



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI
Școala Doctorală de Ingineria Sistemelor Biotehnice

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT:

Prof. dr. ing. habil. Andrei CRAIFALEANU

DOCTORAND:

Ing. Ștefan DUMITRU

2024



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI
Școala Doctorală de Ingineria Sistemelor Biotehnice

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT
ANALIZA MECANICĂ A UNUI SISTEM
ROBOTIC MÂNĂ-BRAȚ

CONDUCĂTOR DE DOCTORAT:

Prof. dr. ing. habil. Andrei CRAIFALEANU

DOCTORAND:

Ing. Ștefan DUMITRU

2024

Cuprins

1. INTRODUCERE	4
1.1. IMPORTANȚA TEMEI ȘI MOTIVAȚIA DIN SPATELE STUDIULUI ACESTEIA	4
1.2. GENERALITĂȚI	4
1.3. METODE DE STUDIU.....	5
1.4. STRUCTURA LUCRĂRII	5
2. STADIUL ACTUAL	6
2.1. SCURT ISTORIC AL ROBOTICII	6
2.2. STADIUL ACTUAL ÎN BRAȚE ROBOTICE	6
2.3. STADIUL ACTUAL ÎN MĂINI ROBOTICE	7
3. PREZENTAREA SISTEMULUI STUDIAT	7
3.1. MÂNA ROBOTICĂ UHAND	8
3.2. ÎMBUNĂTĂȚIRI ADUSE MĂINII UHAND	9
3.3. BRAȚUL ROBOTIC	11
4. STUDIUL CONFIGURAȚIEI SISTEMULUI	13
4.1. MODELAREA MECANICĂ A SISTEMULUI ROBOTIC MÂNĂ-BRAȚ	13
4.2. LEGI DE MIȘCARE.....	15
4.3. ROTAȚII. MATRICE DE TRANSFORMARE	16
4.4. DETERMINAREA COORDONATELOR ȘI UNGHURILOR.....	16
4.5. APLICAȚII NUMERICE	17
4.6. CONCLUZII.....	22
5. STUDIUL CINEMATIC	23
5.1. VITEZE ȘI VITEZE UNGHUARE	23
5.2. ACCELERAȚII ȘI ACCELERAȚII UNGHUARE	23
5.3. APLICAȚII NUMERICE	24
5.4. CONCLUZII.....	35
6. DINAMICA INVERSĂ	36
6.1. STUDIUL CU METODELE MECANICII CLASICE.....	36
6.2. STUDIUL CU METODELE MECANICII ANALITICE.....	43
6.3. APLICAȚII NUMERICE	45
6.4. CONCLUZII.....	51
7. DINAMICA DIRECTĂ	52
7.1. ASPECTE TEORETICE	52
7.2. EXPLICITAREA SISTEMULUI	53
7.3. INTEGRAREA SISTEMULUI EXPLICITAT	54
7.4. APLICAȚII NUMERICE	55
7.5. CONCLUZII.....	58
8. VIBRAȚII	59
8.1. STUDIUL NUMERIC.....	59
8.2. STUDIUL EXPERIMENTAL	61
8.3. CONCLUZII.....	63
9. CONSIDERAȚII FINALE	64
9.1. CONCLUZII FINALE	64
9.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE	65
9.3. DIREȚII DE DEZVOLTARE	66
BIBLIOGRAFIE	67

1. Introducere

1.1. Importanța temei și motivația din spatele studiului acesteia

Studiul sistemelor robotice este în continuare un domeniu de interes, în care se studiază noi metode de simulare [52], [72] și control [37] al acestora. Diverși cercetători studiază, în general, sisteme robotice simple, fără aplicații pentru omul de rând în viața sa de zi cu zi [22], [61]. Un prim obstacol pe care un utilizator casnic, sau o persoană în vârstă l-ar putea întâmpina în utilizarea unui sistem robotic, ar fi adversitatea sa față de un braț robotic clasic, cu un sistem de prehensiune simplu. Din acest motiv robotul studiat în această lucrare de doctorat încearcă să imite pe cât posibil un braț uman, atât prin mișcarea care se urmărește a fi efectuată de acesta, cât și prin dimensiunile sistemului.

Cu precădere, metoda de prehensiune este foarte important, deoarece aceasta poate atrage sau îndepărta potențialii utilizatori casnici. Mâna umană este un mecanism biologic complex [26], [29], [55], dificil de replicat cu costuri scăzute, motiv pentru care, în general, prehensoare clasice au un număr mic de grade de libertate și nu au posibilitatea manipulării unui obiect deja apucat [34], [69], [73]. Există studii efectuate și asupra unor prehensoare antropomorfe cu un număr mare de grade de libertate [2], [46], dar acestea sunt dificil de pus în funcțiune de un utilizator neexperimentat.

În literatura de specialitate se studiază adeseori fie doar brațul robotic [17], fie doar prehensorul [25], fără a fi luată în considerare influența pe care îl au unul asupra celuilalt.

Prețurile brațelor robotice antropomorfe sunt, în general, ridicate [79], [80], [81]. În lucrarea de față se urmărește realizarea unui model care se poate realiza practic cu un cost redus, construit din prefabricate și piese ce pot fi printate cu ajutorul unei imprimante 3D. Urmărind această strategie de design, se pot aduce ulterior modificări brațului robotic conceput și prezentat în lucrarea de față.

Această lucrare de doctorat își propune să efectueze un studiu cinematic și dinamic complet al unui sistem antropomorfic mână-braț original, destinat uzului casnic.

1.2. Generalități

Studiul sistemelor robotice formate din braț și sistem de prehensiune reprezintă un domeniu de studiu important, care, deși abordat de numeroși cercetători, prezintă în continuare interes și ofertă o largă paletă de direcții de cercetare.

În cadrul acestei teze de doctorat s-a studiat un braț robotic antropomorfic cu 7 grade de libertate corespunzătoare celor trei articulații ale brațului uman (umăr - 3 grade de libertate, cot - 1 grad de libertate, încheietura mâinii - 2 grade de libertate), cărora li se adăugă un grad de libertate suplimentar provenit din mișcarea antebrațului în jurul axei sale longitudinale.

În capătul acestui braț robotic a fost amplasat un prehensor antropomorfic (o mână robotică) cu 5 degete și 6 mobilități. Motivul principal pentru utilizarea unui astfel de mecanism complicat este acela de a putea realiza un robot ce poate fi utilizat pentru uz casnic, caz în care forma și apropierea vizuală a mâinii robotului de o mână umană reprezintă un avantaj în vederea utilizării acestuia de către persoane diferite.

1.3. Metode de studiu

În dinamica roboților se studiază două probleme [18] [45]. Prima este cea a dinamicii directe, în care se consideră cunoscute legile de variație ale forțelor și momentelor și se determină mișcarea pe care trebuie să o efectueze robotul. Cea de-a doua problemă este a dinamicii inverse, în care se consideră cunoscută mișcarea pe care trebuie să o efectueze robotul și se determină forțele și momentele necesare pentru efectuarea acesteia.

Buondonno și De Luca [5] au utilizat un algoritm de tip Newton-Euler pentru a rezolva problema dinamică inversă a unui robot cu articulații elastice. Sutanto et al. [60] au folosit un algoritm recursiv Newton-Euler pentru controlul unui braț robotic cu 7 grade de libertate. Gonçalves et al. [20] au utilizat un algoritm Newton-Euler pentru a modela dinamic un robot format din 24 de corpuri, cu 19 grade de libertate, acționate de 4 motoare liniare și 15 servomotoare de revoluție. Zhang et al. [74] au studiat un braț robotic din punct de vedere dinamic, cu ajutorul algoritmului Newton-Euler, pentru a determina momentele din articulațiile brațului robotic XB7.

Wang et al. [71] au analizat comportamentul dinamic al articulațiilor unui robot industrial, folosind teoria din dinamica sistemelor multicorp.

1.4. Structura lucrării

Lucrarea de față conține nouă capitole.

În primul capitol, *Introducere*, se precizează câteva generalități cu privire la importanța temei, se justifică alegerea acestei teme și se enunță scopul și obiectivele lucrării.

Capitolul al doilea, *Stadiul actual*, prezintă o scurtă istorie a tematicii, efectuează o analiză a literaturii de specialitate în domeniul brațelor, precum și mâinilor robotice și încadrează tema abordată în direcțiile de studiu actuale.

În cel de-al treilea capitol, *Prezentarea sistemului studiat*, se evidențiază modificările aduse prehensorului antropomorfic care stă la baza studiului și conceperea brațului robotic studiat în cadrul tezei de doctorat.

Al patrulea capitol, *Studiul configurației sistemului*, prezintă modul de determinare a pozițiilor punctelor semnificative ale sistemului robotic mână-braț (articulații și centre de masă), considerând valori cunoscute ale parametrilor articulațiilor active. Sunt, de asemenea, definite legile de variație ale acestor parametri, considerate ulterior în aplicațiile numerice.

În cel de-al cincilea capitol, intitulat *Studiul cinematic*, sunt prezentate metodele de calcul al vitezelor și accelerațiilor unghiulare ale elementelor sistemului robotic mână-braț, precum și al vitezelor și accelerațiilor punctelor semnificative.

Capitolul al șaselea, *Dinamica inversă*, este dedicat determinării forțelor și momentelor din articulații, atunci când se cunosc mișcarea robotului, precum și forțele exterioare. Formulele și ecuațiile folosite sunt deduse prin metodele mecanicii clasice (pornind de la teorema impulsului și de la cea a momentului cinetic). În mod alternativ, forțele și momentele motoare sunt determinate și prin metodele mecanicii analitice (pe baza principiului lui D’Alambert și a principiul puterilor virtuale).

În cel de-al șaptelea capitol, se studiază *Dinamica directă*, unde, cunoscându-se forțele și momentele motoare ale fiecărui actuator, se determină mișcarea elementelor sistemului mână-braț.

Al optulea capitol, intitulat *Vibrații*, are ca obiect determinarea pulsațiilor proprii ale degetelor mâinii robotice, precum și a întregii mâini.

Capitolul final, prezintă concluziile acestei teze de doctorat, contribuțiile originale aduse de către autor și viitoarele posibile direcții de dezvoltare a temei abordate.

2. Stadiul actual

2.1. Scurt istoric al roboticii

Roboții pot fi definiți ca mașini care pot funcționa fie automat, fie comandate de la distanță [8] și care pot să efectueze sarcini de manipulare și mișcare [75], fiind acționabil după două sau mai multe axe [76].

Popularitatea manipulatorilor robotici a crescut constant începând cu lansarea lor, iar capacitatea acestora de a lucra în condiții periculoase sau toxice [11], precum și predispoziția de a efectua operațiuni ciclice au dus la utilizarea acestora din ce în ce mai frecvent în aplicații industriale.

2.2. Stadiul actual în brațe robotice

Majoritatea brațelor robotice existente în prezent utilizează două tipuri de cuple cinematice cu câte un grad de libertate [58]:

- de rotație (de revoluție) (fig. 2.1 a);
- de translație (prismatice) (fig. 2.1 b).



Fig. 2.1. Tipuri de cuple cinematice utilizate pentru manipulatorii

Ambele tipuri de cuple au câte un singur grad de libertate. Cupla de revoluție permite doar o rotație cu un unghi θ în jurul axei articulației (fig. 2.1 a). Cupla prismatică permite doar mișcarea rectilinie cu o deplasare x , de-a lungul axei sale (fig. 2.1 b).

În afară de cuplele prismatice și de revoluție, în practică se folosesc, de asemenea, și următoarele tipuri de articulații [58]:

- cuple elicoidale;
- cuple cilindrice;
- cuple universale;
- cuple sferice.

Mișcările permise de cuplele de revoluție și de cele prismatice sunt plane, în timp ce mișcările permise de cuplele elicoidale, cilindrice, universale sau sferice sunt tridimensionale.

O clasificare a manipulatorilor industriali poate fi făcută după prezența lanțurilor cinematice închise sau deschise. Astfel, există două mari categorii de roboți industriali:

- manipulatori seriali; din această categorie fac parte roboții ce prezintă un lanț deschis de cuple cinematice, coordonatele articulațiilor fiind independente;
- manipulatori paraleli; din această categorie fac parte roboții ce prezintă un lanț închis de cuple cinematice, coordonatele articulațiilor fiind legate prin relații de dependență [64].

2.3. Stadiul actual în mâini robotice

Prehensorul, sau mâna robotică, este efectorul final al oricărui braț robotic, cu funcția de a apuca obiectul și al manipula, motiv pentru care multe centre de cercetare sunt interesate și investighează întregul proces [42].

Majoritatea prehensoarelor utilizate în industrie în momentul de față sunt mecanisme simple, menite să efectueze operații repetitive simple de apucare și eliberare a obiectelor [8]. Acestea însă nu permit manipularea obiectelor deja apucate, lucru esențial pentru un robot cu domeniu larg de

Prehensoarele antropomorfe sau mâinile mecanice antropomorfe au devenit un subiect din ce în ce mai interesant pentru mulți cercetători, datorită versatilității pe care acestea le au, spre deosebire de prehensoarele de tip clește sau clemă, utilizate actualmente [43] [63].

