prin diferite dispozitive fixate de-a lungul fiecărui fir de acționare pentru a optimiza distribuția tensiunilor și, astfel, pentru a crește rigiditatea brațului robotic [31, 51, 85, 121].

Rigiditatea firelor de acționare a cuplelor de la brațul robotic tip „trompă de elefant” influențează comportamentul dinamic al structurii brațului care a fost studiat de mai multe colective de cercetători [28, 50]. Unele colective de cercetători recomandă algoritmi de optimizare a rigidității și tensiunilor sau componente care reglează automat tensiunile din fire pentru a crește precizia de poziționare. Însă aceste dispozitive cresc greutatea brațului robotic și dimensiunile de gabarit, făcându-l robust și neadecvat manipulării în spații înguste. Acționarea prin interiorul structurii și prin transmisii mecanice cu fire este avantajoasă datorită posibilității miniaturizării diametrului brațului ceea ce permite manipularea în interiorul unor spații de dimensiuni limitate. Transmisiile mecanice prin fire aduc în atenție deformațiile elastice ale firelor de acționare care provin din solicitările la care sunt supuse, precum: momentele rezistente din cuple, frecări ale firelor de suprafețele interioare structurii și sarcinile transportate de fiecare cuplă cinematică.

Structura brațului robotic tip „trompă de elefant” permite acționarea cuplelor cu ajutorul unui sistem scripete cu fire tensionate. Modulul de acționare este constituit din servomotoare de curent continuu sau alternativ care acționează firele în mod controlat, în buclă închisă. Deformațiile elastice ale firelor de acționare introduc erori de poziționare ale brațului robotic care nu intră în controlul buclei sistemului de comandă. Astfel, analiza tensiunilor firelelor de acționare este necesară pentru stabilirea variației deformațiilor elastice datorate solicitărilor din fire. Deformațiile elastice Δl_i ale firelor active afectează rigiditatea sistemului de transmitere a mișcării, și au legea de variație din ecuația (3.6.1):

$$\Delta l_i = \frac{T_i L_i}{EA_f} \quad (3.6.1)$$

în care T_i - tensiunea la care este supus firul de acționare a cuplei i , E – modulul de elasticitate longitudinal.

Din legea de variație a deformațiilor elastice rezultă că reducerea acestora se poate realiza printr-o serie de măsuri:

- modificarea lungimii firului de acționare a cuplei i , L_i ;
- modificarea ariei secțiunii transversale a firului, $A_f = \frac{\pi}{4} d_f^2$;
- creșterea rigidității la întindere a firului de acționare.

Lungimea L_i a firului de acționare este stabilită constructiv la valoarea minimă prin restricțiile impuse de structura brațului și de sistemul de acționare. Modificarea secțiunii transversale presupune creșterea diametrului firului d_f ceea ce duce la creșterea rezistenței la îndoire, respectiv a rigidității la încovoiere dată de relația:

$$R_i = E \cdot I = E \cdot \frac{\pi d_f^4}{64} \quad (3.6.2)$$

în care I reprezintă momentul de inerție a secțiunii transversale (de formă circulară) față de axa neutră.

Structura brațului robotic impune ca firul să permită înfășurarea-desfășurarea unor suprafețe circulare interioare și îndoirea firului în spații înguste interioare structurii brațului robotic. Din aceste considerente, diametrul firului nu poate fi mult mărit.

Astfel, ținând cont de constrângerile constructive care impun valori ale parametrilor A_f și L_i , pentru reducerea deformațiilor elastice Δl_i a firelor de acționare a cuplei i este necesară creșterea rigidității firelor folosind pretensionarea lor, fig.3.6.1.

O metodă de optimizare constă în folosirea unui mecanism de prestensionare care să reducă deformațiile elastice din timpul exploatării brațului robotic. Acționarea cuplelor prin transmisia mecanică fir-scripete presupune ca firele de acționare să fie supuse la capătul inferior unor solicitări T_i . Tensiunile din fir T'_i de la capătul superior al firului de acționare a cuplei i sunt mai mici decât tensiunile T_i datorită frecărilor dintre fir și suprafețele interioare structurii brațului robotic, ecuația (3.6.3).

$$T'_i = \eta^{-1} \cdot T_i \quad (3.6.3)$$

În ecuația (3.6.3) s-a notat cu η randamentul transmisiei mecanice. Optimizarea rigidității firelor active de acționare a cuplelor brațului robotic tip „trompă de elefant” prin folosirea unui mecanism de pretensionare constă în reducerea deformațiilor elastice din timpul funcționării astfel încât erorile datorate acestora să fie minime. În urma pretensionării firului activ al cuplei i cu forța $T_{0,i}$ se produc deformații elastice suplimentare $\Delta l_{s,i}$ conform fig.3.6.2 și fig.3.6.3.

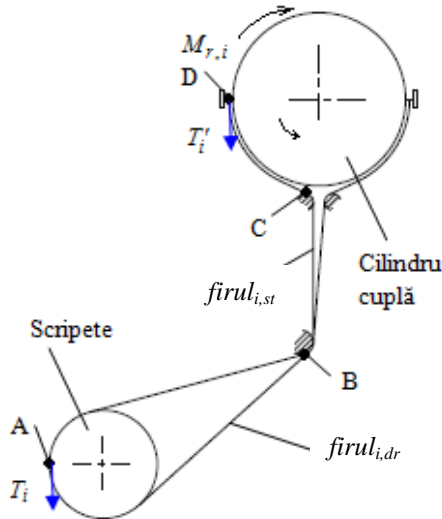


Fig.3.6.1. Tensiunile în firul activ

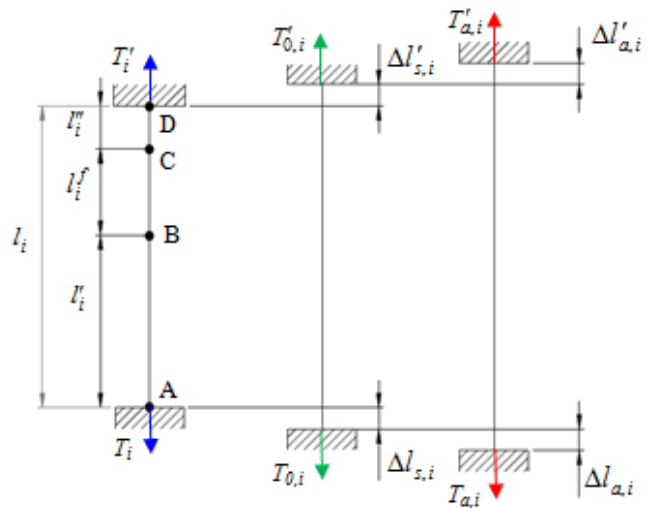


Fig.3.6.2. Deformațiile elastice la capetele firului activ

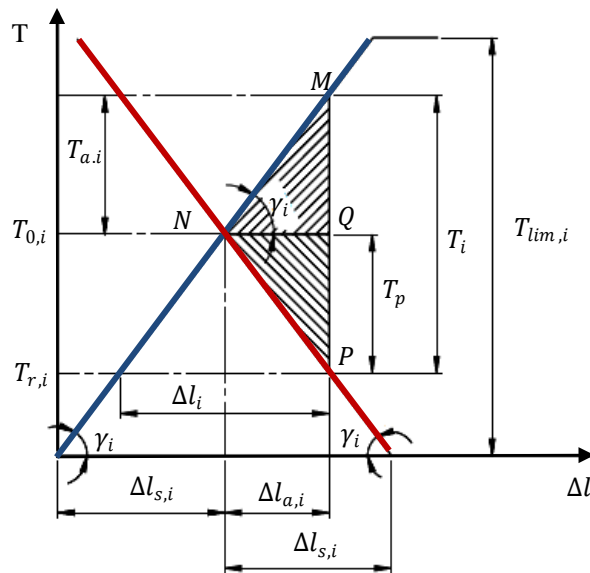


Fig.3.6.4. Diagrama deformațiilor elastice de la firul activ al cuplei i

Având aceeași pantă de variație dată de unghiul $\gamma_{0,i}$ la ambele capete ale firului activ se poate stabili egalitatea $T_{a,i} = T_{p,i} = T_{0,i} + T_{r,i}$. De asemenea, știind că forța aplicată T_i pentru acționarea cuplei la partea inferioară a firului activ este suma dintre forța $T_{a,i}$ din timpul funcționării și forța $T_{p,i}$ datorată pretensionării firului conform diagramei din fig.3.6.4, putem stabili $T_{a,i} = T_i/2$.

Datorită elasticității materialului din care este realizat firul de acționare a cuplelor de la brațul robotic tip „trompă de elefant”, în timpul funcționării acesta se va destinde cu aceeași lungime $\Delta l_{a,i}$ și rămâne cu deformația elastică finală $\Delta l_{s,i}$. În cazul în care nu se aplică forța de pretensionare $T_{0,i}$, deformațiile elastice din firul activ scad rigiditatea acestuia la valoarea dată de tangenta unghiului γ_i conform diagramei din fig.3.6.5.

În diagrama din fig.3.6.5 s-a notat cu $\Delta l_{0,i}$ deformația elastică a firului activ de rigiditate $\text{tg } \gamma_i$. Din diagramă se poate stabili variația rigidității firului nepretensionat $\text{tg } \gamma_i$ în funcție de forța de pretensionare $T_{0,i}$, respectiv $\text{tg } \gamma_i = T_{0,i}/\Delta l_{0,i}$.

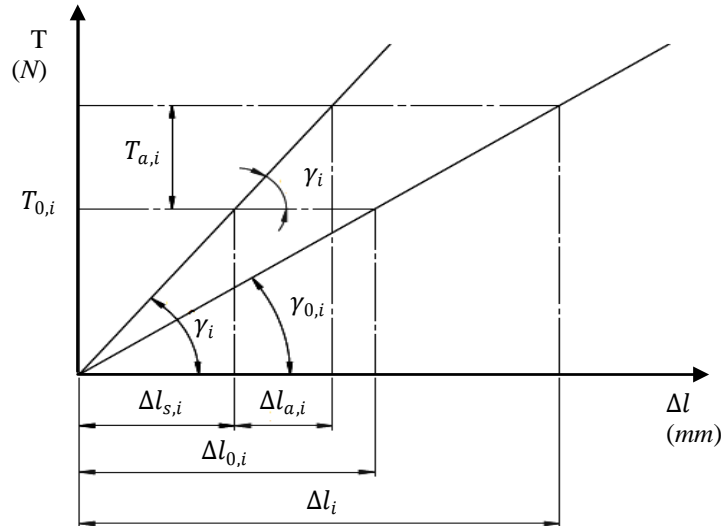


Fig.3.6.5. Variația deformațiilor elastice înainte și după pretensionare

Din fig.3.6.4 rezultă egalitatea $T_{0,i}/\Delta l_{s,i} = T_{a,i}/\Delta l_{a,i}$ care este echivalentă cu egalitatea $\Delta l_{s,i}/\Delta l_{a,i} = T_{0,i}/T_{a,i}$. Astfel, folosind ecuația (3.6.11) se poate stabili analitic cu cât crește procentual rigiditatea firului în urma aplicării pretensionării, ecuația (3.6.14).

$$\delta = 100 \cdot (tgy_{0,i} - tgy_i) / tgy_{0,i} = 100 \cdot (1 - \Delta l_{s,i} / \Delta l_{0,i}) \quad (3.6.14)$$

Din fig.3.6.3 și fig.3.6.4, se știe că $\Delta l_{s,i} > \Delta l_{a,i}$, iar din fig.3.6.5 se observă că deformația elastică $\Delta l_{0,i} \gg 2 \cdot \Delta l_{a,i}$. Analizând raportul dintre deformația elastică $\Delta l_{s,i}$ și deformația elastică $\Delta l_{0,i}$ și având $\Delta l_{s,i}/\Delta l_{a,i} > 1$, obținem că $\Delta l_{s,i}/\Delta l_{0,i} \ll \Delta l_{s,i}/(2 \cdot \Delta l_{a,i})$ și $\Delta l_{s,i}/\Delta l_{0,i} > 0.5$. Astfel, parametrul care cuantifică cu cât se poate optimiza rigiditatea firului de acționare din ecuația (3.6.14) devine $\delta < 50\%$. În aceste condiții, optimizarea rigidității firului de acționare a crescut cu cel mult 50%.

Concluzii: Deformațiile elastice ale firelor active apar ca urmare a forțelor de acționare, a maselor transportate de fiecare cuplă, a momentelor rezistente proprii și a forțelor de frecare. Variația lungimii firelor de acționare influențează direct rigiditatea sistemului de transmitere a mișcării și implicit precizia de poziționare. Totalul deformațiilor elastice cumulate în urma solicitărilor menționate necesită compensarea lor atât prin sisteme de pretensionare cât și în cadrul algoritmului de programare al brațului robotic.

4. Standul de încercări experimentale și lanțurile de măsură și achiziție date

Creșterea preciziei de poziționare de la brațele robotice de tip „trompă de elefant” constă în identificarea surselor erorilor, cuantificarea influenței acestora și aplicarea unor măsuri de îmbunătățire a preciziei de poziționare, respectiv de diminuare a erorilor. Precizia de poziționare depinde de parametrii constructivi și funcționali ai brațului robotic și este definită de abaterile care apar între o poziționare comandată și o poziționare atinsă împreună cu fluctuațiile pozițiilor atinse pentru o serie de repetări a poziționării comandate (STAS ISR ISO 9283). Pentru a crește precizia de poziționare de la brațul robotic tip „trompă de elefant” este necesară îmbunătățirea parametrilor constructivi și funcționali ai acestuia. Erorile de poziționare se determină experimental pentru a cuantifica influența parametrilor structurali asupra preciziei de poziționare parcurgând planul de determinări experimentale din fig.4.1.

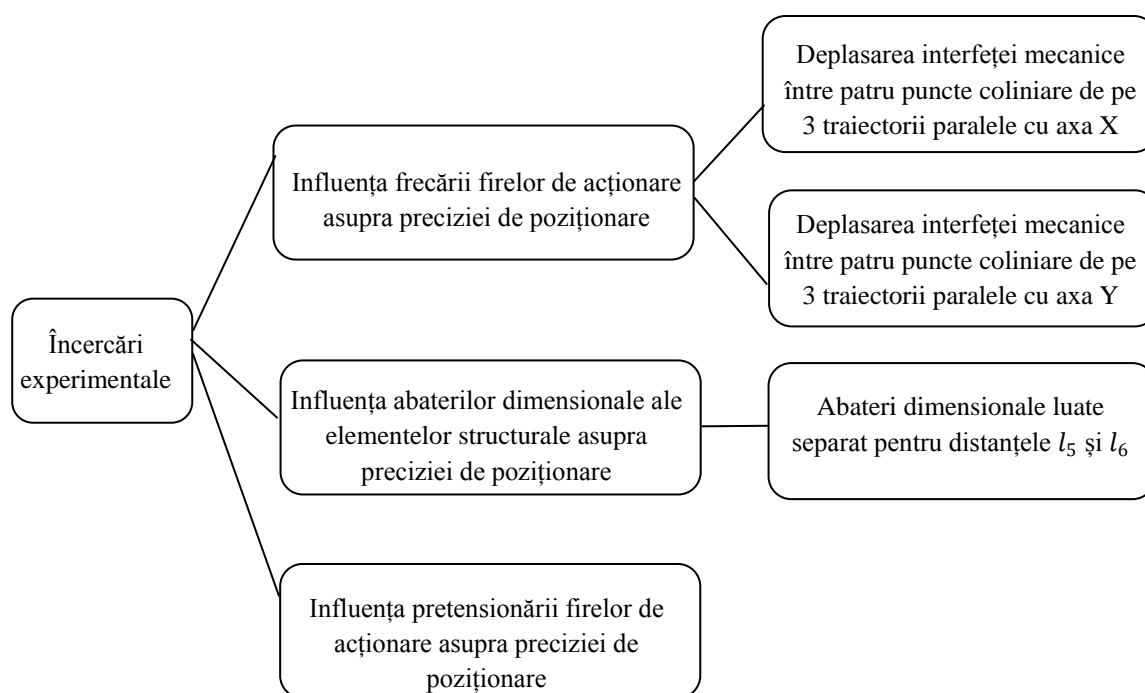


Fig.4.1. Planul de determinări experimentale a influenței parametrilor constructivi și funcționali asupra preciziei de poziționare

Modulul de acționare al brațului robotic tip „trompă de elefant” este constituit din servomotoare de curent continuu care acționează firele în mod controlat, în buclă închisă pentru a realiza poziționării spațiale cu precizie. Un alt factor care contribuie la deformarea elastică a firelor de acționare este reprezentat de solicitările din cuple și de momentele rezistente. Însă, erorile de poziționare provenite în urma deformației elastice a firelor de acționare sunt în afara buclei de control și necesită aplicarea unor metode de compensare. Astfel, este necesară stabilirea influenței frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare prin încercări experimentale, subcapitolul 5.1.

Calitatea prelucrării elementelor componente ale structurii brațului robotic tip „trompă de elefant” afectează precizia de poziționare. Pentru a stabili câmpul optim de toleranță pentru execuția elementelor constitutive brațului robotic, se realizează încercări experimentale privind influența variației abaterilor dimensionale ale elementelor structurale asupra preciziei de poziționare, în subcapitolul 5.2.

Mecanismele de pretensionare folosite la sistemele de transmitere tangențială a mișcării prin fir-scripete de la brațele robotice tip „trompă de elefant” contribuie la diminuarea deformațiilor elastice din firele de acționare care afectează precizia de poziționare. Aplicarea pretensionării optime asupra firelor de acționare se realizează după stabilirea influenței pretensionării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare în urma încercărilor experimentale din subcapitolul 5.3.

Structura brațului robotic tip „trompă de elefant” prezintă particularități constructive care stabilesc componența standului de încercări experimentale în vederea realizării poziționărilor comandate și măsurării poziționărilor atinse. Precizia de poziționare de la brațele robotice este dată de caracteristicile preciziei și repetabilității, măsurate în cazul structurii particulare supusă cercetării folosind programarea analitică. Astfel, legătura între diferite poziționări comandate este cunoscută sau poate fi determinată și este cerută pentru indicarea și măsurarea caracteristicilor de precizie și de repetabilitate a distanței utilizând măsurarea cu interferometrul laser de precizie ridicată, $\pm 0.7 \mu\text{m}$.

4.1. Standul de încercări experimentale

Standul de încercări experimentale, fig.4.2, a fost conceput în cadrul Universității „Vasile Alecsandri” din Bacău, Facultatea de Inginerie, laboratorul de Mecatronică. Acesta cuprinde structura particulară a brațului robotic tip „trompă de elefant”, sistemul de comandă și control și aparatul de măsură și achiziție date.

Lanțul de măsură folosit pentru efectuarea încercărilor experimentale este prezentat în fig.4.2. și cuprinde următoarele echipamente: sistemul de comandă și control a brațului robotic format din două surse de alimentare de 24 V, 320 W și 13 A (1); 6 drivere profesionale (2) de 4.2 A model 2M542 aferente celor 6 motoare pas cu pas (3) care fac acționarea celor 5 cuple (4) de la brațul robotic și rotația în jurul axei Y. Motoarele folosite pentru acționarea cuplelor de la brațul robotic tip „trompă de elefant” sunt motoare pas cu pas, bipolare, de tip Nema, având cuplu de 1.2 Nm și 200 pași. Divizarea incrementului de la motor de 0.11° s-a realizat cu ajutorul driverului profesional 2M542 în mod micro-stepping la 3200 impulsuri pentru o rotație completă.

Măsurarea distanțelor comandate se realizează indirect prin intermediul ghidajului liniar (7) care este fixat la capete de doi magneți (6) și două înălțătoare (5), iar pe sania (8) este fixată prisma mobilă Renishaw (9). Prismele optice (9) și (10) fac parte din pachetul interferometrului Renishaw (11) și sunt certificate metrologic conform certificatului de calibrare nr. 110504 emis la data de 14-05-2015. Prin intermediul softului specializat Renishaw ML 10 (16) se realizează achiziția datelor experimentale rezultate în urmă măsurătorilor. Calibrarea prismelor optice (9), (10) și a undei interferometrului laser Renishaw (11) se realizează cu ajutorul capacelor de calibrare din cadrul pachetului și a riglei laser (12). Transmiterea datelor către soft se realizează prin intermediul interfeței DX 10 (13) la viteza de 5 kHz. Comanda motoarelor pas cu pas se realizează cu ajutorul interfeței de comandă realizată în programul specializat LabView (15) care permite preluarea datelor și comenzilor specificate de utilizator (poziționarea interfeței mecanice prin preluarea mișcărilor de rotație și a accelerațiilor comandate fiecărei cuplei) pentru mișcarea cuplelor brațului robotic prin intermediul plăcii de achiziție Arduino Uno (14).

În fig.4.3 este prezentat în secțiune transversală ansamblul brațului robotic supus cercetărilor experimentale. Sistemul de comandă și control al brațului robotic tip „trompă de elefant” este realizat din motoarele pas cu pas și driverele profesionale aferente care permit controlul mișcării de rotație a scripetilor (13) fixați pe axul motoarelor (14), fig.4.3. Sistemul de transmitere a mișcării format de scripeti și fir în circuit închis nu face parte din bucla de control a brațului robotic.

Rezumatul tezei de doctorat – Contribuții privind îmbunătățirea parametrilor constructivi și funcționali ai brațelor robotice tip *trompă de elefant*

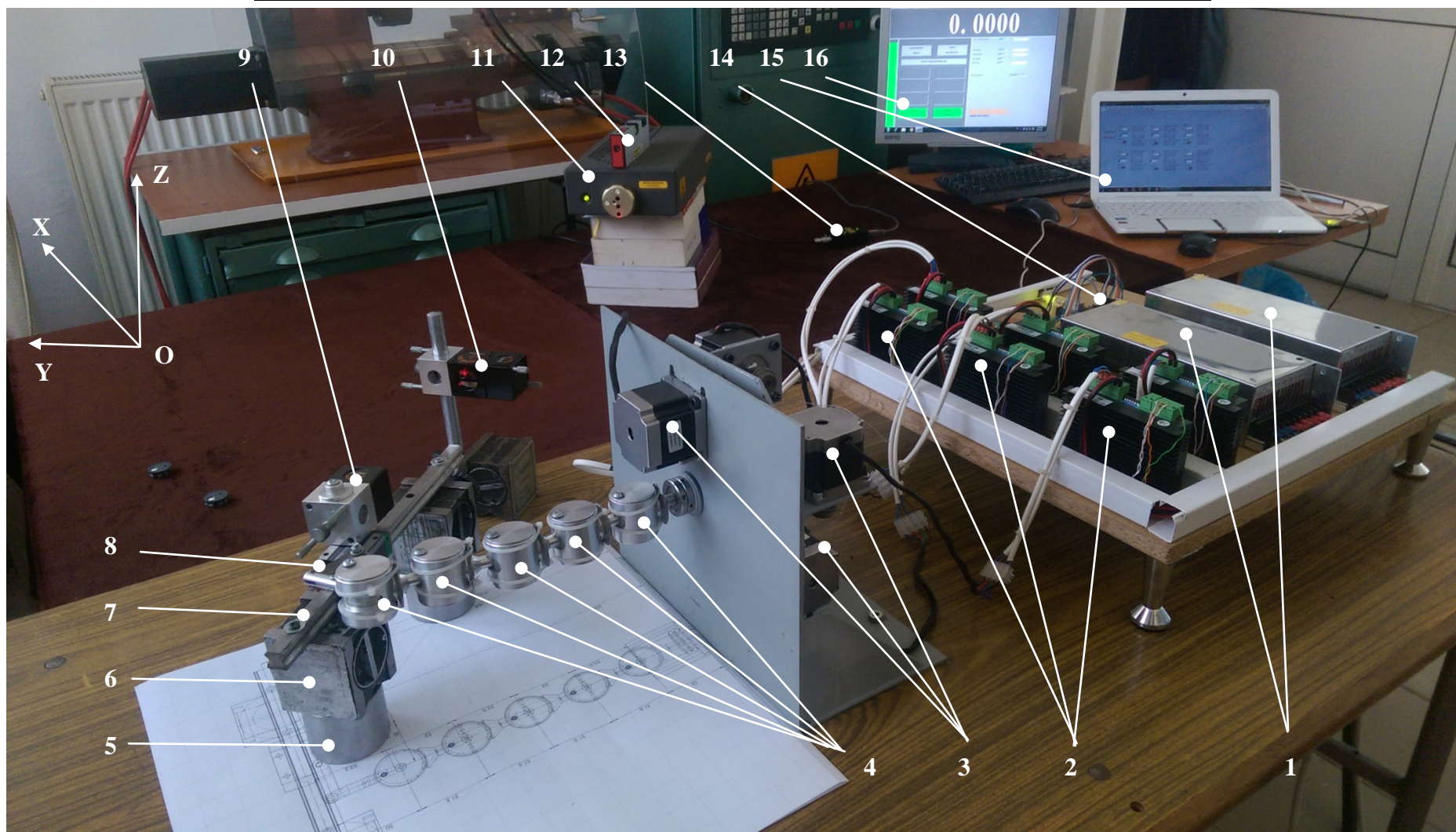


Fig.4.2. Vederea de ansamblu a standul de încercări experimentale

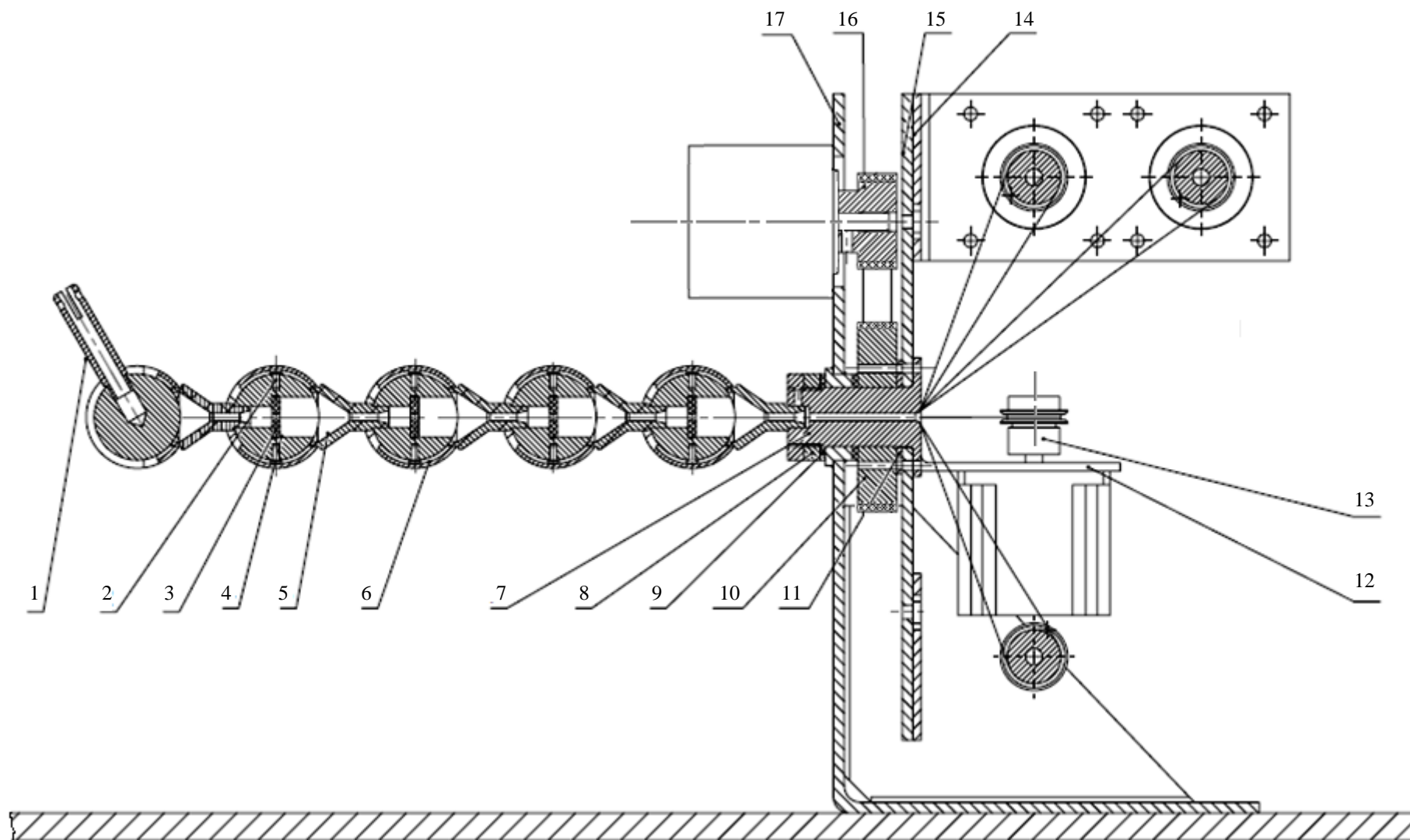


Fig.4.3. Ansamblu braț robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate și sistemul de acționare fir-scripete

4.2. Prezentarea structurii brațului robotic tip „trompă de elefant”

Structura brațului robotic tip „trompă de elefant” prezintă particularități constructive care permit acționarea cu fire dispuse prin interiorul acestuia eliminând astfel problema intrării în contact a firelor cu obiecte din exteriorul structurii care ar putea afecta comportamentul dinamic al brațului robotic. Sistemul de orientare al brațului robotic este bazat pe cuple cinematice de clasă a V-a conectate în serie și implementate în structura modulară pentru obținerea unui nivel ridicat al preciziei de poziționare spațială și un diametru minim al brațului.

Acționarea fiecărei cuple cinematice se realizează cu ajutorul unui sistem scripete cu fire tensionate. Structura unei cuple este formată din elementul de legătură (5), bușa (6), cilindrul (4), ghidajul interior (3) și capacul (25), fig.4.4 și fig.4.5. Elementul de legătură (5) este fixat de cilindrul (4) prin intermediul unui știft filetat. De asemenea, elementul de legătură (5) este fixat de bușa cuplei următoare cu un știft filetat.

Firele de acționare a fiecărei cuple sunt fixate de cilindrul cuplei (4) prin intermediul celor două bolțuri (2) diametral opuse și care culisează în interiorul canalului din bușa cuplei (6), fig.4.3, permițând rotirea cuplei C_i la cursa maximă θ_i , iar $i=1, \dots, 5$.

La efectuarea mișcărilor de rotație pe axa O_x circuitul închis al fiecărei cuple își modifică tensiunea internă cu valori acceptabile, având drept cauză raza de curbură r a ghidajului (5) ce este fixat prin presare în cilindrul (4). La valori ale razei de curbură de 3-4 mm fiecare articulație care realizează cursa maximă θ_i introduce o modificare de lungime de ordinul sutimilor pentru fiecare circuit închis al sistemului de acționare fir-scripete aferent cuplei i .

Prin interiorul fiecărei cuple este prevăzută posibilitatea accesului unor cabluri suplimentare necesare organului efector al robotului. Punerea în mișcare a brațului se face prin sistemul de acționare și transmitere a mișcării cu ajutorul unui servomotor, reductor, scripete fix și a unui fir (cablu) tensionat.

Brațul robotic tip „trompă de elefant” prezintă avantajul dispunerii firelor de acționare prin interiorul structurii eliminând pericolul intrării în contact cu alte corpuri exterioare care ar putea afecta comportamentul dinamic al brațului robotic. Cu ajutorul acestui braț robotic și al accesoriilor atașate se intenționează îmbunătățirea execuției operațiilor de sudare, vopsire, manipulare etc. Atât structura flexibilă a brațului poliarticulat cât și posibilitatea generării unor traiectorii complexe poate asigura efectuarea de întoarceri și pătrunderi în locuri greu accesibile, în spatele unor panouri prin ferestre de dimensiuni mici. Posibilitatea miniaturizării structurii permite utilizarea brațului robotic în domeniul medical unde este necesară realizarea inciziilor chirurgicale minim invazive.

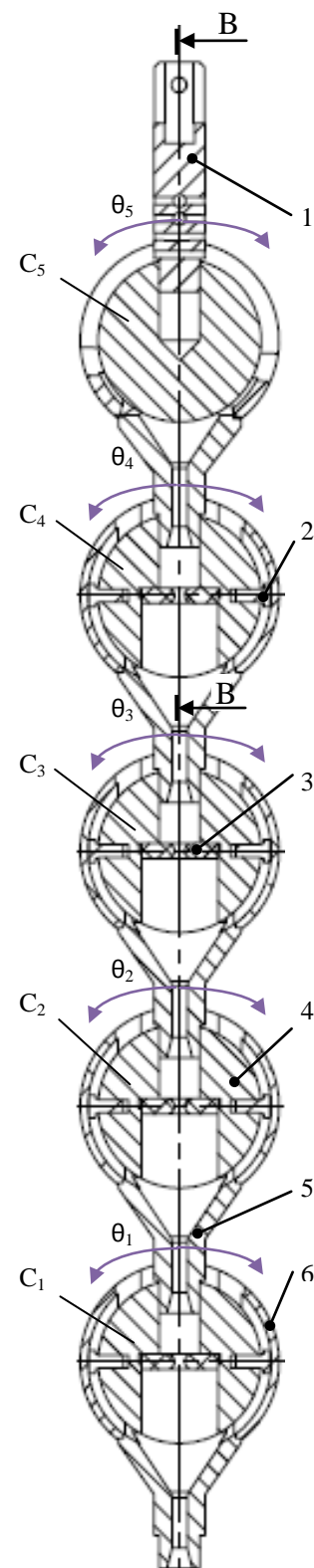


Fig.4.4. Structura brațului robotic în secțiune transversală

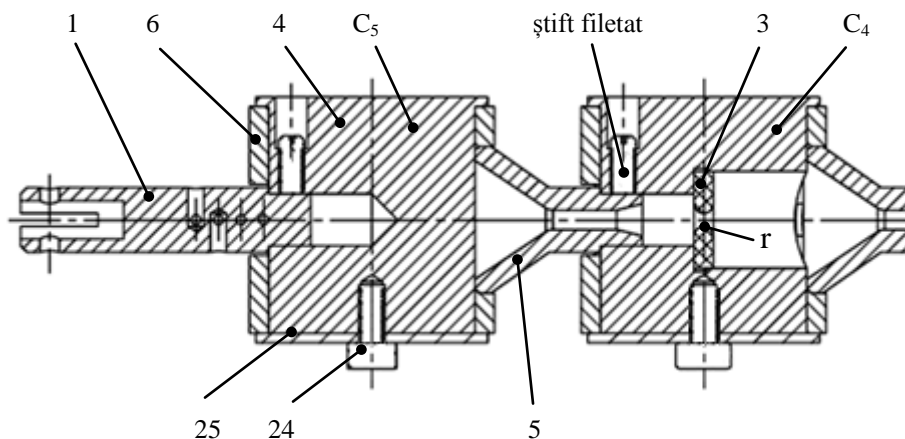


Fig.4.5. Secțiune longitudinală a cuplelor 5 și 4 (după planul B-B, rotit)

Aționarea și ghidarea firelor prin interiorul structurii permit realizarea unui diametru foarte mic al brațului robotic în comparație cu lungimea sa, adecvat manipulării în spații înguste și poziționării spațiale flexibile.

4.4. Cerințe normative privind măsurarea preciziei de poziționare și repetabilității la roboții industriali

În cadrul încercărilor experimentale se urmărește stabilirea influenței parametrilor constructivi și funcționali ai brațului robotic tip „trompă de elefant” asupra preciziei de poziționare. Determinările experimentale ale erorilor de poziționare se realizează în funcție de influența următorilor factori: abaterile dimensionale ale elementelor structurale, frecarea firelor de acționare, pretensionarea firelor de acționare, regimul tranzitoriu liniar.