Mâna umană este un mecanism biologic complex, format din 27 de oase (14 falange, 5 metacarpiene și 8 carpiene) și poate fi modelată ca un sistem de corpuri rigide, articulații simple și articulații duble, având 25 de grade de libertate [1], [53] (fig. 2.10).

În literatura de specialitate pot fi găsite multe exemple de mâini robotice antropomorfe cu un număr mare de grade de libertate, cum ar fi mâna Gifu II [28] sau mâna OCU I [38], care au 16, respectiv 19 grade de libertate.

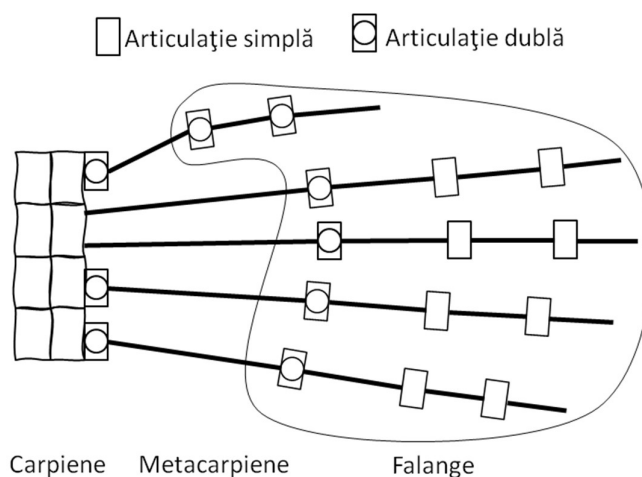


Fig. 2.10. Mâna umană în modelul propus de Abdel-Malek

Astfel de mecanisme sunt complexe și dificil de utilizat în mod eficient, din cauza numărului mare de actuatori necesari pentru controlul lor. Pentru reducerea greutateii și complexității unui astfel de mâini robotice, se poate utiliza un sistem cu un număr redus de actuatori, în care unele elemente sunt conectate prin legături suplimentare. În literatura de specialitate [12] există numeroase astfel de mâini robotice, cu un număr redus de grade de libertate, concepute pentru limitarea dimensiunilor sistemelor, precum mâna HRI [47] sau mâna Alaris [44], amândouă cu câte 6 grade de libertate.

3. Prezentarea sistemului studiat

În vederea realizării unui sistem robotic mână-braț cu domeniu larg de utilizare, în lucrarea de față s-a ales un prehensur de tip antropomorfic, realizat prin îmbunătățirea mâinii robotice uHand [78], [83], (Fig. 3.1).

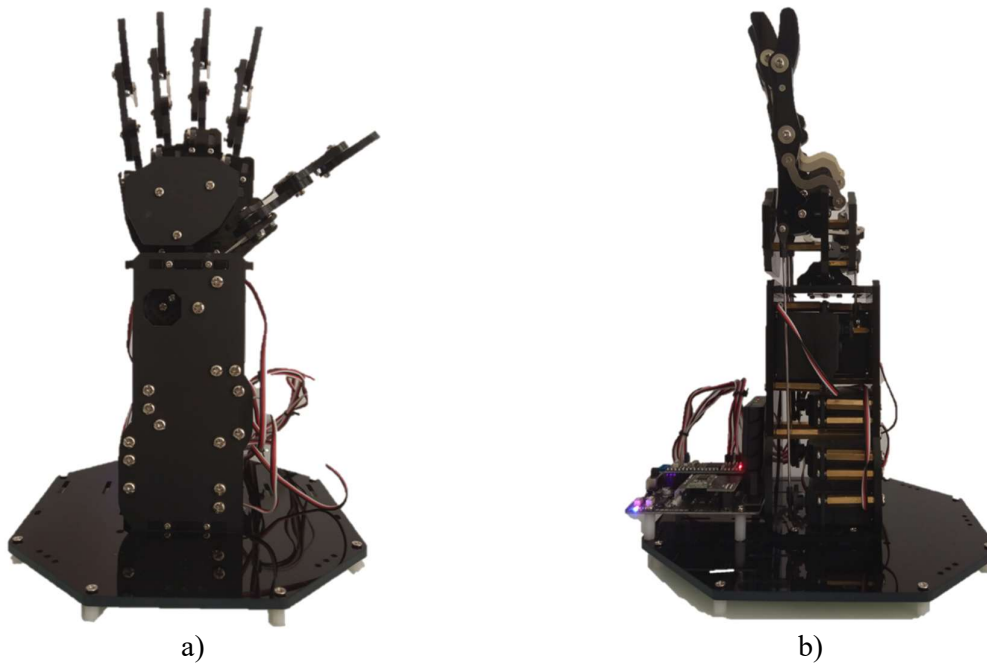


Fig. 3.1. Mâna robotică uHand

3.1. Mâna robotică uHand

Mâna robotică antropomorfică uHand a fost realizată de către firma Lobot. Prehensorul a fost studiat în referințele [23], [24], însă ambele lucrări s-au rezumat la determinarea pozițiilor punctelor semnificative ale sistemului.

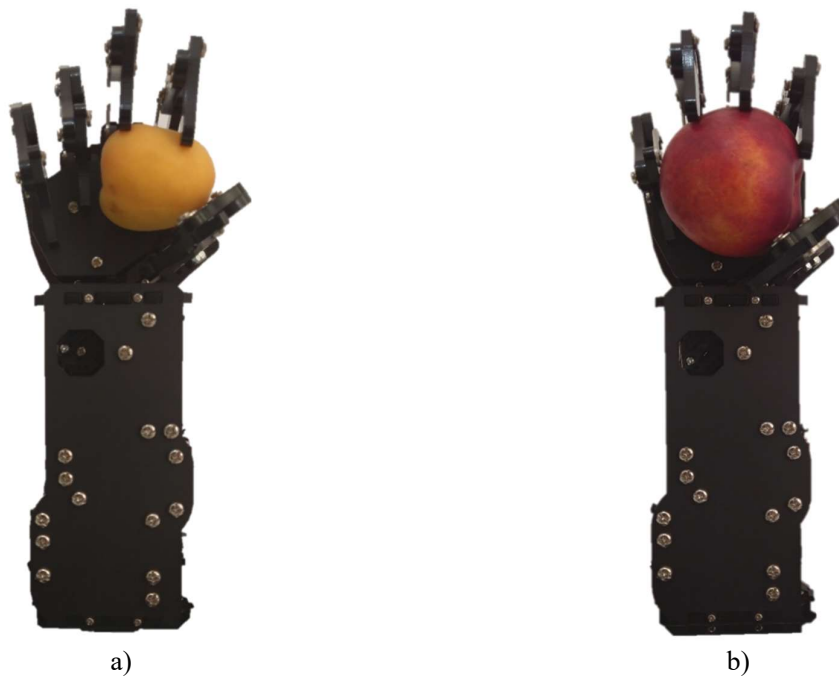


Fig. 3.5. Apucarea a două obiecte sferice

Un avantaj oferit de un prehensur antropomorfic este posibilitatea de a distribui forța normală aplicată obiectelor pe o suprafață mai mare, micșorând astfel presiunea aplicată asupra acestora.

În figura 3.5 se poate observa apucarea a două obiecte sferice de dimensiuni diferite utilizând mâna robotică antropomorfică prezentată.

Așa cum se poate observa, deoarece cele două obiecte au dimensiuni diferite, metoda de apucare aplicată asupra acestora este de asemenea diferită. Pentru a apuca obiectul din figura 3.5 a) sunt necesare doar trei degete, degetul I fiind baza de susținere, iar celelalte două având rolul de echilibrare al acestuia. Pentru obiectul din figura 3.5 b), degetul I are rol de echilibrare, pe când celelalte trei degete și palma ce acționează asupra obiectului preiau gradele de libertate ale acestuia.

Cu toate că mâna robotică antropomorfică poate apuca cu ușurință obiecte de dimensiuni și forme diferite, așa cum se poate observa în urma analizării figurii 3.5, o problemă a acestui prehensur antropomorfic este imposibilitatea de a manipula obiectul odată ce acesta a fost apucat.

Considerând aceste aspecte, au fost aduse un număr de modificări mâinii uHand, pentru a îmbunătăți posibilității sa de apucare și pentru a reduce masa sistemului.

3.2. Îmbunătățiri aduse mâinii uHand

O primă îmbunătățire ce poate fi adusă mâinii uHand constă în implementarea unui grad de libertate suplimentar degetului mare, de rotație în jurul unei axe perpendiculare pe palma mâinii. În acest fel, funcționalitatea acestui deget mecanic se apropie de cea degetului mare uman.

Însă, servomotoarele ocupă cea mai mare parte a interiorului carcasei, ceea ce limitează sau chiar împiedică posibilitatea de a amplasa componentele mecanismului de control al gradului de libertate suplimentar. În acest scop, se pot înlocui servomotoarelor cu actuatori liniari, care sunt caracterizați de volume și mase mai mici.

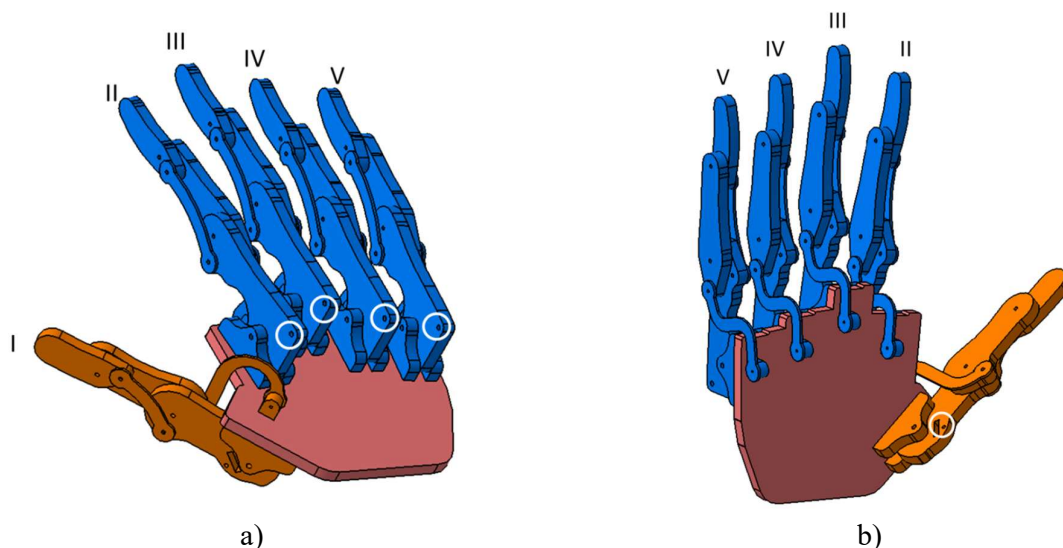


Fig. 3.8. Modelul 3D al prehensurului antropomorf

Carcasa actuatorului liniar este realizată din material plastic, pe când sistemul de acționare (tija actuatorului) este realizat din duraluminiu. Alungirea maximă a actuatorului ales este de 21 mm, iar viteza nominală a acestuia este de 15 mm/s, la tensiunea nominală de 12 V. Modificarea vitezei motorului se poate efectua prin modificarea corespunzătoare a tensiunii de alimentare a

acestui. Odată atinsă limita superioară de alungire sau cea inferioară de contractare, motorul deconectează automat alimentarea. Inversând polaritatea curentului se poate schimba direcția de acționare. Forța nominală pe care o produce actuatorul liniar este de 64 N. Geometria 3D a mâinii antropomorfe uHand este prezentată în figura 3.8. Luând ca referință degetul III, degetul II este rotit cu 5° , iar degetul I cu 45° față de o axă perpendiculară pe placa de fixare a degetelor. În raport cu aceeași axă, dar în direcție opusă, sunt rotite degetele IV și V cu 3° respectiv 6° . Axele de prindere a tijelor care transmit mișcarea de la culisele actuatorilor la degete sunt marcate pe figura citată cu cercuri de culoare albă.