Interferometrul laser Renishaw din dotarea laboratorului de Mecatronică, permite măsurarea deplasărilor liniare realizate în plan. În continuare se descrie metoda de determinare a preciziei de poziționare bidirecțională făcând derogări de la standardul SR ISO 9283 datorită condițiilor de laborator în care se realizează încercările experimentale.

4.4.1. Stabilirea preciziei de poziționare bidirecțională

Precizia de poziționare unidirecțională se stabilește ca diferența între poziția comandată și baricentrul norului de puncte atinse (media poziționărilor atinse) în cazul apropierii de poziția comandată din aceeași direcție fig.4.6.

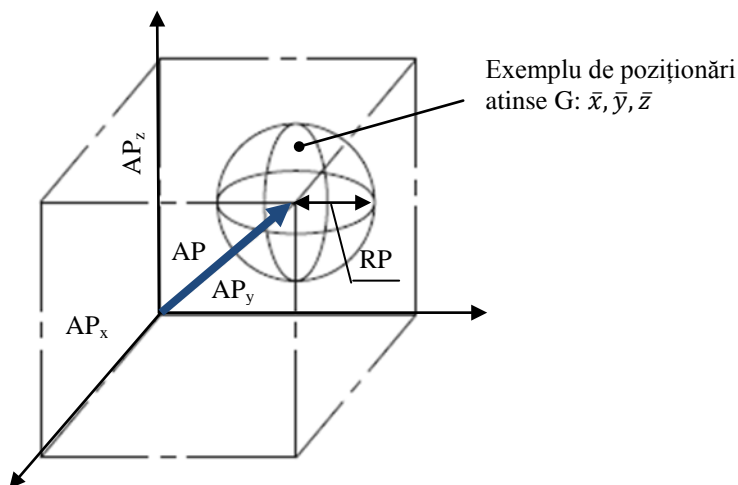


Fig.4.6. Baricentrul norului de puncte

În funcție de coordonatele poziționărilor n efectuate se calculează precizia de poziționare unidirecțională folosind ecuația (4.1):

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (4.1)$$

în care \bar{x} , \bar{y} și \bar{z} sunt coordonatele baricentrului norului de puncte obținute după repetarea de n ori a aceleiași poziționări definite de ecuațiile (4.2 – 4.4); x_c , y_c și z_c sunt coordonatele poziționării comandate.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (4.2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (4.3)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (4.4)$$

Iar $AP_x = \bar{x} - x_c$, $AP_y = \bar{y} - y_c$ și $AP_z = \bar{z} - z_c$. În ecuațiile (4.2 – 4.4) s-au notat cu x_j , y_j și z_j coordonatele celei de-a j -a poziționări atinse.

Brațul robotic deplasează succesiv efector din punctul P_1 în poziționările succesive P_2 , P_3 , P_4 . Stabilirea deplasării organului terminal s-a realizat ținând cont de standardul SR ISO 9283 privind criteriile de performanță și metode de încercare corespunzătoare în colaborare cu norma VDI/DGQ 3441 privind măsurarea axelor liniare controlate. Astfel, fiecare poziționare se atinge folosind o apropiere bidirecțională după cum este arătat în ciclurile ilustrate în fig.4.7 și fig.4.8, traiectoriile folosite sunt obținute prin programare, iar măsurările se efectuează după realizarea fiecărei poziționări.

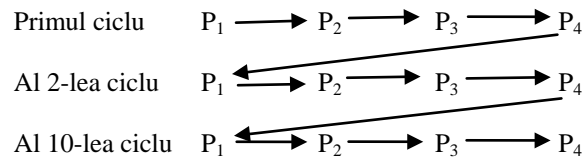


Fig.4.7. Prezentarea ciclurilor de poziționare ale interfaței mecanice de la brațul robotic tip „trompă de elefant” în sensul de deplasare la dus ↑

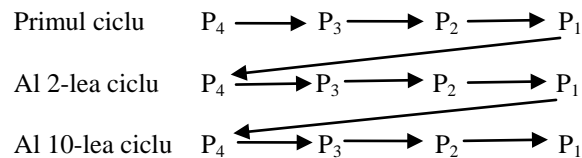


Fig.4.8. Prezentarea ciclurilor de poziționare ale interfaței mecanice de la brațul robotic tip „trompă de elefant” în sensul de deplasare la întors ↓

Pentru fiecare set de cicluri de poziționare se calculează baricentrul norului de puncte realizat în urma celor 10 cicluri de poziționare la fiecare punct P_j cu $j=1,2,3,4$. De asemenea se stabilește variația preciziei de poziționare, l_j , realizată între ciclurile de poziționare, ecuația (4.5):

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

Pornind din punctul P_1 , brațul robotic deplasează succesiv interfața mecanică în poziționările P_2, P_3, P_4, P_1 în sensul de deplasare la dus \uparrow . Iar, în sensul de deplasare la întors \downarrow , brațul robotic deplasează interfața mecanică pornind din P_4 în poziționările P_3, P_2, P_1, P_4 .

4.4.2. Raportul de încercări

Se programează brațul robotic pentru a deplasa interfața mecanică în pozițiile corespunzătoare traiectoriilor din fig.4.9. Pornind din punctul P_1 , brațul robotic deplasează succesiv interfața mecanică în poziționările P_2, P_3, P_4 . Pentru încercarea poziționărilor se folosește planul XOY pentru a garanta caracteristicile preciziei de poziționare ale brațului robotic tip „trompă de elefant” pe traiectoria paralelă cu axa X și pe traiectoria paralelă cu axa Y. Coordonatele poziționărilor de încercare se indică în coordonate ale bazei brațului robotic.

Se realizează traiectorii liniare în cadrul încercărilor experimentale care trebuie să fie programate astfel încât să fie folosit un număr minim de cuple comandate, iar fiecare punct comandat să fie poziționat în lungul traiectoriei. Comandarea poziționărilor este realizată folosind programarea analitică a brațului robotic. Rezultatele obținute pentru fiecare pereche de poziționări succesive este înregistrat în raportul de încercare.

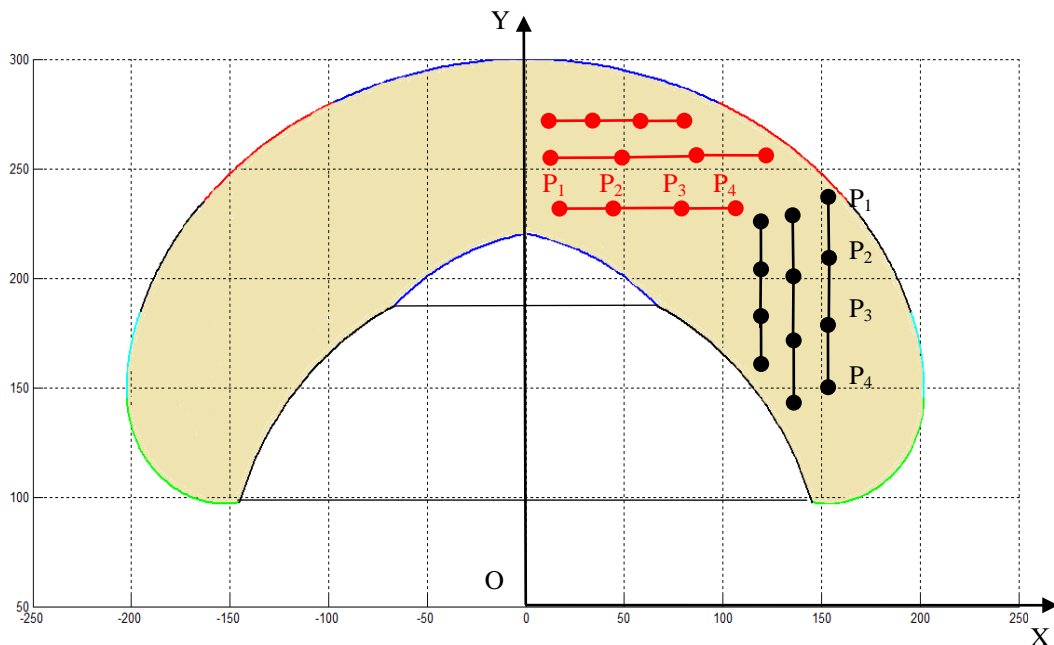


Fig.4.9. Poziționări ale interfeței mecanice folosite în cadrul încercărilor experimentale

Se realizează poziționări pe o traiectorie paralelă cu axa X și pe o traiectorie paralelă cu axa Y în patru puncte. La fiecare poziționare se măsoară cu Interferometrul laser Renishaw distanța parcursă de la punctul de plecare în câte 10 cicluri de poziționare pentru deplasarea de la P_1 la P_4 și respectiv pentru deplasarea de la P_4 la P_1 . Deplasarea efectivă D_j a saniei pe ghidaj se calculează ca diferență dintre cota comandată și cea atinsă la deplasarea din punctul P_k în punctul P_{k+1} ($k=1,2,3$).

Din datele colectate în urma măsurătorilor se poate determina variația preciziei bidirecționale dată de ecuația (4.6):

$$vAP_i = \frac{1}{2} \left| l_{j_{max}} \uparrow - l_{j_{max}} \downarrow \right| \quad (4.6)$$

în care $l_{j_{max}} \uparrow$ și $l_{j_{max}} \downarrow$ reprezintă diferența erorilor maxime realizate între cicluri în sensul \uparrow și respectiv în sensul \downarrow .

Pentru o poziție indicată se poate determina repetabilitatea poziționării unidirecționale care exprimă concordanța între pozițiile și orientările atinse după repetarea de n ori a aceleiași poziționări comandate în aceeași direcție. Valoarea repetabilității poziționării unidirecționale, RP, este raza sferei al cărei centru este baricentrul norului de puncte și care se calculează folosind ecuația (4.7):

$$RP = \bar{l} + 3s_j \quad (4.7)$$

în care \bar{l} reprezintă media aritmetică a erorilor de poziționare realizate între cicluri dată de ecuația (4.8) iar $3s_j$ reprezintă dispersiile unghiulare în jurul valorilor medii \bar{l} dată de ecuația (4.9).

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (4.8)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (4.9)$$

Pentru fiecare poziționare se calculează repetabilitatea poziționării unidirecționale RP.

5. Rezultatele încercărilor experimentale la determinarea preciziei de poziționare de la brațul robotic tip „trompă de elefant”

În cadrul încercărilor experimentale s-au măsurat poziționările comandate P_1, P_2, P_3 și P_4 cu deplasarea bidirecțională a interfeței mecanice de 10 ori pentru sensul de apropiere la dus \uparrow , de la punctul P_1 spre punctul P_4 , și pentru sensul de apropiere la întors \downarrow , de la punctul P_4 pentru sensul de apropiere spre punctul P_1 . Pentru fiecare poziționare s-au determinat: erorile de poziționare - x_j , media aritmetică a erorilor de poziționare - \bar{x} obținută după apropierea de 10 ori a interfeței mecanice în poziționarea comandată - x_c , precizia de poziționare AP , variațiile preciziei de poziționare realizate între ciclurile de poziționare - l_j , media aritmetică a preciziei de poziționare realizate între ciclurile de poziționare - \bar{l} , dispersia preciziei de poziționare - s_j , repetabilitatea poziționării unidirecționale - RP și variația preciziei de poziționare bidirecționale vAP .

Astfel, s-a analizat precizia de poziționare obținută la deplasarea bidirecțională a interfeței mecanice între patru puncte situate mai întâi pe o traiectorie paralelă cu axa X și apoi pe o traiectoria paralelă cu axa Y, în cazurile de variației: a unghiurilor de rotație a cuplelor, θ_i , în subcapitolul 5.1; a distanței dintre cuple, l_i , în subcapitolul 5.2; a forței de pretensionare, F_p , în subcapitolul 5.3.

5.1. Rezultatele încercărilor experimentale privind determinarea influenței frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare

Determinarea experimentală a influenței frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare se realizează prin variația unghiurilor de rotație θ_i , respectiv prin deplasarea bidirecțională a interfeței mecanice între patru puncte cu rotația cuplelor în trei situații de variație a poziționărilor.

5.1.1. Determinarea preciziei de poziționare în cazul deplasării bidirecționale a organului terminal între patru puncte de pe traiectoria paralelă cu axa X

În cadrul încercărilor experimentale se realizează deplasări liniare bidirecționale între patru puncte aflate pe o traiectorie paralelă cu axa X prin variația a unghiurilor de rotație θ_i . Coordonatele comandate ale celor patru poziționări sunt: P_1 (43, 261), P_2 (63, 261), P_3 (83, 261) și P_4 (103, 261). Pentru a realiza poziționările P_j se stabilesc unghiurile de rotație θ_i conform datelor din tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. Coordonatele programate ale cuplelor pentru realizarea poziționărilor P_j pe direcția axei X

	Distanța între puncte (mm)											
	P_1 (0)			P_2 (20)			P_3 (40)			P_4 (60)		
	față de O	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	față de O	$P_2 \rightarrow P_3$	$P_3 \rightarrow P_2$	față de O	$P_3 \rightarrow P_4$	$P_4 \rightarrow P_3$	față de O	$P_4 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_4$
θ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_2	-2°	0	0	-2°	-1°	1°	-3°	-5°	5°	-8°	6°	-6°
θ_3	8°	-11°	11°	-3°	-19°	19°	-23°	0°	0°	-23°	31°	-31°
θ_4	-13.5°	-0.5°	0.5°	-14°	19°	-19°	5°	-16°	16°	-11°	-2.5°	2.5°
θ_5	-82°	15°	-15°	-67°	10°	-10°	-57°	40°	-40°	-17°	-65°	65°

Variația unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 influențează precizia de poziționare a efectorului final de la brațul robotic tip „trompă de elefant” conform rezultatelor obținute experimental din tabelul 5.1.

Tabel 5.2. Erori de poziționare ale interfeței mecanice în cazul variației unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5

	Distanța între puncte (mm)			
	P ₁ (0)	P ₂ (20)	P ₃ (40)	P ₄ (60)
n – numărul ciclurilor				
Sensul de apropiere ↑	1	2	3	4
1	0.00	0.39	0.31	0.34
2	-0.51	-0.13	0.19	0.53
3	0.08	-0.05	0.14	0.39
4	0.21	0.17	0.31	0.69
5	0.95	-0.79	1.09	-0.40
6	0.24	-0.54	0.55	0.15
7	0.39	-0.16	0.39	0.54
8	0.69	0.54	0.93	-0.39
9	-0.39	0.15	0.78	0.40
10	-0.92	-0.77	0.01	0.41
$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_j \uparrow$	0.44	20.37	40.47	59.58
$AP = (\bar{x} - x_c) \uparrow$	0.44	0.37	0.47	-0.42
	0.44	0.02	0.16	0.76
	0.07	0.24	0.28	0.95
	0.36	0.32	0.33	0.81
	0.23	0.20	0.16	1.12
$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2} \uparrow$	0.51	0.42	0.62	0.82
	0.19	0.18	0.08	0.57
	0.05	0.21	0.08	0.97
	0.25	0.17	0.46	0.81
	0.05	0.22	0.31	0.82
	0.48	0.41	0.46	0.83
$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \uparrow$	0.26	0.24	0.29	0.85
$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \uparrow$	0.18	0.12	0.18	0.14
$RP = \bar{l} + 3s_j \uparrow$	0.80	0.60	0.84	1.27
Sensul de apropiere ↓	1	2	3	4
1	-0.41	-0.35	-0.37	0.00
2	-0.34	0.07	0.42	0.79
3	0.18	0.52	0.45	0.03
4	-0.40	-0.22	0.31	0.76
5	-0.15	0.25	0.04	-0.27
6	0.27	0.42	0.67	0.70
7	0.63	0.36	0.78	0.11
8	0.65	0.02	0.38	0.40
9	0.41	-0.25	-0.27	-0.65
10	-0.38	-0.78	-0.54	-0.27
$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_j \downarrow$	-0.38	19.68	39.58	60.40
$AP = (\bar{x} - x_c) \downarrow$	-0.38	-0.32	-0.42	0.40
	0.79	0.68	0.80	0.40
	0.72	0.39	0.84	0.40
$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2} \downarrow$	0.56	0.84	0.88	0.37
	0.78	0.54	0.73	0.36

$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \downarrow$ $s_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \downarrow$ $RP = \bar{l} + 3s \downarrow$ $vAP = \frac{1}{2} l_{j_{max}} \uparrow - l_{j_{max}} \downarrow $	0.53	0.57	0.46	0.13
	0.65	0.74	1.09	0.30
	1.01	0.69	1.20	0.29
	1.03	0.34	0.80	0.00
	0.79	0.57	0.69	0.25
	0.76	1.11	0.96	0.13
	0.76	0.65	0.84	0.26
	0.17	0.22	0.21	0.13
	1.26	1.31	1.47	0.67
	0.26	0.34	0.29	0.36

Variația preciziei de poziționare a celor patru puncte obținute prin rotația unghiurilor θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 este reprezentată grafic în fig.5.1 ca urmare a rezultatelor obținute experimental.