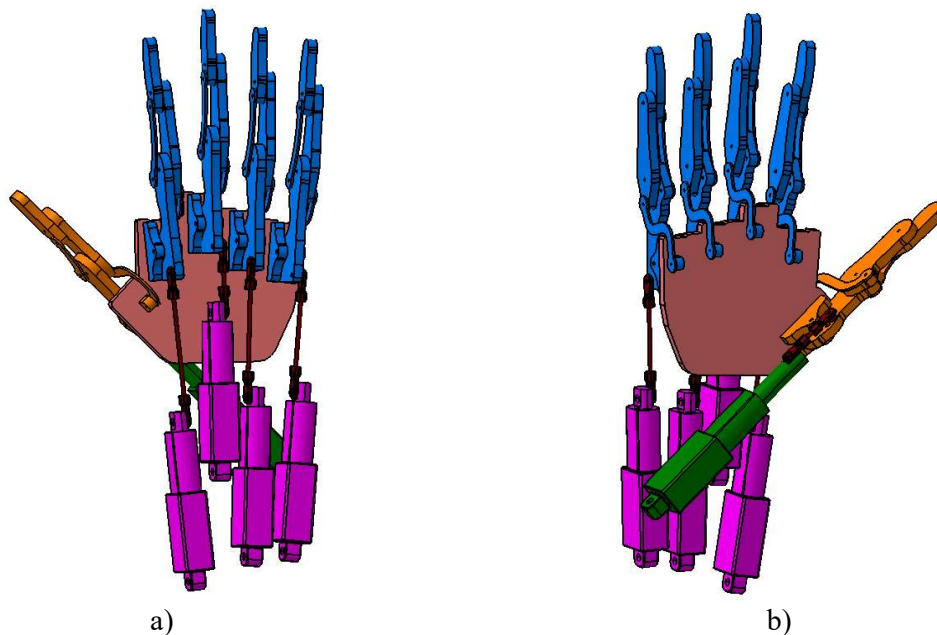


Fig. 3.9. Poziția actuatorilor liniari

Amplasarea fiecărui actuator a fost aleasă astfel încât mișcările culisei, tijei și falangelor să se desfășoare în plane paralele (fig. 3.9).

Pentru a flexa degetele II-V actuatorii liniare corespunzătoare trebuie să fie extinse, în timp ce, datorită geometriei sistemului, actuatorul corespunzător degetului I trebuie să aibă o mișcare opusă, de restrângere.

Degetul mare, împreună cu mecanismul său de flexare (actuator liniar și tijă de transmitere a mișcării) este amplasat pe o placă (fig. 3.11), ce poate fi rotită de către mecanismul de control al gradului de libertate suplimentar.

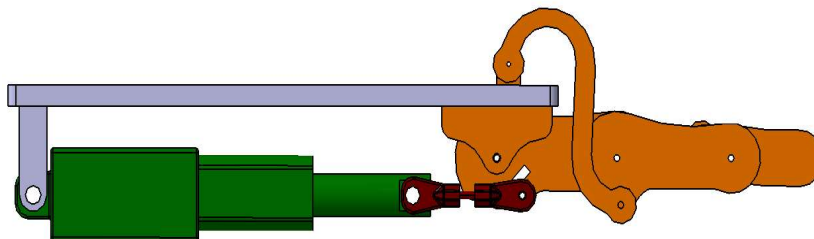


Fig. 3.11. Ansamblul degetului I

Mecanismul de control al gradului de libertate suplimentar este acționat de un servomotor de tipul LFD-06, preluat dintre cele care au fost înlocuite cu actuatorii liniari (fig. 3.12).

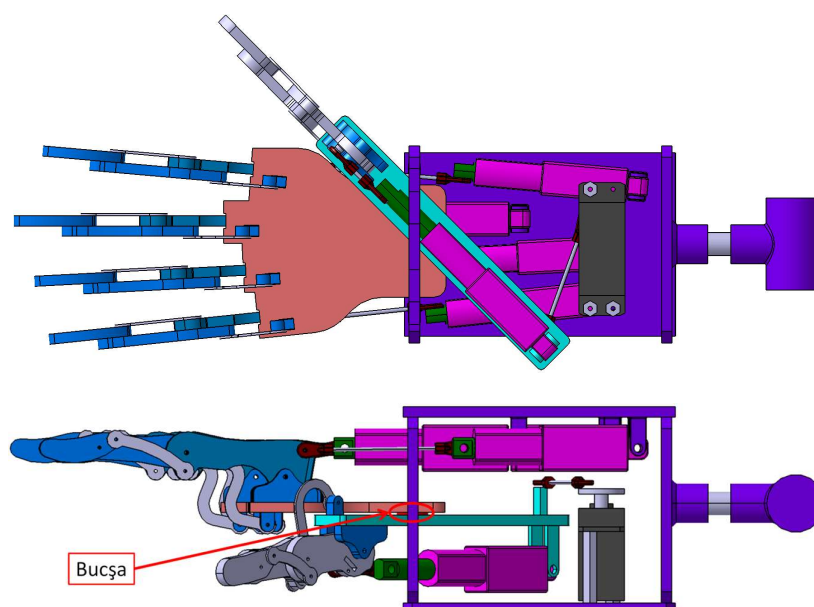


Fig. 3.12. Ansamblu mână antropomorfă cu 6 mobilități

3.3. Brațul robotic

Prehensorul antropomorfic modificat, prezentat în paragrafele anterioare, a fost atașat unui braț robotic antropomorfic. Acesta a fost conceput de autor, astfel încât să fie realizat din materiale prefabricate și cu articulații printabile 3D. De asemenea, s-a urmărit ca eventualele modificări aduse proiectului să poată fi făcute cu ușurință, tot cu ajutorul unei imprimante 3D.

Un astfel de braț robotic, asemănător cu cel uman, a fost ales cu scopul de a se realiza un dispozitiv cu aspect familiar pentru utilizatorul casnic, lipsit de experiență în utilizarea roboților.

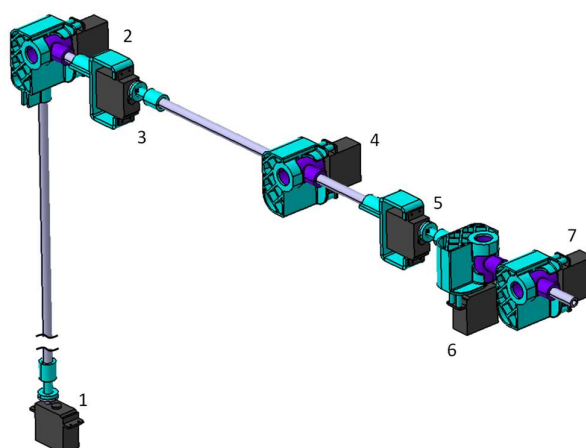


Fig. 3.13. Modelul 3D al brațului robotic

În modelul de braț robotic proiectat (fig. 3.13), servomotoarele 1-3 de tipul LFD-06 joacă rolul articulației sferice prezente în umărul uman. Servomotoarele 4 și 5, permit o mișcare a sistemului asemănătoare cu cea a antebrăului uman. Astfel, rotația permisă de articulația cotului,

este realizată cu ajutorul servomotorului 4, iar mișcarea în jurul axei longitudinale a antebrăului, produsă cu ajutorul oaselor ulna și radius, este realizată de servomotorul 5. Servomotoarele 6 și 7 permit o mișcare precum cea realizată de articulația dublă a încheieturii mâinii, pe două direcții transversale.

Articulații conectează bare de duraluminu cu diametrul de 10 mm, care îndeplinesc rolul oaselor din cazul brațului uman.

S-au utilizate trei tipuri de articulații, ale căror modele 3D sunt reprezentate în figura 3.14.

Articulațiile 1, 3 și 5 (fig. 3.13 a) permit rotații în jurul axelor barelor pe care le conectează. Articulațiile 2, 4, 6 și 7 (fig. 3.13 b, c) permit mișcări de rotație în jurul unor axe perpendiculare pe direcțiile barelor, cu precizarea că articulația 2 conectează bare inițial perpendiculare, iar articulațiile 4, 6 și 7 conectează bare inițial paralele. Geometria diferită a articulației 2 față de cea articulațiilor 4, 6 și 7 este necesară din cauza limitării posibilităților de rotație ale acestor dispozitive, precum și ale servomotoarelor.

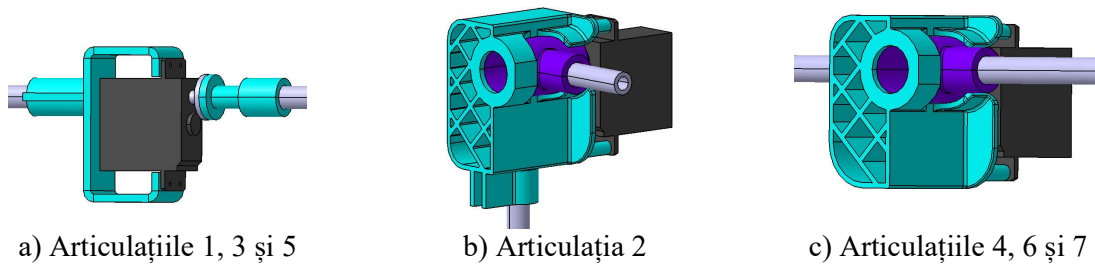


Fig. 3.14. Modele 3D ale articulațiilor (detalii)

În capătul brațului, se atașează mâna robotică cu 6 grade de mobilitate prezentată în paragraful precedent, obținându-se astfel un sistem robotic mână-braț (fig. 3.15). Acest sistem este studiat din punct de vedere geometric, cinematic și dinamic în capitolele următoare.

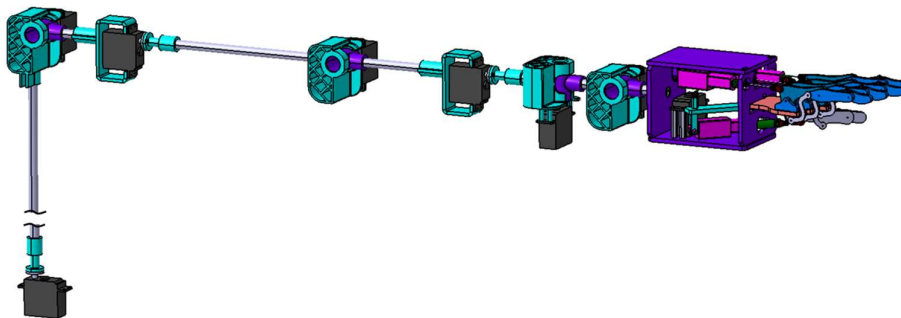


Fig. 3.15. Modelul 3D al sistemului mână-braț

4. Studiul configurației sistemului

În modelarea sistemului s-au utilizat următoarele tipuri de legături între corpuri:

- articulații libere, cilindrice – ce permit rotații în jurul axei de simetrie;
- articulații libere, universale – ce permit rotații în jurul axei de simetrie, precum și în jurul unei axe perpendiculare pe aceasta, blocând rotația în jurul celeilalte axe perpendiculare, în general pe direcția longitudinală a corpului următor;
- articulații libere, sferice – ce permit rotații în jurul tuturor celor trei axe;
- articulații comandate, cilindrice – ce imprimă rotații în jurul axei de simetrie;
- cuple comandate, prismatice – ce imprimă translații în lungul axei longitudinale.

Alegerea tipurilor legăturilor a fost făcută astfel încât să se evite atât subconstrângerea, cât și supraconstrângerea sistemului mecanic, prin urmare astfel încât sistemul de ecuații dinamice ce calculează forțele și momentele din legături să fie compatibil și determinat.

4.1. Modelarea mecanică a sistemului robotic mână-braț

Brațul uman, are trei articulații, toate comandate:

- o articulație sferică (articulația umărului),
- o articulație dublă (articulația cotului și o articulație care corespunde mișcării oaselor ulna și radius de rotație a antebrăului în jurul axei sale longitudinale),
- o articulație dublă (articulația încheieturii mâinii).

Articulațiile comandate, sferice și duble, sunt dificil de realizat practic prin printare 3D și de pus în funcțiune cu precizie, motiv pentru care s-a decis înlocuirea acestora cu sisteme de articulații cilindrice, acționate independent de servomotoare de rotație (fig. 3.13). Rezultă astfel articulațiile cilindrice comandate din $O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6$ și O_7 (fig. 4.1).

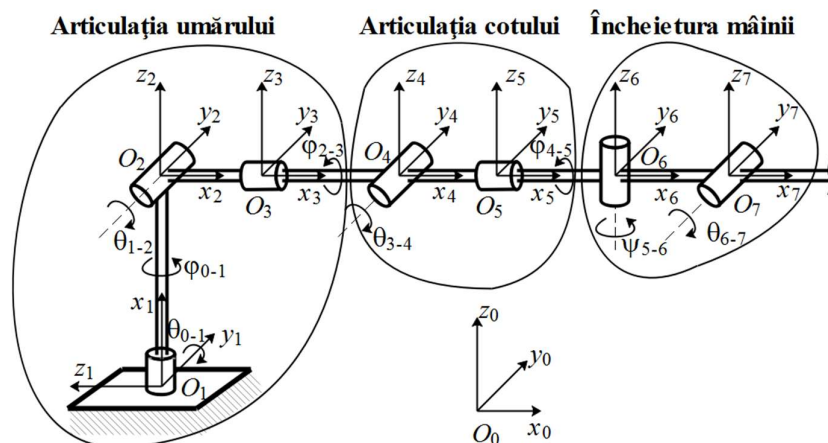


Fig. 4.1. Modelul mecanic al brațului robotic studiat

Modelul mecanic astfel rezultat (fig. 4.1) are 7 grade de libertate de rotație, definite de unghiurile $\varphi_{0-1}, \theta_{1-2}, \varphi_{2-3}, \theta_{3-4}, \varphi_{4-5}, \psi_{5-6}$ și θ_{6-7} , în jurul axelor $x_1, y_2, x_3, y_4, x_5, z_6$, respectiv y_7 .