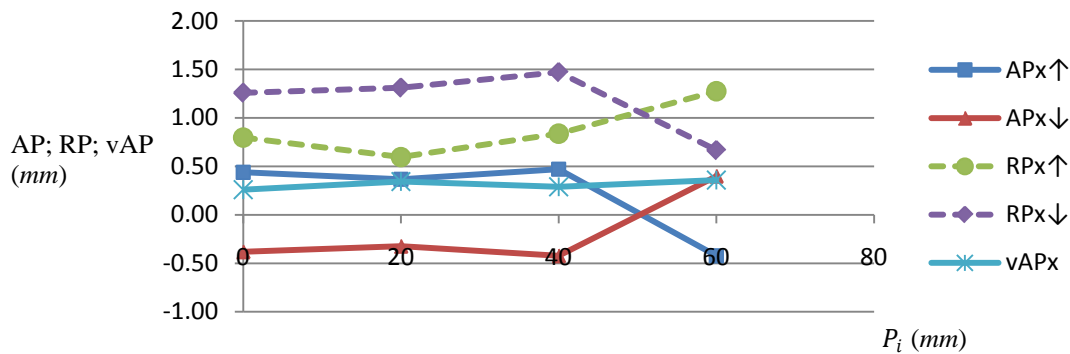


Fig.5.1. Variația preciziei de poziționare în cazul variației unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5

Coordonatele comandate, în cazul al doilea, ale celor patru poziționări de pe o traiectorie paralelă cu axa X sunt: P_1 (7.2, 265), P_2 (16.7, 265), P_3 (31.86, 265) și P_4 (75, 265). Pentru a realiza poziționările P_j se stabilesc unghiurile de rotație a cuplelor conform datelor din tabelul 5.3.

Tabelul 5.3. Coordonatele programate ale cuplelor pentru realizarea poziționărilor P_j pe direcția axei X

	Distanța între puncte (mm)											
	P_1 (0)			P_2 (9.5)			P_3 (24.66)			P_4 (67.8)		
	față de O	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	față de O	$P_2 \rightarrow P_3$	$P_3 \rightarrow P_2$	față de O	$P_3 \rightarrow P_4$	$P_4 \rightarrow P_3$	față de O	$P_4 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_4$
		0	0		0	0		0	0		0	0
θ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_2	-15°	-3°	3°	-18°	0	0	-18°	3°	-3°	-15°	0	0
θ_3	-9°	0	0	-9°	-9°	9°	-18°	-1°	1°	-19°	10°	-10°
θ_4	12°	-1°	1°	11°	3°	-3°	14°	-37°	37°	-23°	35	-35°
θ_5	85°	0	0	85°	-4°	4°	81°	-8°	8°	73°	12°	-12°

Variația preciziei de poziționare, în cazul al doilea, a celor patru puncte obținute prin rotația unghiurilor θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 este reprezentată grafic în fig.5.2 ca urmare a rezultatelor obținute experimental.

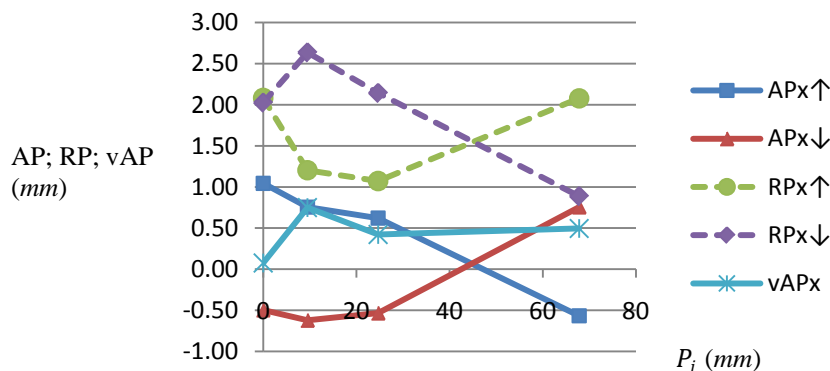


Fig.5.2. Variația preciziei de poziționare în cazul variației unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5

Coordonatele comandate, în cazul al treilea, ale celor patru poziționări de pe o traiectorie paralelă cu axa X sunt: P_1 (8.19, 271), P_2 (21.24, 271), P_3 (43.8, 271) și P_4 (62.66, 271). Pentru a realiza poziționările P_j se stabilesc unghiurile de rotație ale cuplelor conform datelor din tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. Coordonatele programate ale cuplelor pentru realizarea poziționărilor P_j pe direcția axei X

	Distanța între puncte (mm)											
	P_1 (0)			P_2 (13.05)			P_3 (35.61)			P_4 (54.47)		
	față de O	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	față de O	$P_2 \rightarrow P_3$	$P_3 \rightarrow P_2$	față de O	$P_3 \rightarrow P_4$	$P_4 \rightarrow P_3$	față de O	$P_4 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_4$
θ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_2	-15°	-3°	3°	-18°	-1°	1°	-19°	-4°	4°	-15°	0	0
θ_3	-6°	-1°	1°	-7°	-3°	3°	-20°	3°	-3°	-17°	11°	-11°
θ_4	7°	2°	-2°	5°	9°	-9°	14°	-30°	30°	-16°	23°	-23°
θ_5	80°	0	0	80°	-11°	11°	69°	4°	-4°	73°	7°	-7°

Variația preciziei de poziționare, în cazul al treilea, a celor patru puncte obținute prin rotația unghiurilor θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 este reprezentată grafic în fig.5.3 ca urmare a rezultatelor obținute experimental.

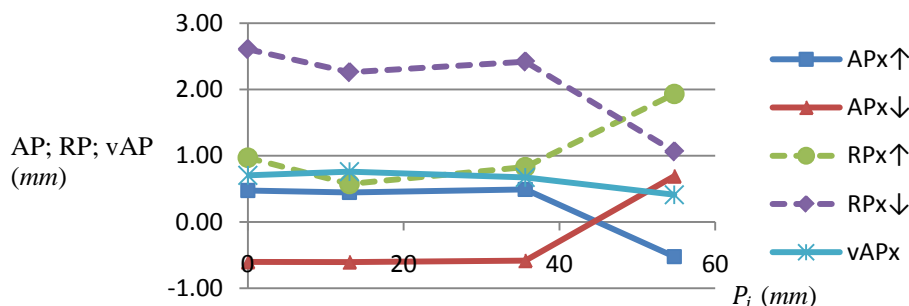


Fig.5.3. Variația preciziei de poziționare în cazul variației unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5

Concluzii: Variația preciziei de poziționare în cele trei cazuri de deplasare a interfeței mecanice de la brațul robotic tip „trompă de elefant” este influențată de numărul cuplelor puse în mișcare de la o poziționare la alta și în funcție de valoarea unghiului de rotație al cuplelor. Se constată că la valori mari ale unghiului de rotație de la cuplele aflate spre baza brațului robotic se obțin erori de poziționare mai mari față de cazul în care se rotesc cuplele aflate spre apropierea extremității brațului.

Variația repetabilității (RP_x) obținută în cele trei cazuri de poziționare are valori mai bune în cazul rotației cuplelor cu unghiuri mai mici. De asemenea, pe măsură ce punctele de poziționare se află spre extremitatea brațului se obțin variații ale repetabilității mai mari, respectiv repetabilitatea nu mai este la fel de bună. Variația preciziei de poziționare (vAP_x) obținută în cele trei cazuri de poziționare a interfeței mecanice ajunge la valori maxime de aproximativ 0.7 mm când pentru poziționare se folosesc rotații mari ale cuplei 2, respectiv unghiul θ_2 are influența cea mai mare asupra preciziei de poziționare.

5.1.2. Determinarea preciziei de poziționare în cazul deplasării bidirecționale a organului terminal între patru puncte de pe o traiectorie paralelă cu axa Y

În cadrul încercărilor experimentale se realizează deplasări liniare bidirecționale între patru puncte aflate pe o traiectorie paralelă cu axa Y. Coordonatele comandate ale celor patru poziționări sunt: P_1 (120.32, 237.55); P_2 (121.96, 219.76); P_3 (121.59, 201.98) și P_4 (120.77, 176.56). Pentru a realiza poziționările P_j se stabilesc unghiurile de rotație ale cuplelor conform datelor din tabelul 5.7.

Tabelul 5.7. Coordonatele programate ale cuplelor pentru realizarea poziționărilor P_j pe direcția axei Y

	Distanța între puncte (mm)											
	P_1 (0)			P_2 (17,80)			P_3 (35,57)			P_4 (61)		
	față de O	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	față de O	$P_2 \rightarrow P_3$	$P_3 \rightarrow P_2$	față de O	$P_3 \rightarrow P_4$	$P_4 \rightarrow P_3$	față de O	$P_4 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_4$
θ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_2	-16°	-4°	4°	-20°	-2°	2°	-22°	0	0	-22°	6°	-6°
θ_3	-16°	-4°	4°	-20°	-2°	2°	-22°	0	0	-22°	6°	-6°
θ_4	0	0	0	0	0	0	0	-22°	22°	-22°	22°	-22°
θ_5	-38°	-33°	33°	-71°	-17°	17°	-88°	0	0	-88°	50°	-50°

Erorile de poziționare a punctelor obținute în cadrul primului ciclu de încercări experimentale sunt de: 0.74 mm, 0.67 mm, 0.65 mm și 0.66 mm pentru punctele P_1 , P_2 , P_3 și respectiv P_4 conform tabelului 5.8.

Tabel 5.8. Erori de poziționare ale organului terminal la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

	Distanța între puncte (mm)			
	P_1 (0)	P_2 (17.79)	P_3 (35.57)	P_4 (60.99)
n – numărul ciclurilor				
Sensul de apropiere ↑				
1	0.00	0.67	0.65	0.66
2	-0.08	0.60	0.63	0.62
3	-0.12	0.55	0.61	0.55

Rezumatul tezei de doctorat – Contribuții privind îmbunătățirea parametrilor constructivi și funcionali ai brațelor robotice tip *trompă de elefant*

4	-0.19	0.48	0.59	0.43
5	-0.31	0.36	0.57	0.21
6	-0.53	0.14	0.55	-0.21
7	0.52	1.19	0.53	0.44
8	-0.30	0.37	0.51	0.29
9	-0.45	0.22	0.49	0.01
10	-0.73	-0.06	0.47	-0.53
$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_j \uparrow$	0.32	18.25	36.13	61.38
$AP = (\bar{x} - x_c) \uparrow$	0.32	0.46	0.56	0.39
	0.32	0.21	0.09	0.27
	0.25	0.13	0.07	0.22
	0.20	0.09	0.05	0.15
	0.13	0.02	0.03	0.03
	0.01	0.10	0.01	0.19
$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2} \uparrow$	0.21	0.32	0.01	0.18
	0.20	0.73	0.03	0.04
	0.02	0.09	0.05	0.11
	0.13	0.24	0.07	0.39
	0.41	0.40	0.09	0.14
$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \uparrow$	0.19	0.23	0.05	0.17
$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \uparrow$	0.12	0.21	0.03	0.11
$RP = \bar{l} + 3s_j \uparrow$	0.56	0.86	0.14	0.49
Sensul de apropiere ↓				
1	-0.74	-0.67	-0.65	0.00
2	-0.75	-0.81	-0.73	-0.08
3	-0.61	-0.97	-0.74	-0.09
4	-0.45	-0.85	-0.60	0.05
5	-0.57	-0.41	-0.44	0.21
6	0.05	-0.21	-0.56	0.09
7	-0.15	-0.23	0.06	0.71
8	0.89	0.81	-0.14	0.51
9	0.87	0.79	0.90	1.55
10	-0.43	0.77	-0.44	0.21
$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_j \downarrow$	-0.55	17.14	35.04	60.67
$AP = (x - x_c) \downarrow$	-0.55	-0.65	-0.53	-0.32
	0.19	0.02	0.12	0.32
	0.20	0.16	0.20	0.24
	0.06	0.32	0.21	0.23
	0.10	0.20	0.07	0.27
$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2} \downarrow$	0.02	0.24	0.09	0.11
	0.50	0.44	0.03	0.23
	0.40	0.42	0.47	0.39
	0.34	0.16	0.39	0.19
	0.32	0.14	0.37	1.23
	0.12	0.12	0.09	0.11
$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \downarrow$	0.22	0.22	0.20	0.33
$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \downarrow$	0.16	0.14	0.15	0.33
$RP = \bar{l} + 3s \downarrow$	0.70	0.63	0.66	1.32

$vAP = \frac{1}{2} l_{j_{max}} \uparrow - l_{j_{max}} \downarrow $	0.05	0.14	0.19	0.42
---	-------------	-------------	-------------	-------------

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzuri de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa Y sunt prezentate în fig.5.4 pentru a evidenția influența frecării firelor asupra preciziei de poziționare.

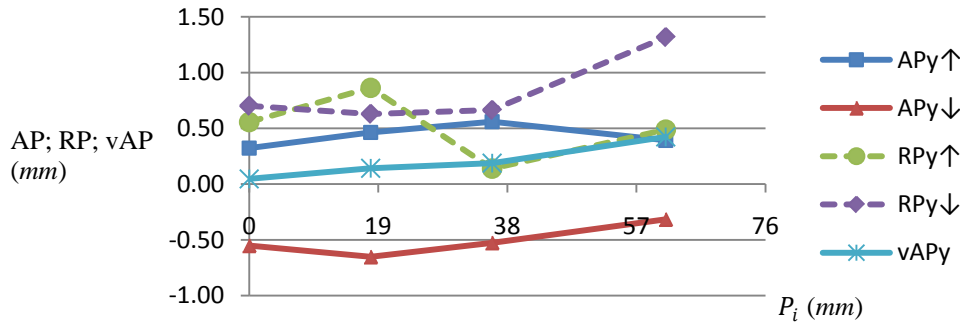


Fig.5.4. Variația preciziei de poziționare în cazul variației unghiurilor de rotație $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ și θ_5

Erorile de poziționare ale punctului P_1 sunt mai mari față de cele înregistrate la poziționarea celorlalte puncte în primul ciclu deși nu se află spre extremitatea spațiului de lucru. Aceste erori rezultă din mișcarea a ultimelor 4 cuple de la brațul robotic fapt ce determină cumulearea erorilor de poziționare de la fiecare dintre cele patru cuple cinematice. În primul ciclu de poziționare erorile de poziționare ale punctelor P_2 și P_3 scad ușor față de erorile de poziționare ale punctului P_1 deoarece pentru poziționare nu s-a folosit și rotația cuplei 4. De la poziționarea în punctului P_1 până la poziționarea în punctul P_4 scad erorile de poziționare pe măsură ce ne apropiem de originea axei Y dar se cumulează erorile de poziționare de la ciclul anterior. Distanțele consecutive dintre puncte sunt aproximativ egale între primele 3 puncte de 17.8 mm dar de 25.42 mm între punctul P_3 și P_4 fapt ce contribuie la variația erorilor de poziționare.

În al doilea caz, coordonatele comandate ale celor patru poziționări sunt: P_1 (100, 269.25), P_2 (100, 251.18), P_3 (100, 235.65) și P_4 (100, 214.8). Pentru a realiza poziționările P_j se stabilesc unghiurile de rotație θ_i conform datelor din tabelul 5.9.

Tabelul 5.9. Coordonatele programate ale cuplelor pentru realizarea poziționărilor P_j pe direcția axei Y

	Distanța între puncte (mm)											
	P_1 (0)			P_2 (18.07)			P_3 (33.6)			P_4 (54.45)		
	față de O	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	față de O	$P_2 \rightarrow P_3$	$P_3 \rightarrow P_2$	față de O	$P_3 \rightarrow P_4$	$P_4 \rightarrow P_3$	față de O	$P_4 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_4$
θ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_2	-16°	14°	-14°	-2°	0	0	-2°	-6°	6°	-8°	-8°	8°
θ_3	-10°	-13°	13°	-23°	1°	-1°	-22°	3°	-3°	-19°	9°	-9°
θ_4	-19°	-4°	4	-23°	0	0	-23°	3°	-3°	-20°	1°	-1°
θ_5	4°	-29°	29°	-25°	25°	-25°	-50°	-30°	30°	-80°	84°	-84°

Variația preciziei de poziționare, în cazul al doilea, a celor patru puncte obținute prin rotația unghiurilor θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 este reprezentată grafic în fig.5.5 ca urmare a rezultatelor obținute experimental.

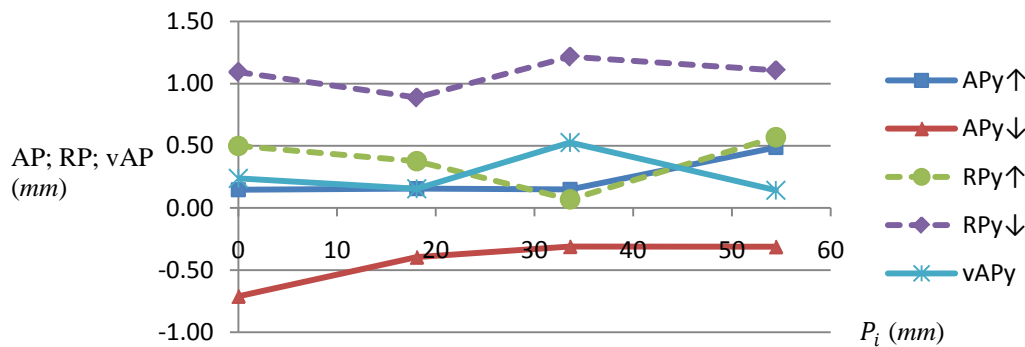


Fig.5.5. Variația preciziei de poziționare în cazul variației unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5

În al treilea caz, coordonatele comandate ale celor patru poziționări sunt: P_1 (64, 285.77), P_2 (64, 268.54), P_3 (64, 255.5) și P_4 (65, 239.46). Pentru a realiza poziționările P_j se stabilesc unghiurile de rotație θ_i conform datelor din tabelul 5.11.

Tabelul 5.11. Coordonatele programate ale cuplelor pentru realizarea poziționărilor P_j pe direcția axei Y

	Distanța între puncte (mm)											
	P_1 (0)		P_2 (17.23)			P_3 (30.27)			P_4 (46.31)			
	față de O	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	față de O	$P_2 \rightarrow P_3$	$P_3 \rightarrow P_2$	față de O	$P_3 \rightarrow P_4$	$P_4 \rightarrow P_3$	față de O	$P_4 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_4$
θ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_2	-7°	3°	-3°	-4°	0	0	-4°	11°	-11°	7°	-14°	14°
θ_3	-8°	4°	-4°	-4°	1°	-1°	-3°	-18°	18°	-21°	13°	-13°
θ_4	-4°	-4°	4°	-8°	-1°	1°	-9°	-1°	1°	-10°	6°	-6°
θ_5	-24°	-36°	36°	-60°	-19°	19°	-79°	-10°	10°	-89°	65°	-65°

Variația preciziei de poziționare, în cazul al treilea, a celor patru puncte obținute prin rotația unghiurilor θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 este reprezentată grafic în fig.5.6 ca urmare a rezultatelor obținute experimental.