Sistemul de referință atașat elementului i a fost ales cu originea în articulația O_i și cu axa Ox orientată către următoarea articulație din lanțul cinematic. Sistemul de coordonate $O_1x_1y_1z_1$ al primului element al modelului mecanic a fost rotit față de sistemul global de referință $O_0x_0y_0z_0$, în jurul axei y_0 cu unghiul $\theta_{0-1} = -90^\circ$.

Sistemul de prehensiune antropomorf prezentat în paragraful 3.2 se atașează brațului robotic în articulația O_7 .

Sistemul de control al gradului de libertate suplimentar al degetului mare (fig. 4.2 a – model 3D, fig. 4.2 b – model mecanic) are trei puncte fixe în raport cu sistemul de referință 7 (O_7 , O_8 și O_{10}) și două puncte mobile (O_9 și F). Gradul de libertate adăugat degetului mare este de rotație în jurul unei axe perpendiculare pe placa pe care sunt fixate degetele 2-5.

Legăturile sistemului de control al gradului de libertate suplimentar sunt modelate astfel:

- în O_8 – articulație comandată, cilindrică;
- în O_9 – articulație liberă, universală;
- în F – articulație liberă, sferică;
- în O_{10} – articulație liberă, cilindrică.

Pentru toate cele cinci degete, sistemul de referință 10 este rotit cu un unghi ψ_{7-10} față de sistemul de referință 7. Pentru degetul mare, acest unghi este variabil și este controlat cu ajutorul mecanismului patrulater, $O_8O_9FO_{10}$, care permite rotirea corpului FO_{10} , în raport cu axa z_{10} . Pentru degetele 2-5, acest unghi este constant, iar mecanismul $O_8O_9FO_{10}$ lipsește. Astfel, în cazul acestor degete sistemele 8, 9 și 10 coincid.

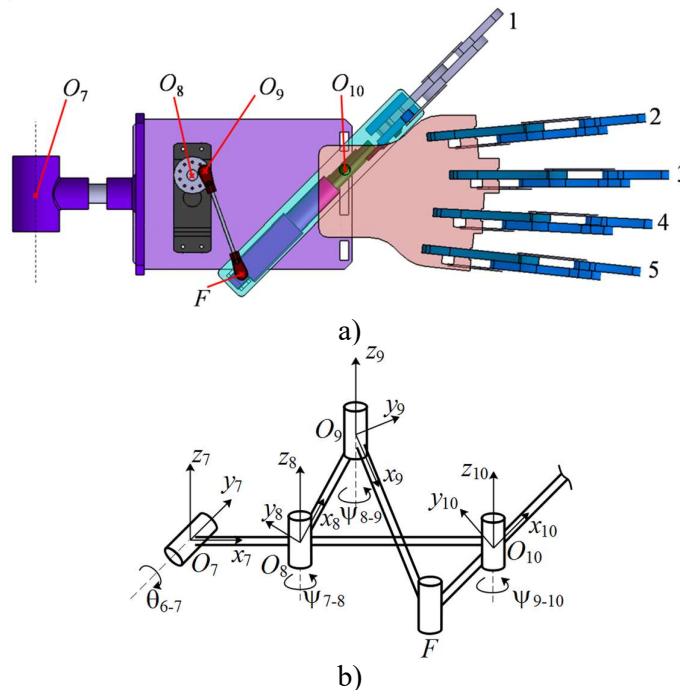


Fig. 4.2. Sistemul care controlează gradul de libertate suplimentar degetului mare

Geometria degetelor 2-5 (fig. 4.3 a) este asemănătoare cu cea a degetului 1 (fig. 4.3 b). Toate cele cinci degete pot fi modelate mecanic prin sistemul cu o singură mobilitate reprezentat în figura 4.3 c. Acest sistem este compus dintr-un mecanism bielă manivelă cu excentricitate ($O_{11}O_{12}AO_{13}$) și două mecanisme de tip patrulater inversat ($O_{13}O_{14}BO_{15}$ și $O_{14}O_{16}DO_{17}$). Falanga distală continuă până la punctul de contact cu obiectul ce trebuie apucat, E .

Legăturile dintre corpurile ce compun degetele sunt modelate astfel [14]:

- în O_{11} – cuplă comandată, prismatică;
- în O_{12} , O_{15} și O_{17} – articulații libere, universale;
- în A , B și D – articulații libere, sferice;
- în O_{13} , O_{14} și O_{16} – articulații libere, cilindrice.

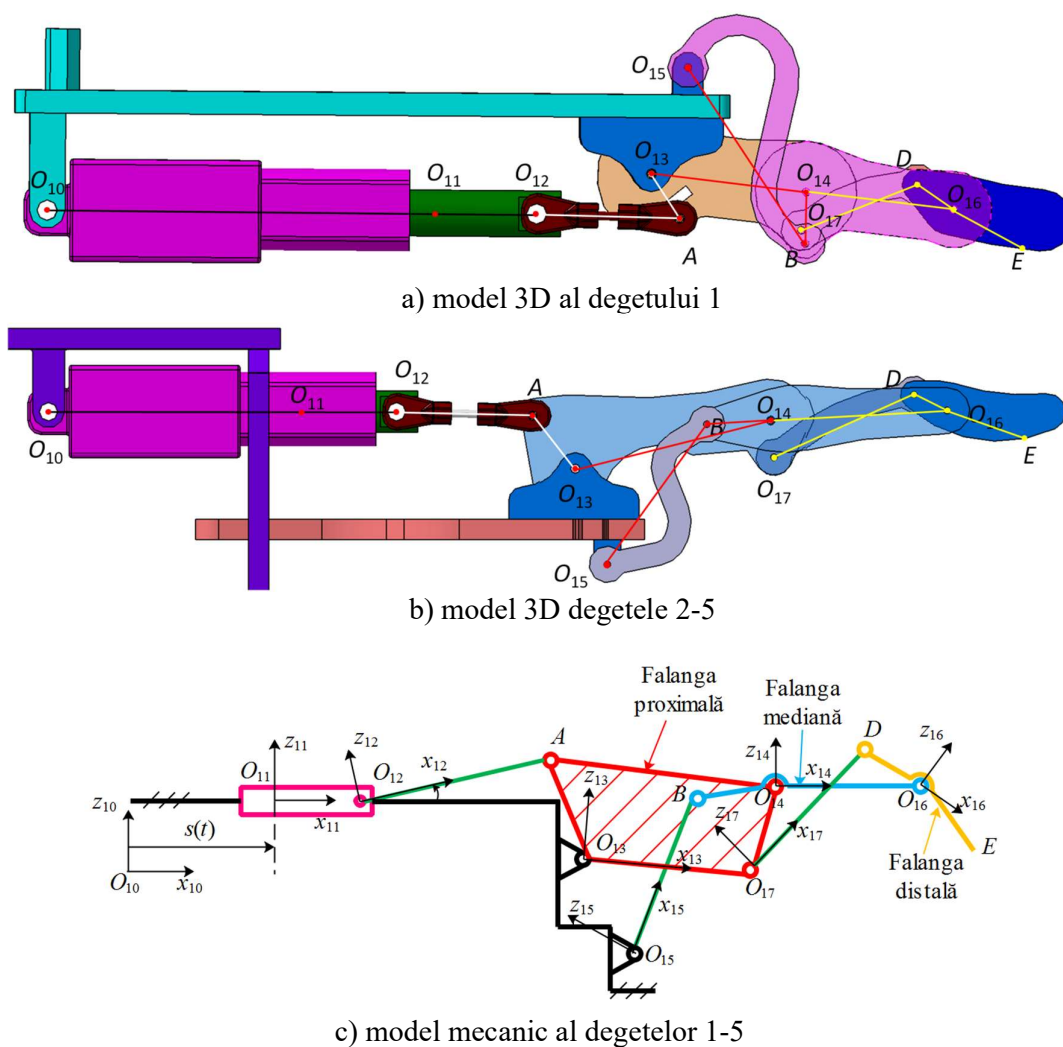


Fig. 4.3. Modelele degetelor

4.2. Legi de mișcare

Cele opt servomotoare de rotație și cele cinci actuatore liniare formează un sistem cu 13 parametri de comandă (φ_{0-1} , θ_{1-2} , φ_{2-3} , θ_{3-4} , φ_{4-5} , ψ_{5-6} , θ_{6-7} , ψ_{7-8} , s_1 , s_2 , s_3 , s_4 și s_5). În funcție de complexitatea problemei, ce se dorește a fi studiată, acești parametri pot avea valori diferite și pot fi descriși de funcții diferite. Pentru studiile din capitolele 4-6 s-au considerat legi de mișcare cunoscute ale acestor parametri.

Legile de mișcare au fost alese după cum urmează:

- pentru parametrii unghiulari (φ_{0-1} , θ_{1-2} , φ_{2-3} , θ_{3-4} , φ_{4-5} , ψ_{5-6} , θ_{6-7} și ψ_{7-8}), s-a căutat o lege de mișcare care să pornească și să se încheie cu viteză și accelerație unghiulare nule; o astfel de lege de mișcare trebuie să fie exprimată printr-o funcție cu prima și a doua derivată nule, la momentele de timp inițial și final, t_1 și t_2 ; considerând valorile inițiale și finale ale unui unghi de rotație oarecare, f_1 și f_2 , o funcție care îndeplinește aceste condiții este [77] (fig. 4.4):

$$f(t) = f_1 + (f_2 - f_1) \cdot \left[\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} - \frac{\sin\left(2\pi \frac{t - t_1}{t_2 - t_1}\right)}{2\pi} \right]; \quad (4.1)$$

- pentru parametri liniari (s_1, s_2, s_3, s_4 și s_5), s-a ales o lege de mișcare simplă, cu valori constante ale vitezei motorului liniar:

$$s(t) = v_{ml} \cdot t + x_0. \quad (4.2)$$

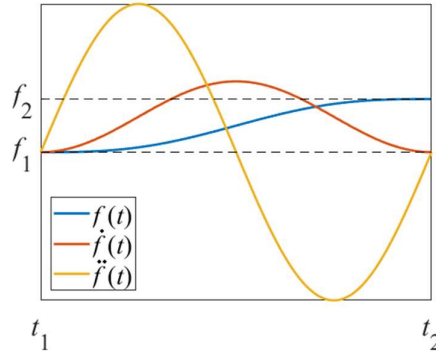


Fig. 4.4. Legea de mișcare și derivatele sale, pentru parametri unghiulari

4.3. Rotații. Matrice de transformare

Transformarea dintre matricele coordonatelor punctului P_1 , $\{X_1\}$, respectiv $\{X'_1\}$, este o funcție de forma $\{X'_1\} = f(\{X_1\}, t)$, care are forma [43]:

$$f(\{X_1\}, t) = [T](t) \cdot \{X_1\}, \quad (4.3)$$

unde $[T](t)$ este, în cazul spațiului euclidian, o matrice de transformare dependentă de timp definită în $\mathbb{R}^{3 \times 3}$.

Dacă rotația are loc cu unghiul φ în jurul axei Ox , matricea de transformare este [3], [15], [43], [48]:

$$[T_x](\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Analog, dacă rotația are loc cu unghiul θ în jurul axei Oy , matricea de transformare este:

$$[T_y](\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Analog, dacă rotația are loc cu unghiul ψ în jurul axei Oz , matricea de transformare este:

$$[T_z](\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

4.4. Determinarea coordonatelor și unghiurilor

Coordonatele $\{X\}$ ale unui punct dintr-un sistem de referință oarecare j se pot determina utilizând transformarea matriceală de rotație a coordonatelor față de un sistem de referință cunoscut k ,

$$\{X\}_j = [T]_{jk} \{X\}_k, \quad (4.7)$$

unde:

- sistemul de referință j este obținut prin rotirea sistemului de referință k , mai întâi cu unghiul φ în jurul axei Ox , apoi cu unghiul θ în jurul axei Oy și, în final, cu unghiul ψ în jurul axei Oz ;
- $\{X\}$ reprezintă matricea coloană a coordonatelor,

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}, \quad (4.8)$$

- $[T]_{jk}$ este matricea de rotație de la sistemul de referință k la sistemul de referință j [15], [48], [59],

$$\begin{aligned} [T]_{jk} &= T_x(\varphi)T_y(\theta)T_z(\psi) = \\ &= \begin{bmatrix} c\theta \cdot c\psi & -c\theta \cdot s\psi & s\theta \\ c\varphi \cdot s\psi + s\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi & c\varphi \cdot c\psi - s\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi & -s\varphi \cdot c\theta \\ s\varphi \cdot s\psi - c\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi & s\varphi \cdot c\psi + s\theta \cdot s\psi & c\varphi \cdot c\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.9)$$

- c și s reprezintă funcțiile cosinus respectiv sinus aplicate unghiurilor de rotație,

$$\begin{cases} s\varphi = \sin \varphi_{jk} & s\theta = \sin \theta_{jk} & s\psi = \sin \psi_{jk} \\ c\varphi = \cos \varphi_{jk} & c\theta = \cos \theta_{jk} & c\psi = \cos \psi_{jk} \end{cases} \quad (4.10)$$

La un moment de timp oarecare, unghiurile φ_{0-1} , θ_{1-2} , φ_{2-3} , θ_{3-4} , φ_{4-5} , ψ_{5-6} , θ_{6-7} și ψ_{7-8} au valori cunoscute, rezultate din legile de mișcare prezentate anterior. Astfel, coordonatele punctelor O_i se determină utilizând formulele (4.7)-(4.10).

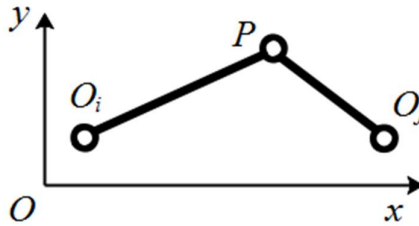


Fig. 4.6. Sistem cu două bare articulate

Pentru rezolvarea sistemelor patrulater, respectiv bielă manivelă cu excentricitate, prezentate anterior, se observă că, în cazul general a două bare articulate O_iP și O_jP , care se mișcă paralel cu planul Oxy (fig. 4.6), coordonatele pe direcțiile x și y ale punctului P se determină cu ajutorul sistemului de ecuații:

$$\begin{cases} (x_P - x_{O_i})^2 + (y_P - y_{O_i})^2 = O_iP^2 \\ (x_P - x_{O_j})^2 + (y_P - y_{O_j})^2 = O_jP^2 \end{cases} \quad (4.11)$$

4.5. Aplicații numerice

În aplicațiile numerice s-au utilizat legile de mișcare prezentate în paragraful 4.1, considerând următoarele date de intrare:

- intervalul de timp în care are loc mișcarea, $t = 0 \dots 0.8$ s;
- viteza actuatorului liniar al degetului 1, $v_{ML1} = -12.75$ mm/s;
- viteza actuatorilor liniari ale degetelor 2-5, $v_{ML2-5} = 15$ mm/s.

Valoarea pasului de timp a fost aleasă prin încercări, efectuate pentru a identifica un compromis acceptabil între precizia rezultatelor obținute prin integrare numerică și durata de execuție a programului MATLAB.

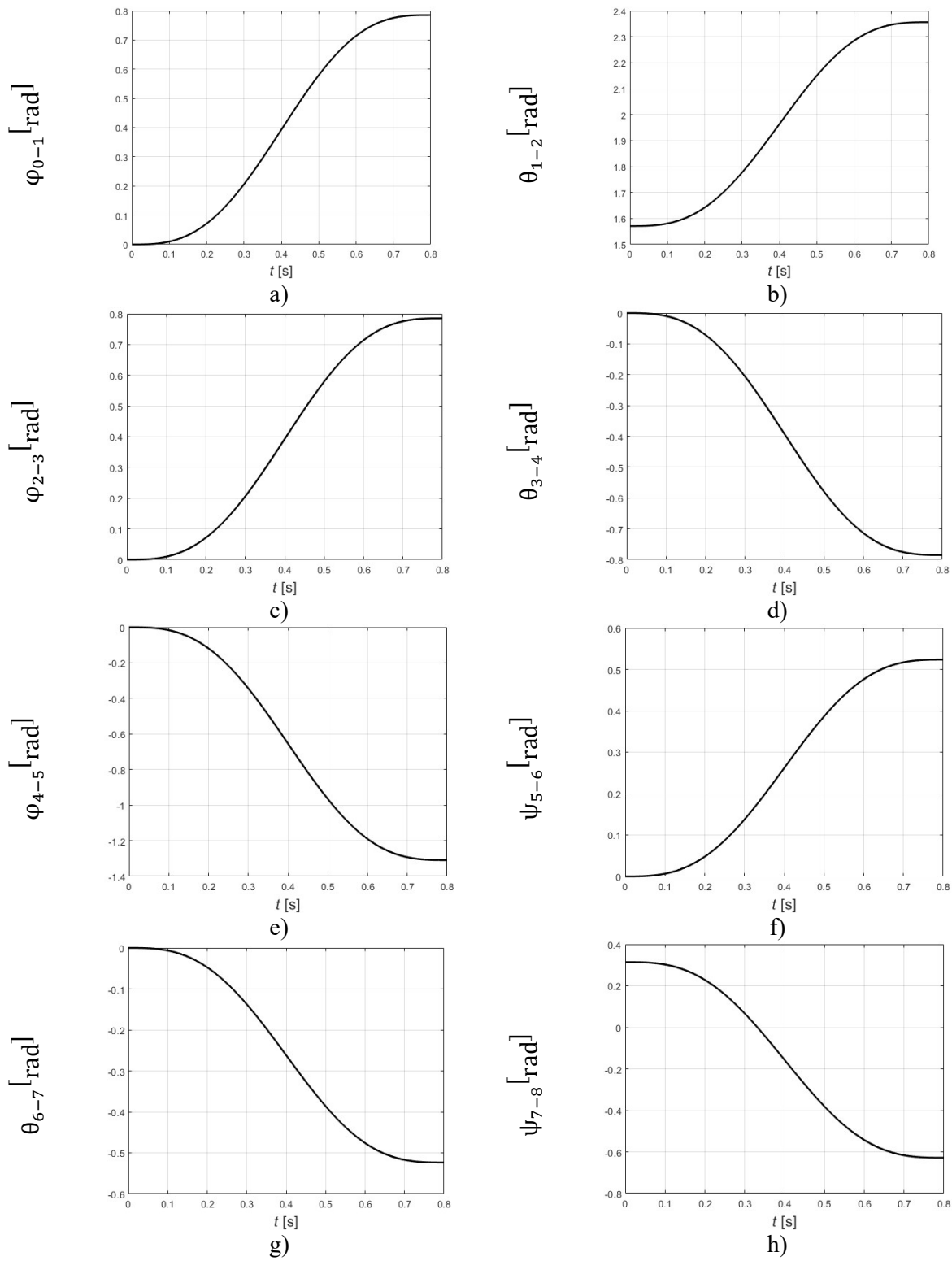


Fig. 4.7. Variațiile unghiurilor de rotație în articulațiile motoare

Viteza actuatorului liniar al degetului 1 a fost impusă de limitele de operare ale mecanismului degetului. Viteza actoarelor liniare ale degetelor 2-5 este egală cu viteza nominală a acestora.

Intervalele de variație ale unghiurilor corespunzătoare servomotoarelor brațului sunt date în tabelul 4.1.

Tab. 4.1: Unghiurile de rotație ale articulațiilor motoare ale brațului robotic

Unghiul	φ_{0-1}	θ_{1-2}	φ_{2-3}	θ_{3-4}	φ_{4-5}	ψ_{5-6}	θ_{6-7}
Valoare	$0 \dots \frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2} \dots \frac{3\pi}{4}$	$0 \dots \frac{\pi}{4}$	$0 \dots -\frac{\pi}{4}$	$0 \dots -\frac{5\pi}{12}$	$0 \dots \frac{\pi}{6}$	$0 \dots -\frac{\pi}{6}$

În tabelul 4.2 se pot observa unghiurile de rotație între sistemul de referință 7 și sistemul de referință 8.

Tab. 4.2: Unghiurile de rotație ψ_{7-8} ale fiecărui deget

Deget	1	2	3	4	5
Valoare	$\frac{\pi}{10} \dots -\frac{\pi}{5}$	$\frac{\pi}{36}$	0	$-\frac{\pi}{60}$	$-\frac{\pi}{30}$

Variațiile unghiurilor de rotație relativă a sistemelor de coordonate 1-8 sunt ilustrate în figura 4.7.

Variațiile funcției $s(t)$ pentru degetul 1, respectiv pentru degetele 2-5 sunt trasate în figura 4.8.

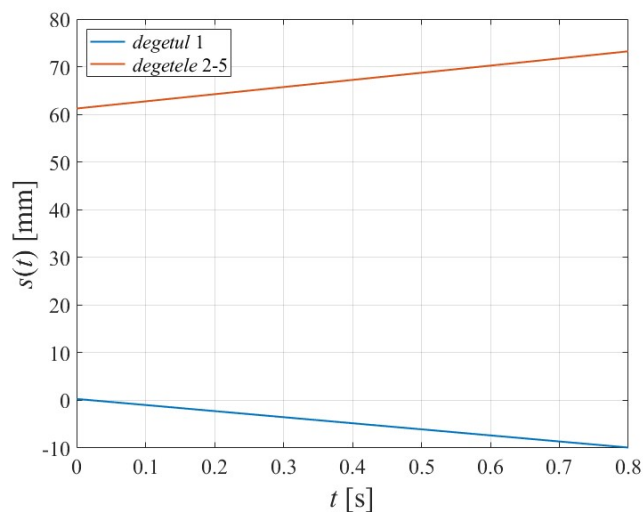


Fig. 4.8. Variațiile deplasărilor cuplelor prismatice $O_{10}O_{11}$

În figura 4.10 au fost reprezentate variațiile coordonatelor articulațiilor O_2, \dots, O_7 , în raport cu sistemul de referință $O_1x_0y_0z_0$.

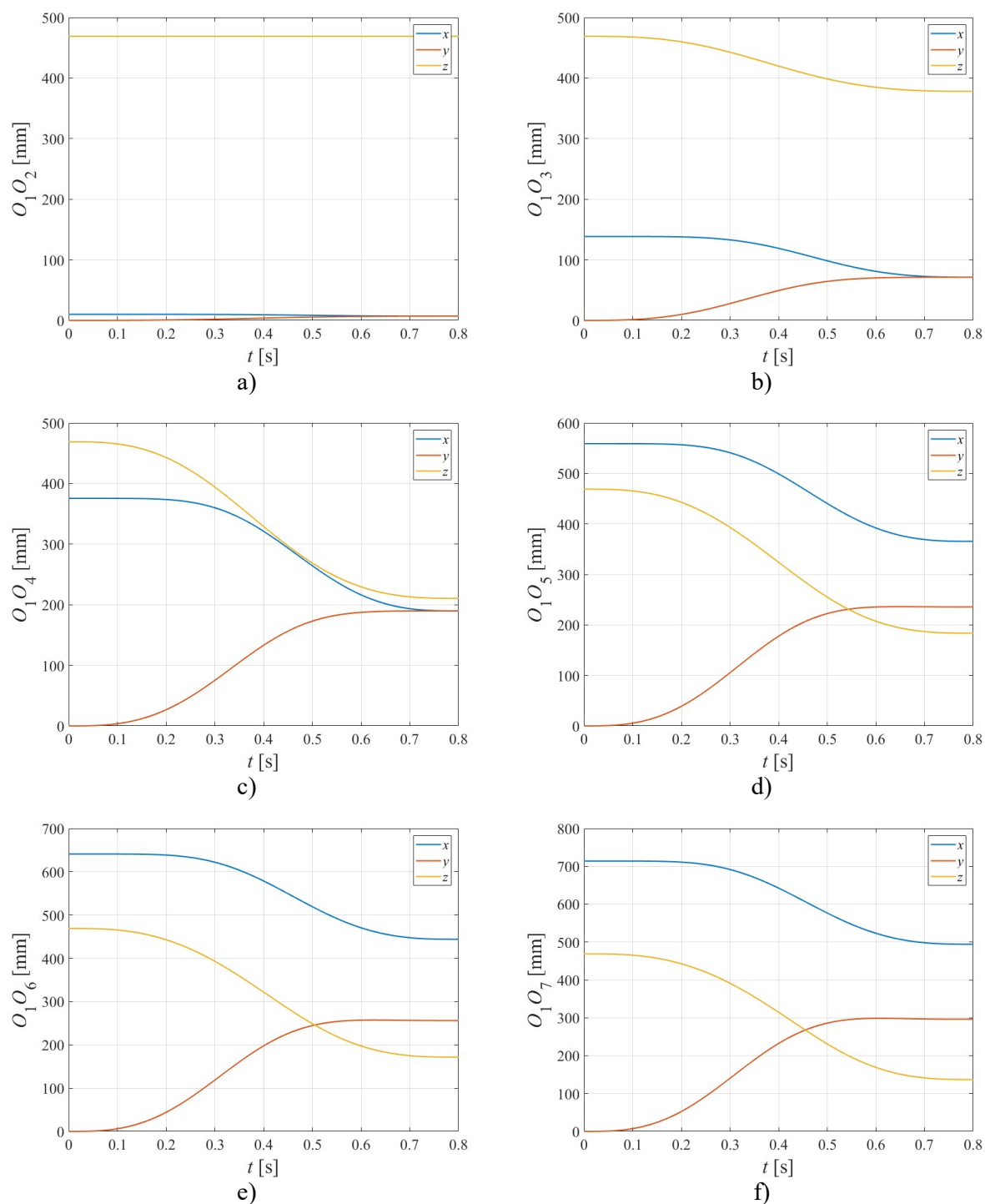
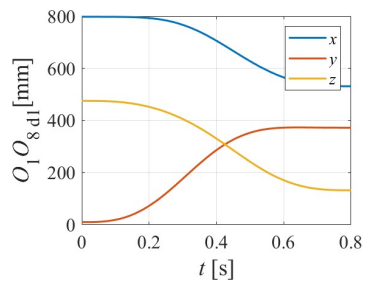
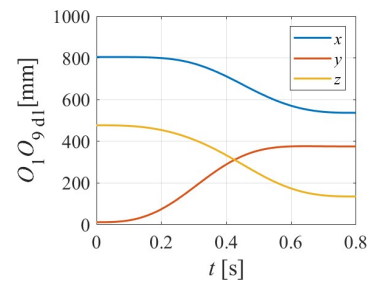


Fig. 4.10. Variațiile coordonatelor articulațiilor brațului

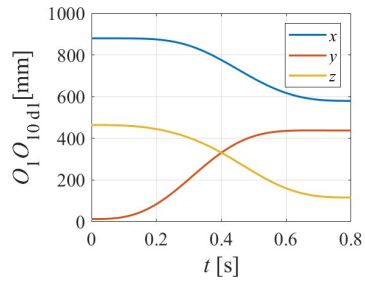
În figura 4.12 au fost reprezentate variațiile coordonatelor, în sistemul de referință global, ale articulațiilor ansamblului din care este compus acest deget, $O_8, \dots, O_{17}, A, B, D, E, F$.