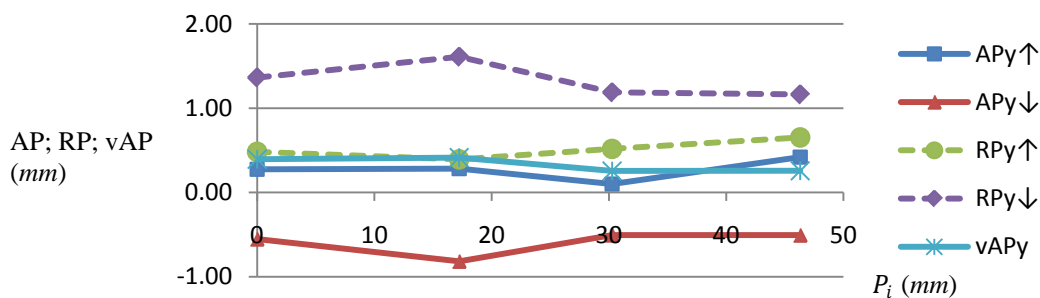


Fig.5.6. Variația preciziei de poziționare în cazul variației unghiurilor de rotație θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5

Concluzi: În toate cele 3 cazuri de deplasare a interfeței mecanice între patru puncte situate pe traiectorii paralele cu axa Y se obțin erori de poziționare relativ mici. În al treilea caz se obține o precizie mare de poziționare datorită variațiilor mici ale unghiurilor de rotație de la o deplasare la alta a interfeței mecanice, cum este cazul deplasării de la punctul P_2 la punctul P_3 pentru care se rotește cupla 3 cu 1° , cupla 4 cu -1° și cupla 5 cu -19° .

Variația repetabilității (RP_y) obținută în cele 3 cazuri de poziționare pe traiectorii paralele cu axa Y se constată că numărul cuplelor puse în mișcare pentru poziționare influențează valorile repetabilității. Cu cât se folosesc mai puține cuple pentru a efectua o poziționare a interfeței mecanice cu atât repetabilitatea este mai bună. Numărul cuplelor puse în mișcare împreună cu mărimea unghiului de rotație stabilesc valori ale repetabilității mari în cazul situării interfeței mecanice în puncte ale spațiului de lucru aflate spre baza brațului robotic, respectiv cu cât rotațiile cuplelor sunt mai mari.

Variația preciziei de poziționare (vAP_y) este într-un interval de variație mic la poziționările efectuate pe cele 3 traiectorii paralele cu axa Y față de poziționările realizate pe cele 3 traiectorii paralele cu axa X. Rezultatele obținute experimental confirmă cercetările teoretice privind influența frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare pe direcția axei Y.

5.2. Rezultatele încercărilor experimentale privind determinarea influenței abaterilor dimensionale ale elementelor structurale asupra preciziei de poziționare

Realizarea elementelor componente ale brațului robotic tip „trompă de elefant” în clasa de precizie IT7 determină variații ale dimensiunilor l_i care contribuie la creșterea erorilor de poziționare ale organului terminal. În continuare se determină experimental influența abaterilor superioare Δl_i din clasa de precizie IT7. Distanțele efective dintre cuple sunt: $l_1=53.3 \text{ mm}$; $l_2=52 \text{ mm}$; $l_3=52.5 \text{ mm}$; $l_4=52 \text{ mm}$; $l_5=51.7 \text{ mm}$; $l_6=40 \text{ mm}$.

Coordonatele comandate ale celor patru puncte de pe traiectoria paralelă cu axa X sunt diferite față de coordonatele inițiale datorită montării între cuple a distanțierului de grosime $0,5 \text{ mm}$ cu adaos de ajustare de 0.2 mm .

A. Rezultate experimentale obținute la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

După montarea distanțierului folosit între cupla 4 și cupla 5, distanța l_5 devine 52.5 mm și coordonatele comandate sunt: $P_1 (43, 261)$; $P_2 (63, 261)$; $P_3 (83, 261)$ și $P_4 (103, 261)$, iar distanțele între puncte sunt aceleași cu distanțele din cazul inițial conform tabelului 5.13.

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzori de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa X sunt prezentate în fig.5.7 pentru a evidenția influența abaterilor Δl_5 asupra preciziei de poziționare.

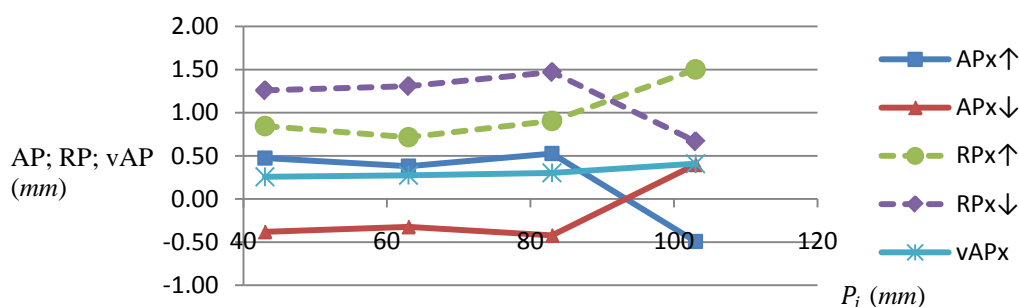


Fig.5.7. Variația erorilor de poziționare pentru abateri Δl_5 la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

Influența abaterilor dimensionale Δl_6 asupra preciziei de poziționare se determină experimental cu montarea distanțierului între cupla finală 5 și organul terminal având $l_6 = 40.5 \text{ mm}$ și coordonatele comandate: $P_1 (43, 261)$; $P_2 (63, 261)$; $P_3 (83, 261)$ și $P_4 (103, 261)$.

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzuri de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa X sunt prezentate în fig.5.8 pentru a evidenția influența abaterilor Δl_6 asupra preciziei de poziționare.

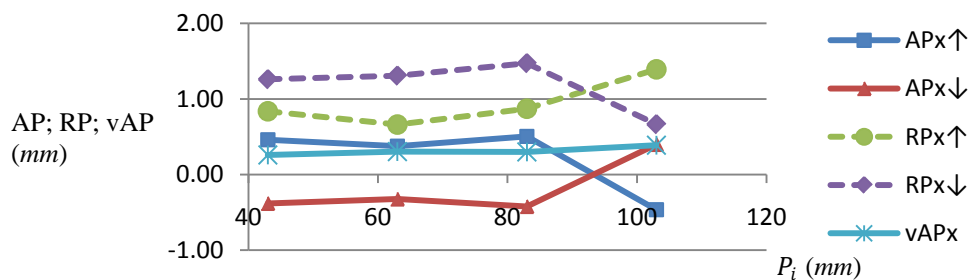


Fig.5.8. Variația erorilor de poziționare pentru abateri Δl_6 la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

Concluzii: În urma variației distanțelor dintre cuple aflate spre extremitatea brațului robotic cu abateri dimensionale Δl_5 și Δl_6 se obțin variații ale repetabilității RP_x mici prin comparația acestor două cazuri cu cel în care nu s-ar înregistra aceste variații. De asemenea, variația preciziei de poziționare vAP_x este foarte puțin afectată la valorile abaterilor dimensionale Δl_5 și Δl_6 aflate în clasa de precizie IT7.

B. Rezultate experimentale obținute la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

După montarea distanțierului folosit între cupla 4 și cupla 5, distanța l_5 devine 52.5 mm și coordonatele comandate sunt: $P_1 (120.69, 237.88)$, $P_2 (122.28, 220.14)$, $P_3 (121.93, 202.34)$ și $P_4 (121.22, 176.76)$.

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzuri de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa Y sunt prezentate în fig.5.9 pentru a evidenția influența abaterilor Δl_5 asupra preciziei de poziționare.

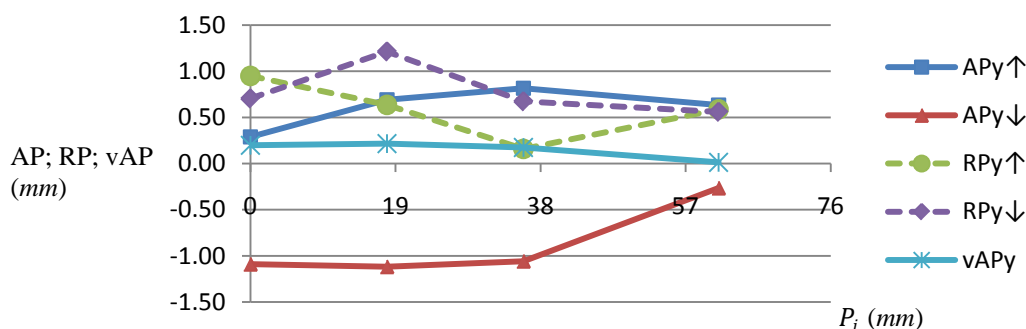


Fig.5.9. Variația erorilor de poziționare pentru abateri Δl_5 la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

După montarea distanțierului folosit între cupla 5 și elementul final, distanța l_6 devine 40.5 mm și coordonatele comandate sunt: $P_1 (120.82, 237.59)$, $P_2 (122.43, 219.58)$, $P_3 (121.96, 201.65)$ și $P_4 (120.99, 176.11)$.

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzuri de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa Y sunt prezentate în fig.5.10 pentru a evidenția influența abaterilor Δl_6 asupra preciziei de poziționare.

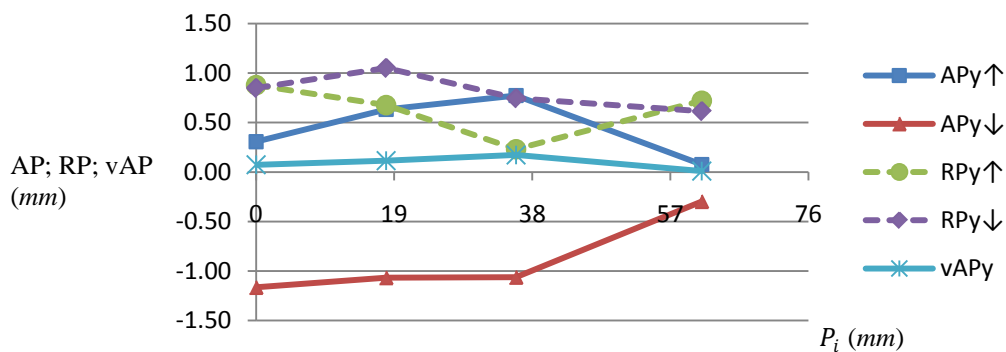


Fig.5.10. Variația erorilor de poziționare pentru abateri Δl_6 la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

Concluzii: Ca și în cazul poziționărilor interfeței mecanice pe o traiectorie paralelă cu axa X, în cazul poziționărilor pe o traiectorie paralelă cu axa Y se obțin variații ale repetabilității RP_y , mici prin comparația acestor două cazuri, cu abateri dimensionale Δl_5 și Δl_6 , cu cel în care nu s-ar înregistra aceste variații. De asemenea, variația preciziei de poziționare vAP_y , este foarte puțin afectată la valorile abaterilor dimensionale Δl_5 și Δl_6 aflate în clasa de precizie IT7. Rezultatele experimentale obținute confirmă cercetările teoretice privind influența abaterilor dimensionale asupra preciziei de poziționare.

Din analiza valorilor obținute la situarea interfeței mecanice pe o traiectorie paralelă cu axa X și pe o traiectorie paralelă cu axa Y, se constată că influența abaterilor asupra preciziei de poziționare diferă în funcție de situarea abaterilor în structura lanțului cinematic. Astfel, se impune ca elementele componente din structura brațului aflate în apropierea organului terminal să fie executate cu abateri dimensionale cât mai mici posibil pentru a obține erori de poziționare minime.

O altă măsură de compensare a acestor erori sistematice este introducerea corecțiilor electronice în cadrul algoritmului de optimizare al brațului robotic. În cazul producției de serie a elementelor constructive este necesară sortarea pieselor, în cadrul operațiilor de control, pe grupe, după dimensiunile efective.

Din punct de vedere tehnologic este de dorit ca valorile abaterilor elementelor constructive ale brațelor robotice tip „trompă de elefant” să fie cât mai mici. Acest aspect poate fi realizat folosind metoda sortării pieselor, întâlnită în cazul producției de serie. Prin urmare, metoda poate fi aplicată și în cazul brațelor robotice tip „trompă de elefant” dacă fabricarea lor îndeplinește această condiție.

5.3. Rezultatele încercărilor experimentale privind determinarea influenței forței de pretensionare din fire asupra preciziei de poziționare

În cadrul determinării preciziei de poziționare în condiții controlate de pretensionare se consideră trei cazuri de pretensionare a firelor de acționare. Conform diagramelor din fig.4.19 – 4.23 se constată ca deformățiile elastice ale firului de acționare datorate momentelor rezistente din cuple, nu depășesc 0.2 mm . Însă, firele de acționare a cuplelor de la brațul robotic tip „trompă de elefant” prezintă deformății elastice datorate frecării de alunecare dintre fir și suprafețele pe care le înfășoară din interiorul structurii brațului robotic cât și cuplului rezistent. Astfel, pentru determinarea preciziei de poziționare în condiții controlate de pretensionare a firelor de acționare se solicită suplimentar firele de acționare cu

o forță de pretensionare pentru a prelua din deformațiile elastice sistematice. Conform diagramelor forță – deformație din fig.4.19 – 4.23 forța maximă de solicitare a firului în domeniul elastic este de 1.9 daN . Știind că forța de tensionare necesară acționării cuplelor este de 1 daN , suplimentar se adaugă: în primul caz, o forță de pretensionare de 0.2 daN ; în al doilea caz, o forță de pretensionare de 0.4 daN și în al treilea caz, o forță de pretensionare de 0.6 daN .

A. Rezultate experimentale obținute la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

La o forță totală de pretensionare de 0.2 daN corespund deformațiile elastice de 2 mm ; 0.4 mm ; 0.3 mm ; 0.15 mm și de 0.05 mm pentru firul de lungime 200 mm ; 250 mm ; 300 mm ; 350 mm și respectiv 400 mm conform diagramelor forță – deformație din fig.4.19 – 4.23 obținute pentru încercarea la tracțiune.

În cadrul încercărilor experimentale se determină erorile de poziționare obținute la deplasarea interfeței mecanice între patru puncte de pe o traiectorie paralelă cu axa X având coordonatele comandate: $P_1 (43, 261)$, $P_2 (63, 261)$, $P_3 (83, 261)$ și $P_4 (103, 261)$.

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzori de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa X sunt prezentate în fig.5.11 pentru a evidenția influența pretensionării firelor cu $F_p=0,2 \text{ daN}$ asupra preciziei de poziționare.

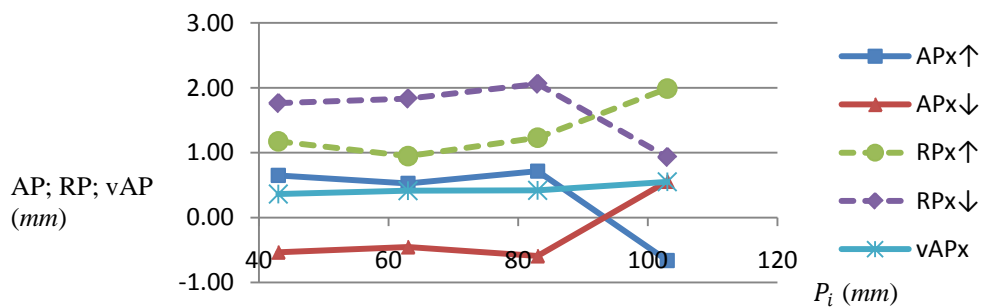


Fig.5.11. Variația erorilor de poziționare în cazul pretensionării firelor cu $F_p=0,2 \text{ daN}$ la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

La o forță de pretensionare de 0.4 daN corespund deformațiile elastice de 2.2 mm ; 0.8 mm ; 0.45 mm ; 0.25 mm și de 0.15 mm pentru firul de lungime 200 mm ; 250 mm ; 300 mm ; 350 mm și respectiv 400 mm conform diagramelor din fig.4.19 – 4.23.

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzori de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa X sunt prezentate în fig.5.12 pentru a evidenția influența pretensionării firelor cu $F_p=0,4 \text{ daN}$ asupra preciziei de poziționare.

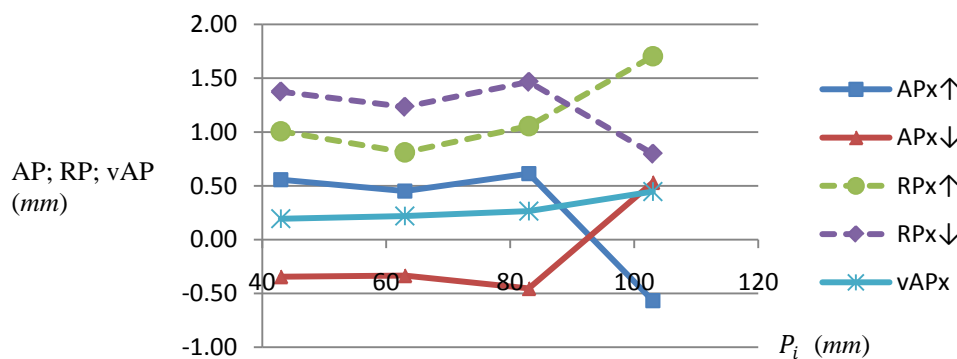


Fig.5.12. Variația erorilor de poziționare în cazul pretensionării firelor cu $F_p=0,4 \text{ daN}$ la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

La o forță de pretensionare de 0.6 daN corespund deformațiile elastice de 2.4 mm ; 1.15 mm ; 0.6 mm ; 0.35 mm și de 0.2 mm pentru firul de lungime 200 mm ; 250 mm ; 300 mm ; 350 mm și respectiv 400 mm conform diagramelor din fig.4. 4.19 – 4.23.

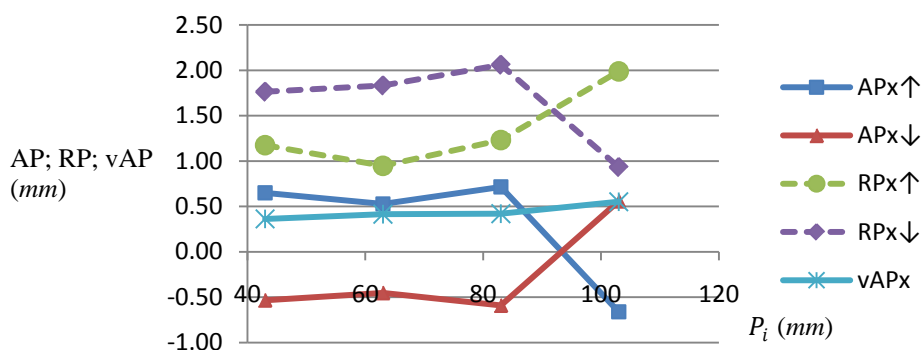


Fig.5.13. Variația erorilor de poziționare în cazul pretensionării firelor cu $F_p=0,6 \text{ daN}$ la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa X

Concluzii. Variația repetabilității RP_x în cele 3 cazuri de aplicare a unei forțe de pretensionare înregistrează o îmbunătățire exponențială cu cât valoarea forței de pretensionare este mai mare. De asemenea, variația preciziei de poziționare vAP_x se apropie de valori mici cu cât se aplică o forță de pretensionare mai mare. De precizat este faptul că valoarea forței de pretensionare împreună cu forța aplicată firului de acționare în timpul mișcării cuplei trebuie să nu depășească domeniul elastic.

B. Rezultate experimentale obținute la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

Se determină erorile de poziționare obținute prin poziționarea efectorului final în patru puncte pe o traiectorie paralelă cu axa Y având coordonatele comandate: P_1 (120.32, 237.55); P_2 (121.96, 219.76); P_3 (121.59, 201.98) și P_4 (120.77, 176.56).

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzori de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa Y sunt prezentate în fig.5.14 pentru a evidenția influența pretensionării firelor cu $F_p=0,2 \text{ daN}$ asupra preciziei de poziționare.

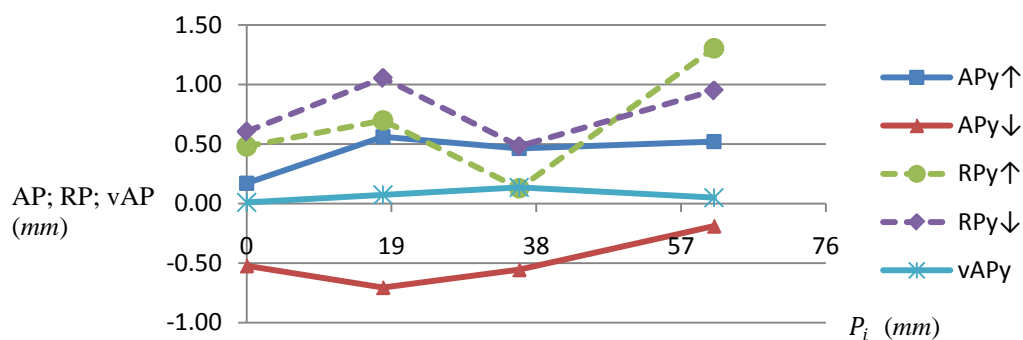


Fig.5.14. Variația erorilor de poziționare în cazul pretensionării firelor cu $F_p=0,2 \text{ daN}$ la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzori de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa Y sunt prezentate în fig.5.15 pentru a evidenția influența pretensionării firelor cu $F_p=0,4 \text{ daN}$ asupra preciziei de poziționare.

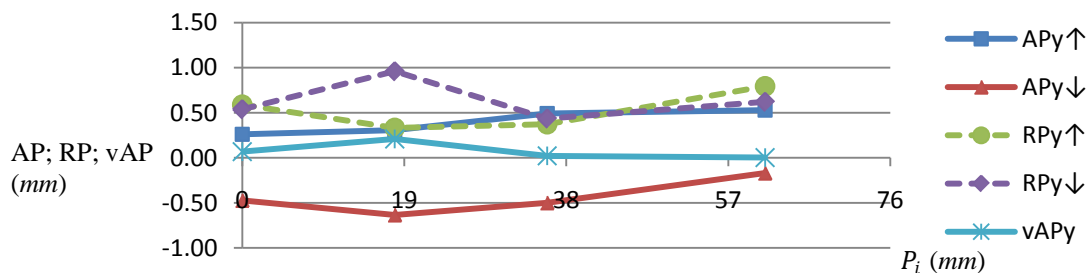


Fig.5.15. Variația erorilor de poziționare în cazul pretensionării firelor cu $F_p=0,4 daN$ la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

Variația preciziei de poziționare și a repetabilității din ambele senzuri de apropiere în cazul poziționării pe o traiectorie paralelă cu axa Y sunt prezentate în fig.5.16 pentru a evidenția influența pretensionării firelor cu $F_p=0,6 daN$ asupra preciziei de poziționare.

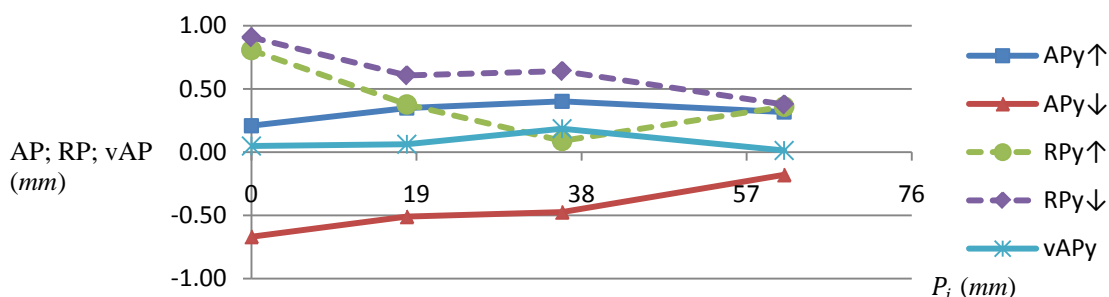


Fig.5.16. Variația erorilor de poziționare în cazul pretensionării firelor cu $F_p=0,6 daN$ la poziționarea organului terminal pe o traiectorie paralelă cu axa Y

Concluzii: Deformațiile elastice ale firelor active apar ca urmare a forțelor de acționare, a maselor transportate de fiecare cuplă, a momentelor rezistente proprii și a forțelor de frecare, iar prin aplicarea unei forțe de pretensionare se diminuează din erorile cumulate la poziționarea interfeței mecanic.

La aplicarea unei pretensionări de $0.2 daN$ se realizează o îmbunătățire a preciziei de poziționare cu aproximativ 17 – 18 % mai mică față de cazul în care nu se realizează pretensionarea, respectiv erorile obținute la stabilirea influenței frecării firelor la deplasarea organului terminal între patru puncte prin variația unghiurilor de rotație θ_2 , θ_4 și θ_5 .

În cazul realizării pretensionării firelor de acționare cu sarcina de $0,4 daN$ se obțin erori de poziționare cu 26 – 27% mai mici, iar la o pretensionare de $0,6 daN$ erorile de poziționare scad cu 35 – 37%.

Ca și în cazul poziționărilor realizate în cele 4 puncte de pe traiectoria paralelă cu axa X, variația repetabilității la poziționările de pe traiectoria paralelă cu axa Y, RP_y , în cele 3 cazuri de aplicare a unei forțe de pretensionare înregistrează o îmbunătățire exponențială cu cât valoarea forței de pretensionare este mai mare. De asemenea, variația preciziei de poziționare vAP_y se apropie de valori mici cu cât se aplică o forță de pretensionare mai mare. Rezultatele obținute experimental confirmă cercetările teoretice privind influența pretensionării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare.

5.4. Concluzii finale ale încercărilor experimentale

1. Rezultatele experimentale ale brațului robotic tip „trompă de elefant” confirmă rezultatele teoretice și stabilesc separat gradul de influență asupra preciziei de

poziționare privind forța de frecare a firelor, abaterile dimensionale ale elementelor structurale și forța de pretensionare a firelor fiecărei cuple.

2. Influența forței de frecare a firelor asupra preciziei de poziționare este dependentă de poziția punctului programat în cadrul spațiului de lucru, astfel fiecare punct din spațiu se obține prin coordonate θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 diferite. Cu cât unghiurile θ_2 , θ_3 , θ_4 și θ_5 sunt mai mari cu atât scade precizia de poziționare.
3. Un alt factor care influențează precizia de poziționare este creșterea gradului de influență a poziției cuplei în structura brațului. Astfel, forța de frecare a cuplelor situate la extremitatea brațului produce erori ale poziției mai mari decât cuplele aflate la baza brațului, valorile unghiurilor θ_2 și θ_5 fiind aceleași.
4. Precizia de poziționare în cazul variației distanțelor dintre cuplele aflate spre extremitatea brațului robotic cu abaterile Δl_5 și Δl_6 este foarte puțin afectată datorită executării elementelor constitutive în clasa de precizie IT7. Cu cât abaterile dimensionale ale elementelor componente aflate spre extremitatea brațului sunt mai mici cu atât erorile de poziționare sunt mai mici.
5. Erorile de poziționare obținute experimental când variază distanța dintre cuple cu abaterile Δl_5 și Δl_6 sunt mici și datorită situării abaterilor spre extremitatea brațului unde mișcarea cuplelor are o influență mai mică asupra preciziei de poziționare față de cuplele aflate spre baza brațului robotic.
6. Influența forței de pretensionare aplicată firelor de acționare asupra preciziei de poziționare este direct proporțională. Cu cât forța de pretensionare a firelor este mai mare cu atât erorile de poziționare sunt mai mici.
7. La erorile obținute experimental în cazul variației forței de pretensionare a firelor de acționare participă și mărimea unghiurilor de rotație a cuplelor împreună cu numărul cuplelor puse în mișcare la realizarea poziționărilor interfeței mecanice.
8. În funcție de lungimea și de rigiditatea firului de acționare a fiecărei cuple se pot stabili limitele forțelor de pretensionare pentru a îmbunătăți rigiditatea sistemului de transmisie. Forțele de pretensionare nu pot depăși împreună cu solicitările din timpul mișcării brațului domeniul elastic.
9. Se observă din analiza rezultatelor obținute experimental în cele 3 seturi de încercări că precizia de poziționare este influențată de erori sistematice și de erori aleatorii. Pentru a crește precizia de poziționare se recomandă diminuarea erorilor sistematice prin introducerea corecțiilor electronice în algoritmul de programare al brațului robotic.

6. Concluzii finale, recomandări și contribuții originale

6.1. Concluzii finale și recomandări

1. În urma cercetării structurilor de brațe robotice tip „trompă de elefant” s-a constatat că precizia de poziționare spațială este o cerință importantă pentru multe aplicații din mediul industrial, precum inspecțiile tehnice sau manipularea diferitor sarcini, care cer, de asemenea, ca brațele robotice să fie și flexibile. Precizia de poziționare împreună cu flexibilitatea brațului robotic sunt cerințe definitorii mediului industrial la momentul actual.
2. Pentru a obține flexibilitate în poziționare și manevrabilitate în spații înguste se impune un diametru cât mai mic posibil al brațului pentru care se folosesc mecanisme de acționare cu fire dispuse prin interiorul structurii, acționate de motoare amplasate la baza brațului robotic. Rezultatele cercetării au dus la elaborarea unei structuri poliarticulate, capabilă să realizeze poziționări spațiale de precizie. Obținerea unui diametru minimizat este necesară cu precădere în cazul brațelor robotice folosite în domeniul medical pentru operații minim invazive.
3. Pentru creșterea preciziei de poziționare a brațelor poliarticulate tip „trompă de elefant” au fost identificate și cercetate principalele surse de erori privind poziționarea: abaterile elementelor componente ale structurii, rigiditatea firelor, variația lungimii firelor la schimbări de formă ale brațului, forțele de frecare între fir și ghidaje. Toate aceste influențe au fost cercetate teoretic și experimental pentru fiecare cupă din structura brațului.
4. Cercetarea teoretică și experimentală a principalelor surse de erori identificate privind precizia de poziționare a fost aplicată pe o structură concepută pentru a obține un raport lungime-diametru mare și care să poată realiza poziționări spațiale.
5. Modelul geometric direct stabilit al brațului robotic tip „trompă de elefant” definește elementele matricei omogene totale de trecere. Se constată că la brațul robotic cu 8 grade de mobilitate ecuațiile de poziționare obținute sunt ample. Stabilirea gradului de influență a abaterilor parametrilor geometrici asupra preciziei de poziționare doar prin analiza ecuațiilor de poziționare este greu de eșantionat în funcție de mișcarea de rotație a fiecărei cuple. Ecuațiile de poziționare obținute pot fi folosite pentru a stabili analitic influența abaterilor sistematice a parametrilor geometrici din cuple asupra preciziei de poziționare, prin simulare numerică în cadrul limbajului de calcul MatLab.
6. În cazul brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate, ecuațiile de poziționare au putut fi aduse sub o formă simplificată care permite stabilirea influenței abaterilor parametrilor geometrici ai cuplelor asupra preciziei de poziționare. Din ecuațiile de poziționare se observă că abaterile unghiurilor de rotație a cuplelor care se află spre extremitatea brațului robotic afectează cel mai puțin precizia de poziționare atunci când rotația tuturor cuplelor este în aceeași direcție.
7. Modelul geometric invers al brațului robotic tip „trompă de elefant” stabilește ecuațiile de poziționare în funcție de mișcarea cuplelor. Astfel, având date coordonatele de poziționare ale punctului caracteristic atașat organului terminal se pot determina mișcările de rotație ale cuplelor. Însă, sistemul de ecuații obținut în cadrul modelării conține 3 variabile și 6 necunoscute. Pentru determinarea unor soluții unice se impun restricții suplimentare. Până în prezent mai multe colective de cercetători au stabilit metode de simplificare pentru determinarea soluțiilor unice. Ecuațiile obținute în cadrul

modelării geometriei inverse pot fi folosite pentru studiul analitic al influenței abaterilor sistematice de la nivelul cuplelor ($\Delta\theta_{ix}$) asupra preciziei de poziționare.

8. Elementele componente din structura brațului robotic sunt realizate într-o clasă de precizie careia îi corespund abateri cu anumite câmpuri de toleranță, de ordinul micrometrilor, specifice clasei de precizie. Erorile de natură geometrică ale elementelor constructiv structurale de la brațul robotic tip „trompă de elefant” influențează precizia poziționării și orientării organului terminal. La ambele structuri de brațe robotice considerate în cadrul analizei, erorile de poziționare medii pătratice ale organului terminal sunt maxime în cazul situării abaterilor liniare anterior ultimei articulații a brațului robotic, respectiv anterior cuplei cinematice aflate la extremitatea brațului din apropierea organului terminal. Din punct de vedere tehnologic este recomandat ca valorile abaterilor elementelor constructive ale brațelor robotice tip „trompă de elefant” să fie cât mai mici. Acest aspect poate fi realizat folosind metoda sortării pieselor, întâlnită în cazul producției de serie. Prin urmare, metoda poate fi aplicată și în cazul brațelor robotice tip „trompă de elefant” dacă fabricarea lor îndeplinește această condiție. O altă măsură ar fi de compensare a acestor erori sistematice prin introducerea corecțiilor electronice în cadrul algoritmului de optimizare al brațului robotic.
9. În cadrul determinării spațiului de lucru de la brațul robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate, ce face obiectul standului de încercări experimentale, s-au stabilit ecuațiile care definesc conturul spațiului de lucru. Ecuațiile de poziționare a organului terminal determinate pot fi folosite pentru obținerea spațiului erorilor sistematice de poziționare. Introducând în aceste ecuații valorile erorilor sistematice se obțin ecuațiile de poziționare efective ale organului terminal de pe conturul spațiului de lucru. Astfel, diferența dintre poziționările efective și cele nominale obținute la poziționarea organului terminal pe conturul spațiului de lucru definește conturul spațiului erorile de poziționare sistematice.
10. În urma cercetării variației în lungime a firelor de acționare s-a obținut că acestea sunt distincte și particulare fiecărei cuple de la brațul robotic tip „trompă de elefant”. Variațiile în lungime a firelor de acționare apar datorită înfășurării-desfășurării firelor pe suprafața circulară și interioară ghidajului. Din această cauză, dimensiunea razei suprafeței interioare ghidajului afectează variațiile în lungime a firelor de acționare în timpul mișcării cuplelor brațului robotic. Astfel, cu cât această rază este mai mare cu atât variația în lungime a firelor de acționare este mai mare. De asemenea, variația în lungime a firelor de acționare este influențată de numărul cuplelor puse în mișcare anterior cuplei acționate și de mărimea unghiului de rotație al fiecăreia. Astfel, cu cât numărul cuplelor anterioare celei acționate este mai mare cu atât variația în lungime a firelor de acționare este mai mare. Variația lungimii firelor de acționare afectează în mod direct rigiditatea sistemului de transmitere a mișcării și implicit, precizia de poziționare.
11. Un alt factor major care influențează precizia de poziționare a unei cuple este momentul rezistent calculat la nivelul cuplei și care depinde de: greutatea obiectului manipulat, greutatea elementelor în aval de cupla analizată și momentul rezistent propriu al cuplei. Firele de acționare ale cuplelor sunt supuse unor solicitări care determină deformații elastice variabile în timpul mișcării brațului robotic tip „trompă de elefant”. Deformațiile elastice rezultate în urma solicitărilor din fiecare cuplă și a momentelor rezistente variabile, împreună cu variațiile în lungime a firelor de acționare, determină apariția unor abateri unghiulare în articulații. În cazul brațului robotic tip „trompă de elefant” cu 6 grade de mobilitate s-au obținut analitic variații ale

preciziei de poziționare pe direcția axelor Y și Z ca urmare a rotației cuplelor pe direcția axei X.