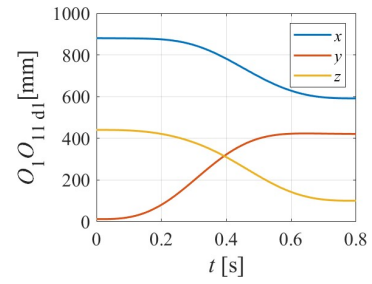
a)



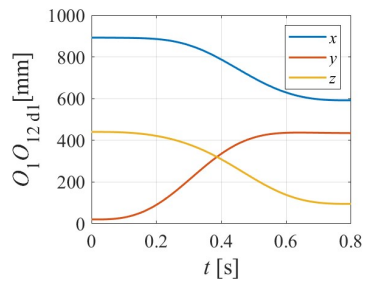
b)



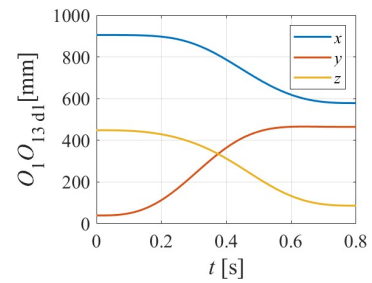
c)



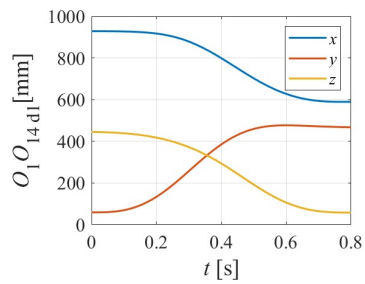
d)



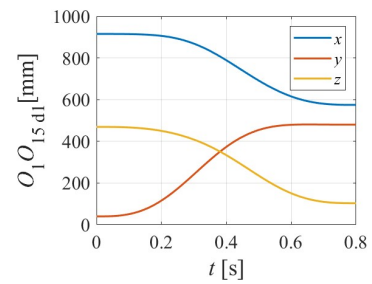
e)



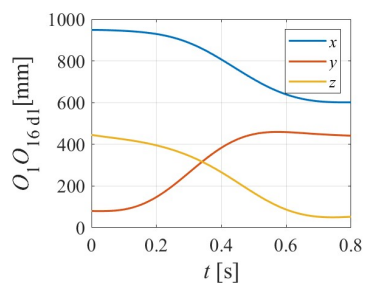
f)



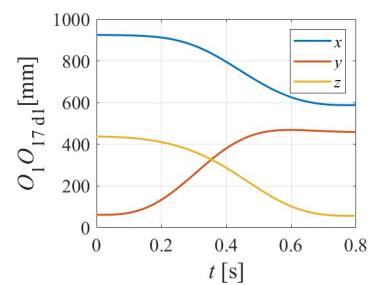
g)



h)



i)



j)

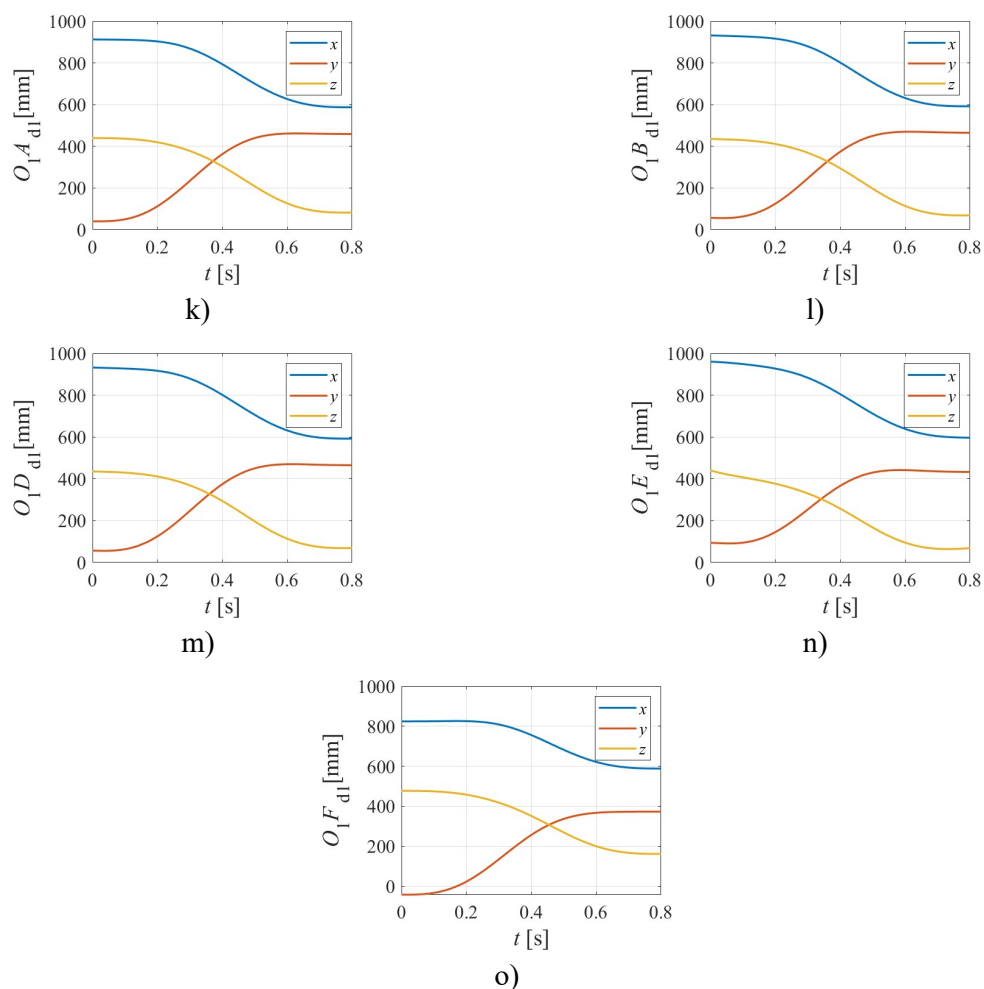


Fig. 4.12. Variația coordonatelor articulațiilor degetului 1

4.6. Concluzii

Mișcarea sistemului robotic mână-braț a fost vizualizată printr-o reprezentare grafică animată a punctelor semnificative ale acestuia, realizată cu ajutorul programului elaborat pentru determinarea calculelor cinematice și dinamice.

Variațiile coordonatelor articulațiilor brațului și ale degetelor, prezentate în paragraful anterior, au loc într-un interval plauzibil, nedepășindu-se limitările fizice ale sistemului robotic mână-braț.

5. Studiul cinematic

În acest capitol se determină vitezele și accelerațiile punctelor semnificative ale corpurilor sistemului mână-braț, precum și vitezele și accelerațiile unghiulare ale acestor corpuri.

5.1. Viteze și viteze unghiulare

În cazul general al unui sistem de coordonate cartezian, rotit întâi cu unghiul φ în jurul axei Ox , apoi cu unghiul θ în jurul noii axe Oy și în final cu unghiul ψ în jurul noii axe Oz , matricea coloană corespunzătoare vectorului viteză unghiulară în raport cu sistemul inițial este [48], [59]:

$$\begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\cos(\theta) \cdot \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix}. \quad (5.1)$$

Considerând vectorul viteză unghiulară al sistemului i față de sistemul j , respectiv cel al sistemului j față de sistemul k , vectorul viteză unghiulară al sistemului i față de sistemul k poate fi scris ca [9], [51], [68]:

$$\bar{\omega}_{i,k} = \bar{\omega}_{i,j} + \bar{\omega}_{j,k} \quad (5.2)$$

Viteza unui punct oarecare, P , al rigidului i , în raport cu sistemul de referință j , poate fi determinată cu formula [[9], [51], [68]:

$$\bar{v}_{P,j} = \bar{v}_{O_i,j} + \bar{\omega}_{i,j} \times \overline{O_iP}. \quad (5.3)$$

Viteza punctului O_{11} al tijei motorului liniar se determină utilizând formulele cunoscute din cinematica mișcării relative a punctului [9], [51], [68]:

$$\bar{v}_{O_{11},j} = \bar{v}_{O_{11},10} + \bar{v}_{O_{10},j} + \bar{\omega}_{j,10} \times \overline{O_{10}O_{11}}. \quad (5.4)$$

În cazul a două bare articulate O_iP și O_jP ce se mișcă în plan (fig. 4.6), dacă sunt cunoscute vitezele punctelor O_i și O_j , se pot determina vitezele unghiulare ale barelor, precum și viteza punctului P , utilizând formula (5.6):

$$\bar{v}_P = \bar{v}_{O_i} + \bar{\omega}_i \times \overline{O_iP} = \bar{v}_{O_j} + \bar{\omega}_j \times \overline{O_jP}. \quad (5.5)$$

Această metodă de calcul se aplică sistemelor $O_8O_9FO_{10}$, $O_{11}O_{12}AO_{13}$, $O_{13}O_{14}BO_{15}$ și $O_{14}O_{16}DO_{17}$, pentru a determina vitezele punctelor F , A , B și D , respectiv vitezele unghiulare ale corpurilor 9, 10 și 12-17.

5.2. Accelerații și accelerații unghiulare

Vectorul accelerație unghiulară reprezintă derivata vectorului viteză unghiulară [9], [51], [68]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{Bmatrix}. \quad (5.6)$$

Considerând cunoscuți vectorii viteză și accelerație unghiulară ai sistemului i față de sistemul j , respectiv ai sistemului j față de sistemul k , vectorul accelerație unghiulară al sistemului i față de sistemul k poate fi scris ca [9], [51], [68]:

$$\bar{\varepsilon}_{i,k} = \bar{\varepsilon}_{i,j} + \bar{\varepsilon}_{j,k} + \bar{\omega}_{j,k} \times \bar{\omega}_{i,j}. \quad (5.7)$$

Accelerația unui punct oarecare, P , al rigidului i , în raport cu sistemul de referință j , poate fi determinată cu formula [9], [51], [68]:

$$\bar{a}_{P,j} = \bar{a}_{O_i,j} + \bar{\varepsilon}_{i,j} \times \overline{O_iP} + \bar{\omega}_{i,j} \times (\bar{\omega}_{i,j} \times \overline{O_iP}). \quad (5.8)$$

Accelerația punctului O_{11} al tijei motorului liniar se determină utilizând formulele cunoscute din cinematica mișcării relative a punctului [9], [51], [68]:

$$\bar{a}_{O_{11},j} = \bar{a}_{O_{11},10} + \bar{a}_{O_{10},j} + \bar{\varepsilon}_{10,j} \times \overline{O_{10}O_{11}} + \bar{\omega}_{10,j} \times (\bar{\omega}_{10,j} \times \overline{O_{10}O_{11}}) + 2\bar{\omega}_{10,j} \times \bar{v}_{O_{11},10}. \quad (5.9)$$

În cazul a două bare articulate O_iP și O_jP ce se mișcă în plan (fig. 4.6), dacă sunt cunoscute accelerațiile punctelor O_i și O_j , precum și vitezele unghiulare ale barelor, se pot determina accelerațiile unghiulare ale barelor, precum și accelerația punctului P , utilizând formula (5.16):

$$\bar{a}_P = \bar{a}_{O_i} + \bar{\varepsilon}_i \times \overline{O_iP} + \bar{\omega}_i \times (\bar{\omega}_i \times \overline{O_iP}) = \bar{a}_{O_j} + \bar{\varepsilon}_j \times \overline{O_jP} + \bar{\omega}_j \times (\bar{\omega}_j \times \overline{O_jP}). \quad (5.10)$$