12. În urma analizei influenței frecării firelor de acționare pe suprafețele interioare structurii brațului robotic tip „trompă de elefant” se constată că deformațiilor elastice rezultate determină variații ale preciziei de poziționare a cuplelor. Erorile de poziționare sunt în afara buclei de control și necesită aplicarea unor metode de compensare sau de reducere a lor. Erorilor de poziționare obținute în cadrul analizei sunt erori sistematice și pot fi compensate prin aplicarea corecțiilor în cadrul algoritmului de programare a brațului robotic conform cu abaterile de poziționare obținute în cadrul calcului analitic.
13. În cazul brațului robotic tip „trompă de elefant”, s-a stabilit că erorile sistematice sunt datorate în principal deformațiilor elastice ale firelor de acționare care apar ca urmare a forțelor de acționare, a maselor transportate de fiecare cuplă, a momentelor rezistente proprii și a forțelor de frecare. Variația lungimii firelor de acționare influențează direct rigiditatea sistemului de transmitere a mișcării și implicit precizia de poziționare. Totalul deformațiilor elastice cumulate în urma solicitărilor menționate necesită compensarea lor atât prin sisteme de pretensionare cât și în cadrul algoritmului de programare al brațului robotic. S-a demonstrat analitic că folosirea unui mecanism de pretensionare al firelor de acționare optimizează rigiditatea acestora cu cel mult 50%. Rezultatele obținute analitic sunt necesare pentru viitoarele determinări experimentale ale preciziei de poziționare a brațului robotic tip „trompă de elefant”. Metoda de optimizare se recomandă inginerilor proiectanți pentru creșterea rigidității firelor folosite la acționarea cuplelor atât la roboții industriali cât și în alte aplicații unde se folosesc mecanisme de transmitere tangențială a mișcării prin fir-scripete.
14. Rezultatele încercărilor experimentale privind influența frecării firelor de acționare asupra preciziei de poziționare, s-au obținut, pentru cele 3 cazuri de poziționare aflate pe direcția axei X, cu variații ale repetabilității (RP_x) la valori mai bune în cazul rotației cuplelor cu unghiuri mai mici. De asemenea, pe măsură ce punctele de poziționare se află spre extremitatea spațiului de lucru al brațului repetabilitatea nu mai este la fel de bună. De asemenea, variația preciziei de poziționare (vAP_x) ajunge la valori maxime când pentru poziționare se folosesc valori mai mari ale curselor cuplelor aflate spre baza brațului robotic. Rezultatele experimentale le-au confirmat pe cele teoretice.
15. Analizând variația repetabilității (RP_y) obținută în cadrul încercărilor experimentale cu poziționarea interfeței mecanice pe 3 traiectorii paralele cu axa Y se constată că numărul cuplelor puse în mișcare pentru poziționare influențează valorile repetabilității. Cu cât se folosesc mai puține cuple pentru a efectua o poziționare a interfeței mecanice cu atât repetabilitatea este mai bună. Numărul cuplelor puse în mișcare împreună cu mărimea unghiului de rotație stabilesc valori ale repetabilității mari în cazul situării interfeței mecanice în puncte ale spațiului de lucru aflate spre baza brațului robotic, respectiv cu cât rotațiile cuplelor sunt mai mari. Variația preciziei de poziționare (vAP_y) este într-un interval de variație mic la poziționările efectuate pe cele 3 traiectorii paralele cu axa Y față de poziționările realizate pe cele 3 traiectorii paralele cu axa X. Și în acest caz, rezultatele experimentale le-au confirmat pe cele teoretice.
16. În urma rezultatelor obținute în cadrul încercărilor experimentale în care variaza distanța dintre cuple aflate spre extremitatea brațului robotic, cu abateri dimensionale Δl_5 și Δl_6 , se obțin variații mici ale repetabilității la poziționări ale interfeței mecanice pe direcția axei X (RP_x) și pe direcția axei Y (RP_y). De asemenea, variația preciziei de

poziționare pe direcția axei X (vAP_x) și pe direcția axei Y (vAP_y) este foarte puțin afectată la valorile abaterilor dimensionale Δl_5 și Δl_6 situate în clasa de precizie IT7. Influența abaterilor dimensionale, rezultate în urma prelucrărilor mecanice, asupra parametrilor statici (precizia de poziționare, repetabilitatea) produce perturbații asupra poziționării, înregistrând valori diferite în spațiul de lucru.

17. Din analiza valorilor obținute pe o traiectorie paralelă cu axa X și pe o traiectorie paralelă cu axa Y, se constată că influența abaterilor asupra preciziei de poziționare diferă în funcție de situarea abaterilor elementelor componente ale brațului. Ca măsură de creștere a preciziei de poziționare la brațele robotice tip „trompă de elefant”, se impune ca elementele componente din structura brațului aflate în apropierea organului terminal să fie executate cu abateri dimensionale cât mai mici posibil pentru a obține erori de poziționare minime. O altă măsură de compensare a acestor erori sistematice este introducerea corecțiilor electronice în cadrul algoritmului de optimizare al brațului robotic. În cazul producției de serie a elementelor constructive piesele pot fi sortate, în cadrul operațiilor de control, pe grupe, după dimensiunile efective. Prin urmare, metoda poate fi aplicată și în cazul brațelor robotice tip „trompă de elefant” dacă fabricarea lor îndeplinește această condiție. Rezultatele experimentale confirmă rezultatele teoretice.
18. În urma rezultatelor obținute în cadrul încercărilor experimentale în care variaza forța de pretensionare aplicată firelor de acționare se obțin variații ale repetabilității, RP_x și RP_y , îmbunătățite pe măsură ce se aplică o forță de pretensionare mai mare. De precizat este faptul că valoarea forței de pretensionare împreună cu forța aplicată firului de acționare în timpul mișcării cuplei au o relație reciproc dependentă. Rezultatele experimentale confirmă rezultatele teoretice.
19. În urma rezultatelor obținute în cadrul încercărilor experimentale se recomandă inginerilor proiectanți folosirea unui sistem de pretensionare controlat pentru creșterea rigidității firelor folosite la acționarea cuplelor atât la roboții industriali cât și în alte aplicații unde se folosesc mecanisme de transmitere tangențială a mișcării prin fir-scripete.

6.2. Contribuții originale

1. A fost realizat stadiul actual al cercetărilor brațelor robotice tip „trompă de elefant”, punându-se în evidență posibilitățile de poziționare, acționare cât și sistemul de transmisie a mișcării la cuple. De asemenea, au fost prezentate cercetările privind analiza cinematică și dinamică a brațelor robotice tip „trompă de elefant”, cât și aspecte critice ale soluțiilor constructive existente.
2. A fost concepută o nouă structură poliarticulată pentru brațul robotic tip „trompă de elefant” în scopul minimizării diametrului brațului robotic și care să aibă posibilitate de poziționare spațială.
3. Cercetările teoretice au avut la bază stabilirea modelului matematic direct și invers pentru structuri ale brațului robotic cu 8 și 6 grade de mobilitate; varianta structurală cu 8 grade de mobilitate având un calcul laborios rezolvat cu ajutorul limbajului de calcul MatLab.
4. Pentru creșterea preciziei de poziționare au fost stabilite, în baza modelului matematic, influențele abaterilor liniare ale elementelor de structură asupra poziționărilor brațelor robotice „trompă de elefant”.

5. A fost determinat spațiul de lucru pentru noua structură poliarticulată pe baza modelului matematic specific, unde a fost pus în evidență forma, dar și volumul generos al spațiului.
6. În scopul creșterii preciziei de poziționare la nivel de cuplă, a fost elaborată schema de acționare a fiecărei cuple, iar apoi au fost cercetate variațiile de lungime ale firelor ca urmare a înfășurării pe suprafațele circulare. Aceste cercetări au vizat direct creșterea preciziei de poziționare spațială a robotului tip „trompă de elefant”.
7. Au fost stabilite modalitățile de creștere a rigidității firelor folosind pretensionarea, specifice fiecărei cuple.
8. Încercările experimentale au fost realizate pe un stand conceput în acest sens, având o structură poliarticulară din 5 cuple înseriate și folosind accesorii adaptabile pentru utilizarea interferometrului cu laser la măsurarea preciziei de poziționare.
9. În urma rezultatelor obținute prin încercări experimentale s-a realizat o bază de date pe care inginerul proiectant de brațe robotice tip „trompă de elefant” le poate folosi în vederea îmbunătățirii sistemului de acționare și ghidare.
10. Baza de date creată în urma încercărilor experimentale poate fi folosită pentru a realiza poziționări spațiale de precizie ale brațului robotic tip „trompă de elefant” în funcție de situarea organului terminal în spațiul de lucru.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

1. Dezvoltarea structurii brațelor robotice poliarticulate unde fiecare cuplă să poată executa mișcarea de rotație în două plane perpediculare, în acest caz cuplele vor fi sferice reușind astfel să efectueze poziționare spațială în orice punct al spațiului de lucru.
2. Mai mult, structura poliarticulată având cuple sferice poate fi utilizată (adaptată) pentru executarea găurilor neliniare: curbe, șerpuite, evolventice, eliptice; cu mișcări spațiale a brațului robotic dotat la extremitate cu un electrod pentru prelucrarea prin electroeroziune.
3. Aceeași structură de braț robotic constituit din cuple sferice își poate găsi aplicații în domeniul medical (chirurgie) prin executarea de trasee care au traiectorii bine definite, în scopul ocolirii diferitor organe interne din corpul uman și pentru a poziționa extremitatea brațului într-un punct spațial stabilit.
4. Sistemul poliarticulat, atât cel cercetat cât și cel propus spre dezvoltare (având cuple sferice) poate fi completat la extremitatea brațului robotic cu un modul de deplasare liniar, strict necesar pentru operații de cauterizare, tăiere, specifice intervențiilor chirurgicale minim invazive.
5. Brațul robotic cercetat poate avea o îmbunătățire a preciziei de poziționare intervenind în sistemul de comandă cu compensări ale valorilor erorilor sistematice în mod asemănător celor cercetate în teză.
6. La structura poliarticulată cercetată, implementarea unui dispozitiv de reglare automată a rigidității firelor de acționare ar reduce erorile datorate deformațiilor elastice din firele de acționare dar ar face complexă construcția brațului, deoarece fiecare cuplă va avea dispozitiv propriu.

Referințe bibliografice

- [1] Abderrahim M., Khamis A., Garrido S., Moreno L., „Accuracy and Calibration Issues of Industrial Manipulators”, *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application I*, 2006, 131 - 146;
- [2] Ahmmad A. S., Khan R., Rahman M. M., Billah M., „Position Control of a Four Link Hyper Redundant Robotic Manipulator”, *Asian Journal of Scientific Research*, 2013, vol. 6: 67-77;
- [3] Alshamasin M., Ionescu F., Al-Kasasbeh R. T., Alwadie A., „Investigation of Kinematics for Articulated Robot Arm with SolidDynamics 2004+ and Validation by MATLAB/Simulink”, *International Review on Computers and Software*, 2012, vol. 7: 928-936;
- [4] Ananthanarayanan H., Ordóñez R., „Real-Time Inverse Kinematics of $(2n+1)$ DOF Hyper-Redundant Manipulator Arm via a Combined Numerical and Analytical Approach”, *Mechanism and Machine Theory*, 2015, vol. 91: 209 - 226;
- [5] Anderson V. C., Horn R. C., „Tensor Arm Manipulator”, USA Patent, 1970;
- [6] Arakelian V., Le Baron J.-P., Mottu P., „Torque Minimisation of the 2-DOF Serial Manipulators Based on Minimum Energy Consideration and Optimum Mass Redistribution”, *Mechatronics*, 2011, vol. 21: 310 - 314;
- [7] Atawnih A., Papageorgiou D., Doulgeri Z., „Kinematic Control of Redundant Robots with Guaranteed Joint Limit Avoidance”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, vol. 79: 122 - 131;
- [8] Bartow A., Kapadia A., Walker I. D., „A Novel Continuum Trunk Robot Based on Contractor Muscles”, *Recent Advances in Circuits, Communications and Signal Processing*, 2013, 181 -186;
- [9] Bercan N., Diaconescu D., *Mecanisme cu fire pentru roboți*. Sibiu: Editura Universității din Sibiu, 1995;
- [10] Boragiu T., Hossu A., *Sisteme educaționale în robotică*. București: Editura Tehnică, 1991;
- [11] Butunoi P.-A., Stan G., **Ciofu C.**, „Research Regarding Improvement of Dynamic Behaviour for High-Ratio Planetary Gears”, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 657: 549 - 553;
- [12] Butunoi P. A., Stan G., **Ciofu C.**, Ungureanu A. L., „Research Regarding Backlash Improvement for Planetary Speed Reducers used in the Actuation of Industrial Robots”, *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 834: 114 - 119;
- [13] Butunoi P. A., Stan G., **Ciofu C.**, Ungureanu A. L., „A Comparative Approach Regarding the Dynamic Behaviour of Planetary Transmissions used in Industrial Robots”, *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 834: 120 - 125;
- [14] Calinon S., Bruno D., Malekzadeh M. S., Nanayakkara T., Caldwell D. G., „Human–Robot Skills Transfer Interfaces for a Flexible Surgical Robot”, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2014, vol. II (6): 81-96;
- [15] Calisti M., Giorelli M., Levy G., Mazzolai B., Hochner B., Laschi C., Dario P., „An Octopus-Bioinspired Solution to Movement and Manipulation for Soft Robots”, *Bioinspiration and Biomimetics*, 2011, vol. 6: 036002;
- [16] Cheng J., Kimc J., Jiang Z., Chea W., „Dual Quaternion-Based Graphical Slam”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, vol. 77: 15 - 24;
- [17] Chiaverini S., „Singularity-Robust Task-Priority Redundancy Resolution for Real-Time Kinematic Control of Robot Manipulators”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997, vol. 13/3: 398 - 410;

- [18] Choi D., Oh J. H., „Active Suspension for a Rapid Mobile Robot Using Cartesian Computed Torque Control”, *J Intell Robot Syst*, 2015, vol. 79: 221 - 235;
- [19] Chovancová A., Fico T., Hubinský P., Duchoň F., „Comparison of Various Quaternion-Based Control Methods applied to Quadrotor with Disturbance Observer and Position Estimator”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, vol. 79;
- [20] Ciofu C., Butunoi P.-A., Stan G., „Robotic Elephant’s Trunk Arm with Flexible Spatial Positioning”, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 657: 829 - 833;
- [21] Ciofu C., Stan G., „Research Regarding Stiffness Optimization of Wires used for Joint Actuation from an Elephant’s Trunk Robotic Arm”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 161: 012035;
- [22] Ciofu C., Stan G., „Research Regarding Wires Elastic Deformations Influence on Joints Positioning of a Wire-Driven Robotic Arm”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 145: 052006;
- [23] Ciofu C., Stan G., „Research Regarding Friction Influence of Wires to Joints Interior on Precision Positioning of a Robotic Arm”, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII / 1: 24 - 29;
- [24] Ciofu C., Stan G., „Research Regarding the Influence of Driving-Wires Length Change on Positioning Precision of a Robotic Arm”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 145: 052007;
- [25] Conti R., Meli E., Ridolfi A., „A Novel Kinematic Architecture for Portable Hand Exoskeletons”, *Mechatronics*, 2016, vol. 35: 192 - 207;
- [26] Cowan L. S., Walker I. D., „The Importance of Continuous and Discrete Elements in Continuum Robots”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, vol. 10;
- [27] Cruceru C., Enache M., *Calitatea și fiabilitatea echipamentelor mecatronice*. Târgoviște: Editura Macarie, 2002;
- [28] Dehghani M., Moosavian S. A. A., „Dynamics Modeling of a Continuum Robotic Arm with a Contact Point in Planar Grasp”, *Journal of Robotics*, 2014, vol. 13;
- [29] Di Gregorio M., Botnaru A., Bairy L., Lorge F., „Passing from Open to Robotic Surgery for Dismembered Pyeloplasty: A Single Centre Experience”, *Springer Plus*, 2014, vol. 3: 580 - 586;
- [30] Diao X., Ma O., „Workspace Analysis of a 6-DOF Cable Robot for Hardware-in-the-Loop Dynamic Simulation”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China*, 2006, 4103 - 4108;
- [31] Direkwatana C., Suthakorn J., Wilasrusmee C., „Development of Wire-Driven Laparoscopic Surgical Robotic System, “MU-LapaRobot””, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2011, 485 - 490;
- [32] Douadi L., Spinello D., Gueaieb W., „Planar Kinematics Analysis of a Snake-Like Robot”, *Robotica*, 2014, vol. 32: 659 - 675;
- [33] Drimer D., Oprean A., Dorin A., Alexandrescu N., Paris A., Panaitopol H., Udrea C., Crișan I., *Roboți industriali și manipolatoare*. București: Editura Tehnică, 1985;
- [34] Dudiță F., Diaconescu D., Gogu G., *Mecanisme articulate. Inventică. Cinematică în abordare filogenică*. București: Editura Tehnică, 1989;
- [35] Dumas C., Caro S., Cherif M., Garnier S., „Joint Stiffness Identification of Industrial Serial Robots”, *Robotica*, 2012, vol. 30: 649 - 659;
- [36] Dumitru A., *Mecatronică. Bazele sistemelor mecatronice* vol. I. Brașov: Universitatea „Transilvania” din Brașov Catedra de Mecanică Fină și Mecatronică, 2006;