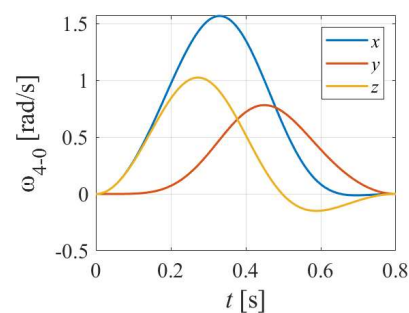
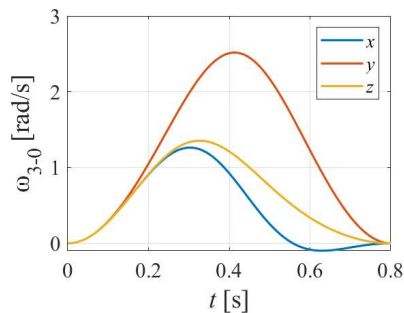
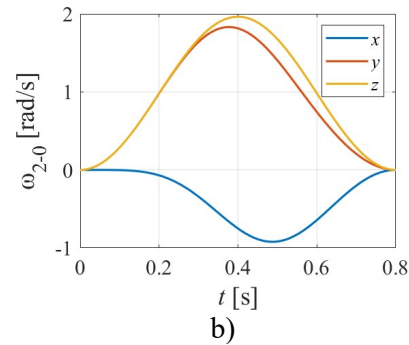
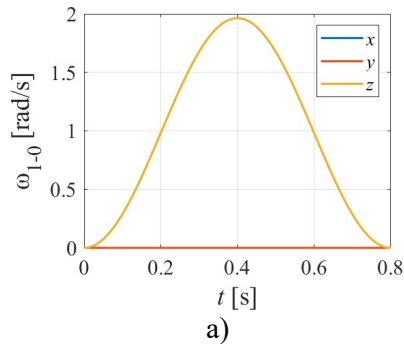
Această metodă de calcul se aplică sistemelor $O_8O_9FO_{10}$, $O_{11}O_{12}AO_{13}$, $O_{13}O_{14}BO_{15}$ și $O_{14}O_{16}DO_{17}$, pentru a determina accelerațiile punctelor F , A , B și D , respectiv accelerațiile unghiulare ale corpurilor 9, 10 și 12-17.

5.3. Aplicații numerice

În cadrul studiului numeric s-au determinat vitezele și accelerațiile punctelor semnificative ale sistemul mână-braț, precum și vitezele și accelerațiile unghiulare ale corpurilor ce formează acest sistem.

5.3.1. Viteze și viteze unghiulare

Variațiile vitezelor unghiulare ale corpurilor din care este format brațul, în raport cu sistemul de referință 0 sunt reprezentate în figura 5.2. Se poate observa că acestea pleacă din și ajung înapoi la valoarea 0. Acest lucru se datorează legii de mișcare alese. Variațiile vitezelor unghiulare ale corpurilor din care este format ansamblul degetului 1 (fig. 5.3) urmează aceeași regulă menționată anterior, până la corpul 11. Începând cu corpul 12, această proprietate nu se mai păstrează, deoarece apare influența legii de mișcare a motorului liniar. O altă observație ar fi că vitezele unghiulare ale corpurilor 10 și 11 coincid. Acest lucru se datorează mișcării de translație a corpului 11 față de corpul 10.



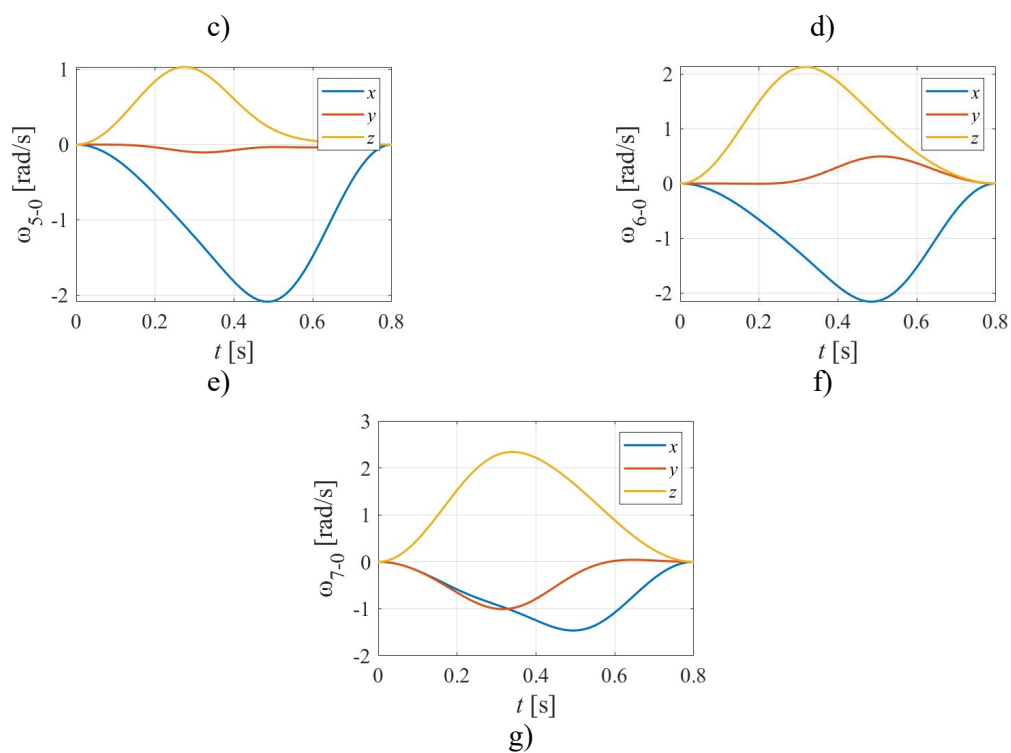
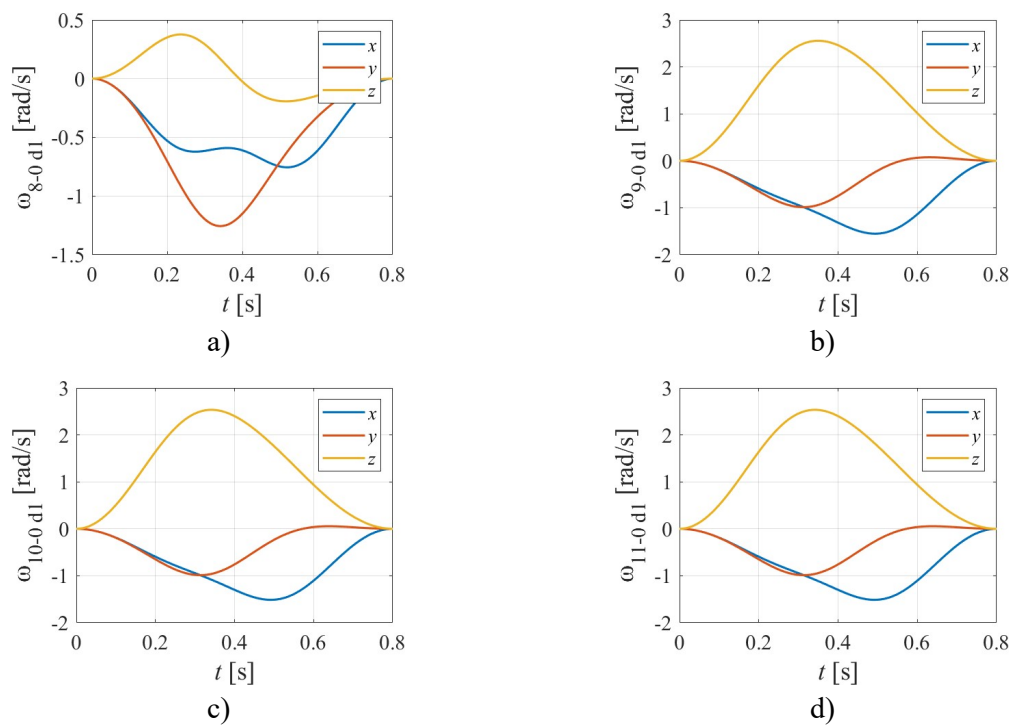


Fig. 5.2. Componentele vectorilor viteză unghiulară ale elementelor brațului față de sistemul de referință global, în raport cu axele acestui sistem



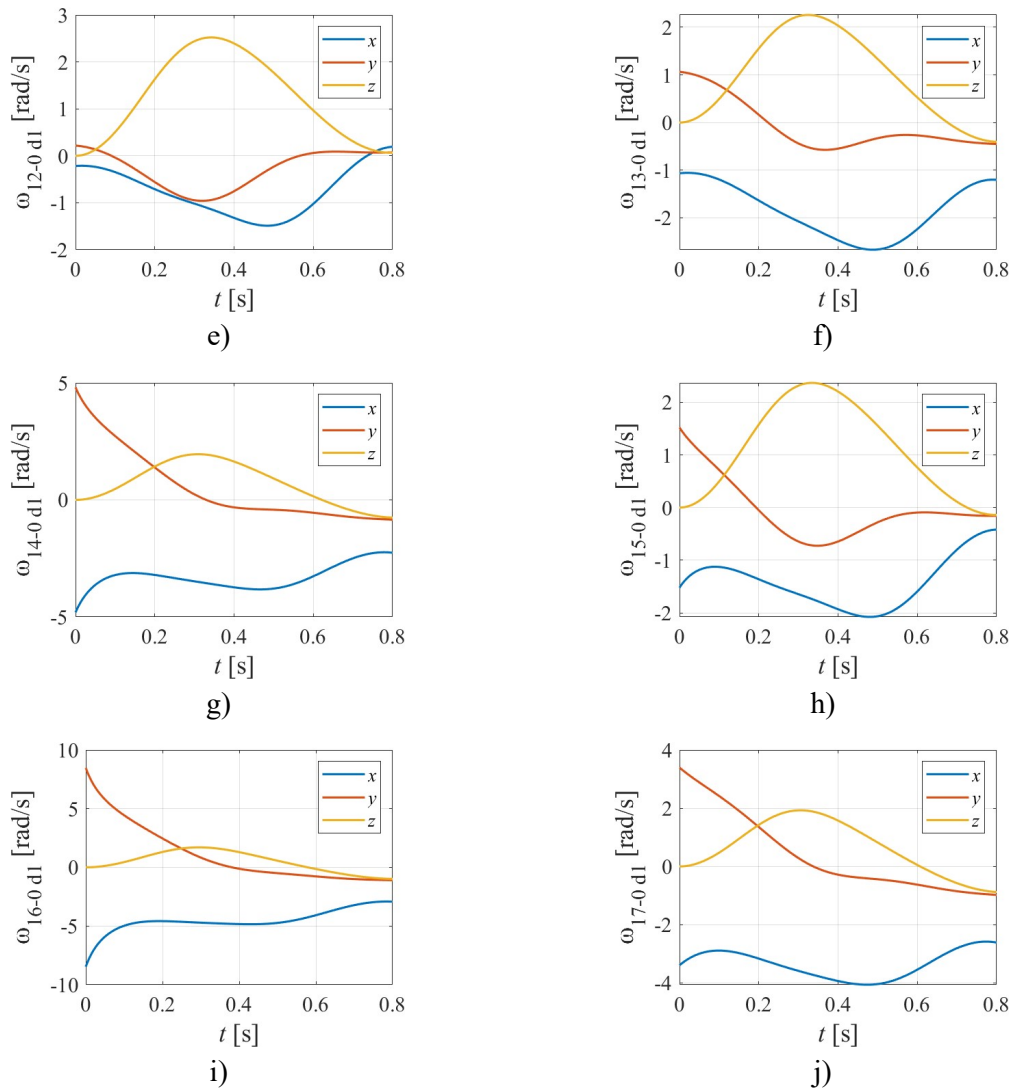


Fig. 5.3. Componentele vectorilor viteză unghiulară ale elementelor degetului 1 față de sistemul de referință global, în raport cu axele acestui sistem

În cele ce urmează, au fost reprezentate variațiile componentelor vitezelor punctelor din articulațiile O_2, \dots, O_7 (fig. 5.9), determinate în sistemul de referință global.