- [37] Dumitru S., Cojocaru D., Dumitru N., Ciupitu N., Geonea I., Dumitru V., „Finite Element Modeling of a Polyarticulated Robotic System”, *Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium*, 2009, vol. 20: 1937 - 1938;
- [38] Fang J., Zhao J., Mei T., Chen J., „Online Optimization Scheme with Dual-Mode Controller for Redundancy-Resolution with Torque Constraints”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, vol. 40: 44 - 54;
- [39] Forgione A., „In Vivo Microrobots for Natural Orifice Transluminal Surgery. Current Status and Future Perspectives”, *Surgical Oncology*, 2009, vol. 18: 121 - 129;
- [40] Gacsadi A., *Bazele Roboticii. Curs pentru uzul studenților*. Universitatea din Oradea, 2008;
- [41] Gao D., Ihrke G. A., „Low-Stroke Actuation for a Serial Robot”, SUA Patent, 2014;
- [42] Gomes P., „Surgical Robotics: Reviewing the Past, Analysing the Present, Imagining the Future”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, vol. 27: 261 - 266;
- [43] Gravagne I. A., Rahn C. D., Walker I. D., „Large Deflection Dynamics and Control for Planar Continuum Robots”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, vol. 5;
- [44] Guo J., Tian G., „Mechanical Design and Analysis of the Novel 6-DOF Variable Stiffness Robot Arm Based on Antagonistic Driven Joints”, *J Intell Robot Syst*, 2016, vol. 82: 207 - 235;
- [45] Guo S., Cheng H., Xie C., „An Algebraic Inverse Method of 7-DOF Manipulator Redundant Robots”, *Journal of Applied Science*, 2013, vol. 13: 2366-2371;
- [46] Guo Y., Yin S., Ren Y., Zhu J., Yang S., Ye S., „A Multilevel Calibration Technique for an Industrial Robot with Parallelogram Mechanism”, *Precision Engineering*, 2015, vol. 40: 261 - 272;
- [47] Hannan M. W., Walker I. D., „Kinematics and Implementation of an Elephant's Trunk Manipulator and other Continuum Style Robots”, *Journal of Robotic System*, 2003, vol. 2;
- [48] Hannan M. W., Walker I. D., „Analysis and Experiments with an Elephant's Trunk Robot”, *Advanced Robotics*, 2001, vol. 15: 847 – 858;
- [49] Hayder F. N. A.-S., Corves B., Zhu W.-H., „Function Approximation Technique-Based Adaptive Virtual Decomposition Control for a Serial-Chain Manipulator”, *Robotica*, 2014, vol. 32: 375 - 399;
- [50] He B., Wang Z., Li Q., Xie H., Shen R., „An Analytic Method for the Kinematics and Dynamics of a Multiple-Backbone Continuum Robot”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10: 84-96;
- [51] Heidari S., Piltan F., Shamsodini M., Heidari K., Zahmatkesh S., „Design New Nonlinear Controller with Parallel Fuzzy Inference System Compensator to Control of Continuum Robot Manipulator”, *Int J of Control and Automation*, 2013, vol. 6 (4): 115 – 134;
- [52] Ho M., Ananthanarayanan A., Ehrlich L., Gullapalli R., Simard J. M., Gupta S. K., Desai J. P., „Towards a Minimally Invasive Neurosurgical Intracranial Robot”, *IEEE ICRA - Full Day Workshop on Snakes, Worms and Catheters: Continuum and Serpentine Robots for Minimally Invasive Surgery*, 2010, 27 - 29;
- [53] Huda M. N., Yu H., Cang S., „Robots for Minimally Invasive Diagnosis and Intervention”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, vol. 41: 127 - 144;
- [54] Ishida T., Miyake Y., Teramoto K., Takeuchi Y., „Development of an Electrode Motion Control Device for Curved Hole Electrical Discharge Machining”, *International Journal of Automation Technology*, 2008, vol. 2;

- [55] Ispas V., Pop I. I., Bocu M., *Roboți industriali*. Cluj-Napoca: Editura Dacia, 1985;
- [56] Jaime G., Lesso R., Rico J. M., Alici G., „The Kinematics of Modular Spatial Hyper-Redundant Manipulators formed from RPS-Type Limbs”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59;
- [57] Jones B. A., Walker I. D., „Practical Kinematics for Real-Time Implementation of Continuum Robots”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, vol. 22: 1087 - 1099;
- [58] Jones B. A., Walker I. D., „Kinematics for Multisection Continuum Robots”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, vol. 22: 43 - 57;
- [59] Khan R., Watanabe M., Shafie A. A., „Kinematics Model of Snake Robot Considering Snake Scale”, *American Journal of Applied Science*, 2010, vol. 7: 669 - 674;
- [60] Khosravi M. A., Taghirad H. D., „Dynamic Analysis and Control of Cable Driven Robots Considering Elasticity in Cables”, *CCToMM M3 Symposium*, 2011;
- [61] Kier W. M., Smith K. K., „Tongues, Tentacles and Trunks: The Biomechanics of Movement in Muscular-Hydrostats”, *Zoological Journal of the Linnean Society*, 1985, vol. 83: 307 - 324;
- [62] Kim W., Shin D., Lee Y., Chung C. C., „Simplified Torque Modulated Microstepping for Position Control of Permanent Magnet Stepper Motors”, *Mechatronics*, 2016, vol. 35: 162 -172;
- [63] Kim Y.-J., Cheng S., Kim S., Iagnemma K., „Design of a Tubular Snake-like Manipulator with Stiffening Capability by Layer Jamming”, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, vol. IEEE/RSJ;
- [64] Kitagawa A., Tsukagoshi H., Igarashi M., „Development of Small Diameter Active Hose-II For Search and Life-prolongation of Victims under Debris”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2003, vol. 15: 474 - 481;
- [65] Lam L. T., Xu Y., „Biologically Inspired Tree-climbing Robot with Continuum Maneuvering Mechanism”, *Journal of Field Robotics*, 2012, vol. 29: 843–860;
- [66] Lei Y., Miller S. F., „Pose Estimation and Machining Efficiency of an Endoscopic Grinding Tool”, *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, vol. 69: 2019–2029;
- [67] Lewis F.L., s.a., *Robotics. Mechanical Engineering Handbook*: Frank Kreith, 1999;
- [68] Li J., Xu C., Yao Y., Ding J., Fang H., „Predicting Synchronous Accuracy of the Wire Sheave Drives”, *Precision Engineering*, 2015, vol. 39: 261-269;
- [69] Li Z., Du R., Zhang Y., Li H., „Robot Fish with Novel Wire-Driven Continuum Flapping Propulsor”, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 300 - 301: 510 - 514;
- [70] Liao B., Li Z., Du R., „Robot Tadpole with a Novel Biomimetic Wire-Driven Propulsor”, *Proceedings of the 2012 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics*, 2012, 557 – 562;
- [71] Liebe A. R., Hieger C., „Automated Workspace-Visualization for Serial and Parallel Robots”, *Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 2011, vol. 22: 1275-1276;
- [72] Luo S., Ahmad S., „Adaptive Control of Kinematically Redundant Robots”, *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 1997, vol. 14: 225 - 253;
- [73] Madani T., Daachi B., Benallegue A., „Adaptive Variable Structure Controller of Redundant Robots with Mobile/Fixed Obstacles Avoidance”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, vol. 61: 555–564;
- [74] Mardare I., *Robotehnică*. Chișinău: Editura Tehnică-Info, 2006;
- [75] Maryam A., „Redundancy Resolution of Cable-Driven Parallel Manipulators”, Doctor of Philosophy, Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 2012;

- [76] Max A. G.-P., „The Unified Orthogonal Architecture of Industrial Serial Manipulators”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, vol. 29: 257 - 271;
- [77] McMahan W., Chitrakaran V., Csencsits M., Dawson D., Walker I. D., Jones B. A., Pritts M., Dienno D., Grissom M., Rahn C. D., „Field Trials and Testing of the OctArm Continuum Manipulator”, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, 2336 - 2341;
- [78] McMahan W., Jones B., Walker I. D., „Design and Implementation of a Multi-Section Continuum Robot: Air – Octor”, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, vol. IEEE/RSJ: 3345-3352;
- [79] McMahan W., Jones B., Walker I., Chitrakaran V., Seshadri A., „Robotic Manipulators Inspired by Cephalopod Limbs”, *Proceedings of the Canadian Design Engineering Network Conference 2004*, 2004;
- [80] s.a. McMahan W., „Field Trials and Testing of the OctArm Continuum Manipulator”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, 2336 - 2341;
- [81] Merlet J.-P., „Analysis of Wire Elasticity for Wire-Driven Parallel Robots”, *Proceedings of EuCoMes the second European Conference on Mechanism Science*, 2008;
- [82] Messay T., Ordóñez R., Marcil E., „Computationally Efficient and Robust Kinematic Calibration Methodologies and their Application to Industrial Robots”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, vol. 37: 33 - 38;
- [83] Nazari V., Notash L., „Failure Recovery of Manipulators under Joint Velocity Limits using Constrained Optimization and Partitioned Jacobian Matrix”, *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 99: 58 - 71;
- [84] Ning K., Wörgötter F., „Control System Development for a Novel Wire-Driven Hyper-Redundant Chain Robot, 3D-Trunk”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 1083 - 4435;
- [85] Worgotter F. Ning K., „Control System Development for a Novel Wire-Driven Hyper-Redundant Chain Robot, 3D-Trunk”, *IEEE/ASME Trans. on Mech.*, 2012, vol. 17;
- [86] Noorani SMRS., Ghanbari A., „Explicit Dynamic Formulation for n-R Planar Manipulators with Frictional Interaction between End-effector and Environment”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 8: 91-100;
- [87] Özgür E., Mezouar Y., „Kinematic Modeling and Control of a Robot Arm using Unit Dual Quaternions”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, vol. 77: 66 - 73;
- [88] Patel S., Sobh T., „Task Based Synthesis of Serial Manipulators”, *Journal of Advanced Research*, 2015, vol. 6: 479 - 492;
- [89] Construction of a Hyper Redundant Robotic Tentacle Manipulator;
- [90] Petrișor S.-M., Bârsan G., „Contributions to the Calculus and Constructions of the Translation and Rotation Modules from the Mechanical Structure of the Serial Modular Industrial Robot Type TRTRR”, *Revista Academiei Forțelor Terestre*, 2010, vol. 57/1: 145 -150;
- [91] Pietrowska Z., Tchon K., „Dynamics and Motion Planning of Trident Snake Robot”, *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 2014, vol. 75: 17–28;
- [92] Pigani L., Gallina P., „Cable-Direct-Driven-Robot (CDDR) with a 3-Link Passive Serial Support”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, vol. 30: 265 – 276;
- [93] Sadrnia O. R., Piltan F., Jafari M, Eram M., Shamsodini M., „Design PID Estimator Fuzzy Plus Backstepping to Control of Uncertain Continuum Robot”, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2013, vol. 6 (4): 31 - 48;

- [94] Sangian D., Naficy S., Spinks G. M., Tondu B., „The Effect of Geometry and Material Properties on the Performance of a Small Hydraulic McKibben Muscle System”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, vol. 234: 150 - 157;
- [95] Seetharamaiah P., Venkateswara R. M., Satyanarayana G. V., „Design and Development of Robot Hand System”, *Journal of Computer Science* 7, 2011, vol. 7: 909-916;
- [96] Shamma E., Wolf A., Choset H., „Three Degrees-of-Freedom Joint for Spatial Hyper-Redundant Robots”, *Mechanism and Machine Theory*, 2006, vol. 41;
- [97] Siciliano B., „Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators: A Tutorial”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1990, vol. 3: 201 - 212;
- [98] Slamani M., Bonev I. A., „Characterization and Experimental Evaluation of Gear Transmission Errors in an Industrial Robot”, *Industrial Robot: An International Journal*, 2013, vol. 40/5: 441 - 449;
- [99] Slamani M., Nubiola A., Bonev I. A., „Modeling and Assessment of the Backlash Error of an Industrial Robot”, *Robotica*, 2012, vol. 30: 1167 - 1175;
- [100] Slamani M., Nubiola A., Bonev I., „Assessment of the Positioning Performance of an Industrial Robot”, *Industrial Robot: An International Journal*, 2012, vol. 39/1: 57 - 68;
- [101] Song S., Li Z., Yu H., Ren H., „Shape Reconstruction for Wire-Driven Flexible Robots Based on Bézier Curve and Electromagnetic Positioning”, *Mechatronics*, 2015, vol. 29: 28 – 35;
- [102] Stan G., *Roboți industriali*. București: Editura Didactică și pedagogică 2004;
- [103] Stan G., Pal A., Ciobanu R. C., „Mecanism poliarticulat”, România Patent, 2012;
- [104] Svetlík J., Dobránský J., „Analysis of Workspace Modular Serial Manipulator”, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal Of Engineering*, 2011, vol. Tome IX: 33-36;
- [105] Tavakoli M., Marques L., Aníbal T. de Almeida, „Development of an Industrial Pipeline Inspection Robot”, *Industrial Robot: An International Journal*, 2010, vol. 37/3: 309 - 322;
- [106] Tian W., Yin F., Liub H., Li J., Li Q., Huangb T., Chetwyndc D. G., „Kinematic Calibration of a 3-DOF Spindle Head using a Double Ball Bar”, *Mechanism and Machine Theory*, 2016, vol. 102: 167 - 178;
- [107] Tondu B., „Closed-Form Redundancy Solving of Serial Chain Robots with a Weak Generalized Inverse Approach”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, vol. 74: 360 - 370;
- [108] Toshani H., Farrokhi M., „Real-Time Inverse Kinematics of Redundant Manipulators using Neural Networks and Quadratic Programming: A Lyapunov-Based Approach”, *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, vol. 62: 766–781;
- [109] Trevisani A., „Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Translational, Planar, and Underconstrained Cable-Driven Robots ”, *J Syst Sci Complex*, 2013, vol. 26: 695 – 717;
- [110] Tsukagoshi H., Kitagawa A., Segawa M., „Active Hose: an Artificial Elephant’s Nose with Maneuverability for Rescue Operation”, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2001, 2454 - 2459;
- [111] Walker I. D., „Continuous Backbone "Continuum" Robot Manipulators”, *ISRN Robotics*, 2013,
- [112] Wang H., Shen S., Lu X., „A Screw Axis Identification Method for Serial Robot Calibration based on the Poe Model”, *Industrial Robot: An International Journal*, 2012, vol. 369/2: 146 - 153;

- [113] Wang W., Wang G., Yun C., „A Calibration Method of Kinematic Parameters for Serial Industrial Robots”, *Industrial Robot: An International Journal*, 2014, vol. 41/2: 157 -165;
- [114] Webster III R. J., Jones B. A., „Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review”, *The International Journal of Robotics Research*, 2010, vol. 00 (000);
- [115] Wu Y., Klimchik A., Caro S., Furet B., Pashkevich A., „Geometric Calibration of Industrial Robots using Enhanced Partial Pose Measurements and Design of Experiments”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 35: 151 - 168;
- [116] Xiong Y., Li Y., „Modified Internal Model Control Scheme for the Drive Part with Elastic Joints in Robotic System”, *J Intell Robot Syst*, 2015, vol. 79: 475 – 485;
- [117] Xu K., Simaan N., „Actuation Compensation for Flexible Surgical Snake-Like Robots with Redundant Remote Actuation”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, 4148 - 4154;
- [118] Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F., „Singularity Avoidance of a Six Degree of Freedom Three Dimensional Redundant Planar Manipulator”, *Computers and Mathematics with Applications*, 2012, vol. 64: 856–868;
- [119] Yang G., Mustafa S. K., Yeo S. H., Lin W., Lim W. B., „Kinematic Design of an Anthropomorphic 7-DOF Cable-Driven Robotic Arm”, *Front. Mech. Eng.*, 2011, vol. 6: 45 - 60;
- [120] Scott F.Miller Yang Lei, „Pose Estimation and Machining Efficiency of an Endoscopic Grinding Tool”, *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, vol. 69: 2019–2029;
- [121] Yeo S. H., G. Yang, Lim W. B., „Design and Analysis of Cable-Driven Manipulators with Variable Stiffness ”, *Mechanism and Machine Theory*, 2013, vol. 69: 230 – 244;
- [122] Yoon H.-S., Choi Y., Yi B.-J., „A 4-DOF Bendable Endoscope Mechanism For Single Port Access Surgery”, *IEEE ICRA - Full Day Workshop on Snakes, Worms and Catheters: Continuum and Serpentine Robots for Minimally Invasive Surgery*, 2010 54 - 56;
- [123] Zargarbashi S. H. H., Khan W., Angeles J., „The Jacobian Condition Number as a Dexterity Index in 6R Machining Robots”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, vol. 28: 694 - 699;
- [124] Zheng L., Ruxu D., „Design and Analysis of a Bio-Inspired Wire-Driven Multi-Section Flexible Robot”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10: 209-219;
- [125] Zhenhua W., Hui X., Guodong C., Rongchuan S., Sun L., „A Distance Error Based Industrial Robot Kinematic Calibration Method”, *Industrial Robot: An International Journal*, 2014, vol. 41/5: 439 - 446;
- [126] Informații la <http://laughingsquid.com/survival-research-labs-show-at-the-extreme-futurist-festival-2012/>, Autor: Beale S., Robotul Spine, accesat 18.09.2014;
- [127] Informații la http://www.robotics-society.ro/noutati_evidenta.html, Societatea de Robotică din România, accesat 14.08.2014;
- [128] Informații la <http://www.scribd.com/doc/27506518/Mecanisme-Slide-Cap-10>, Mecanisme, accesat 10.08.2014;
- [129] Informații la <http://www.ocrobotics.com/>, Catalog OC Robotics: Nuclear remote handling, accesat 14.08.2014.