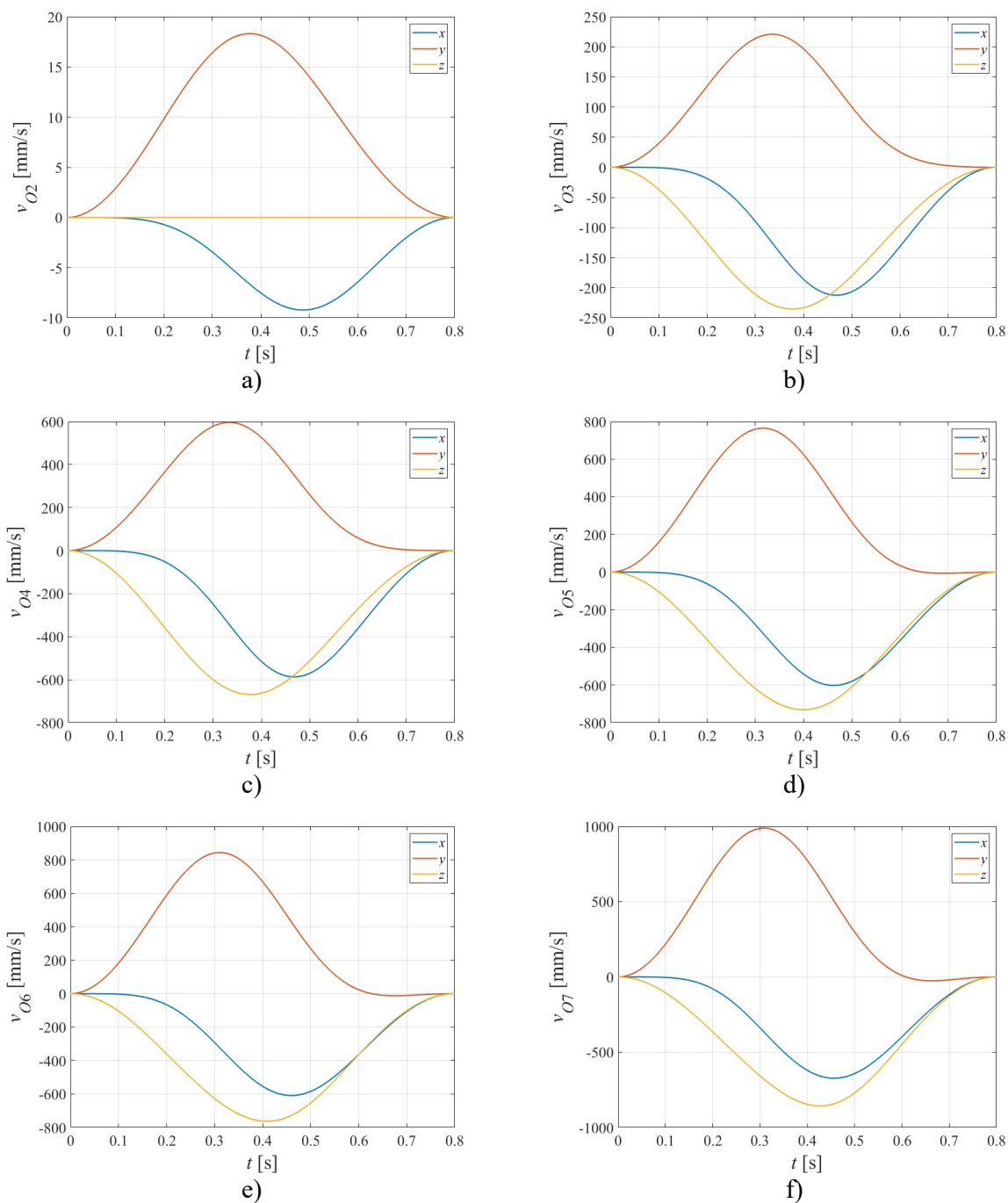


Fig. 5.9. Variația componentelor vitezelor punctelor din articulațiile elementelor brațului

În figura 5.11 au fost reprezentate variațiile componentelor vitezelor punctelor de interes, O_8, \dots, O_{17}, E , ale ansamblului din care este compus degetul 1, în sistemul de referință global.

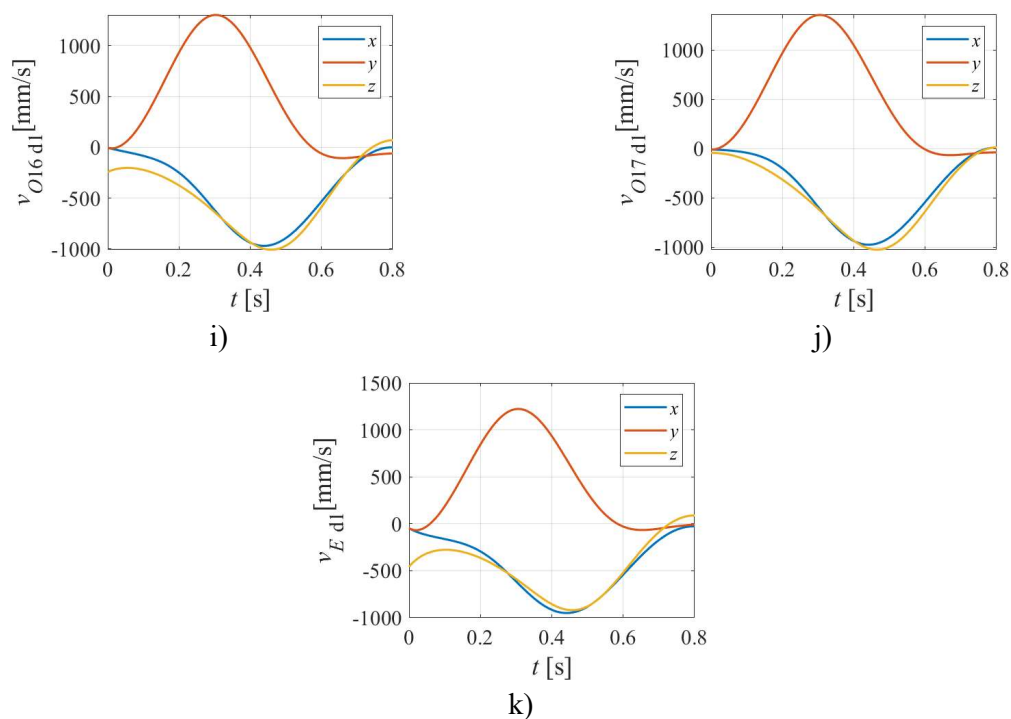
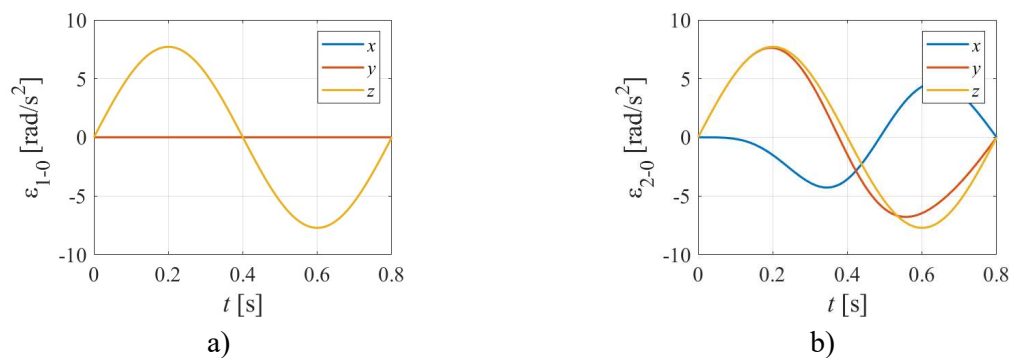


Fig. 5.11. Variația componentelor vitezelor punctelor de interes ale elementelor ansamblului degetului 1

5.3.2. Accelerații și accelerații unghiulare

Variațiile accelerațiilor unghiulare ale corpurilor din care este format brațul, în raport cu sistemul de referință 0 au fost reprezentate în figura 5.21. Se poate observa că acestea pornesc și ajung înapoi la valoarea 0. Acest lucru se datorează legii de mișcare alese. Variațiile accelerațiilor unghiulare ale corpurilor din care este format ansamblul degetului 1 (fig. 5.22) urmează aceeași regulă menționată anterior, până la corpul 11. Începând cu corpul 12, această proprietate nu se mai păstrează, deoarece apare influența legii de mișcare a motorului liniar. O altă observație ar fi că accelerațiilor unghiulare ale corpurilor 10 și 11 coincid. Acest lucru se datorează mișcării de translație a corpului 11 față de corpul 10.



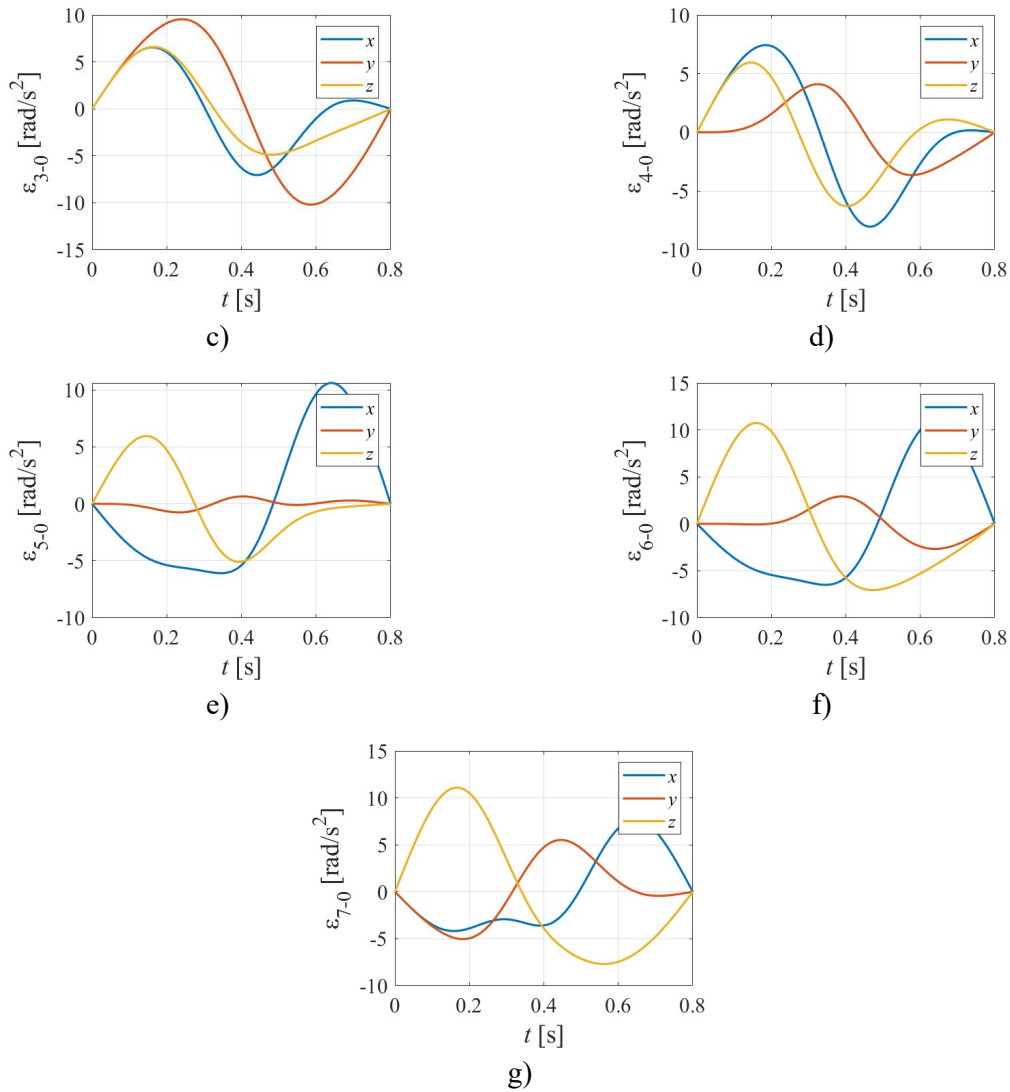
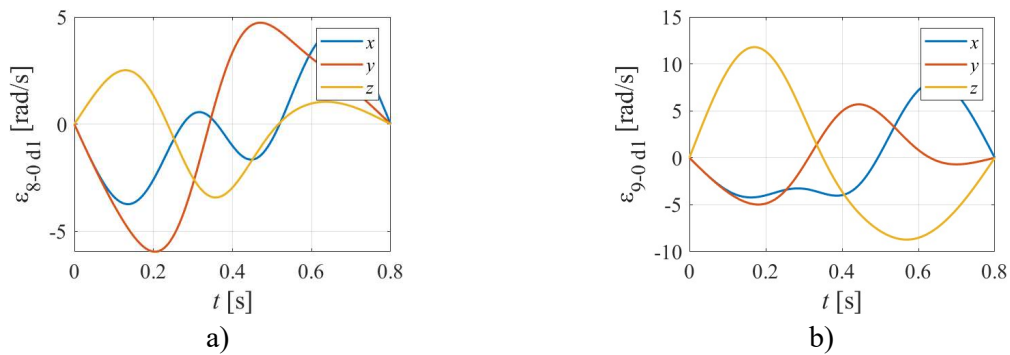


Fig. 5.21. Variația componentelor vectorilor accelerație unghiulară ale elementelor brațului față de sistemul de referință global, în raport cu axele acestui sistem



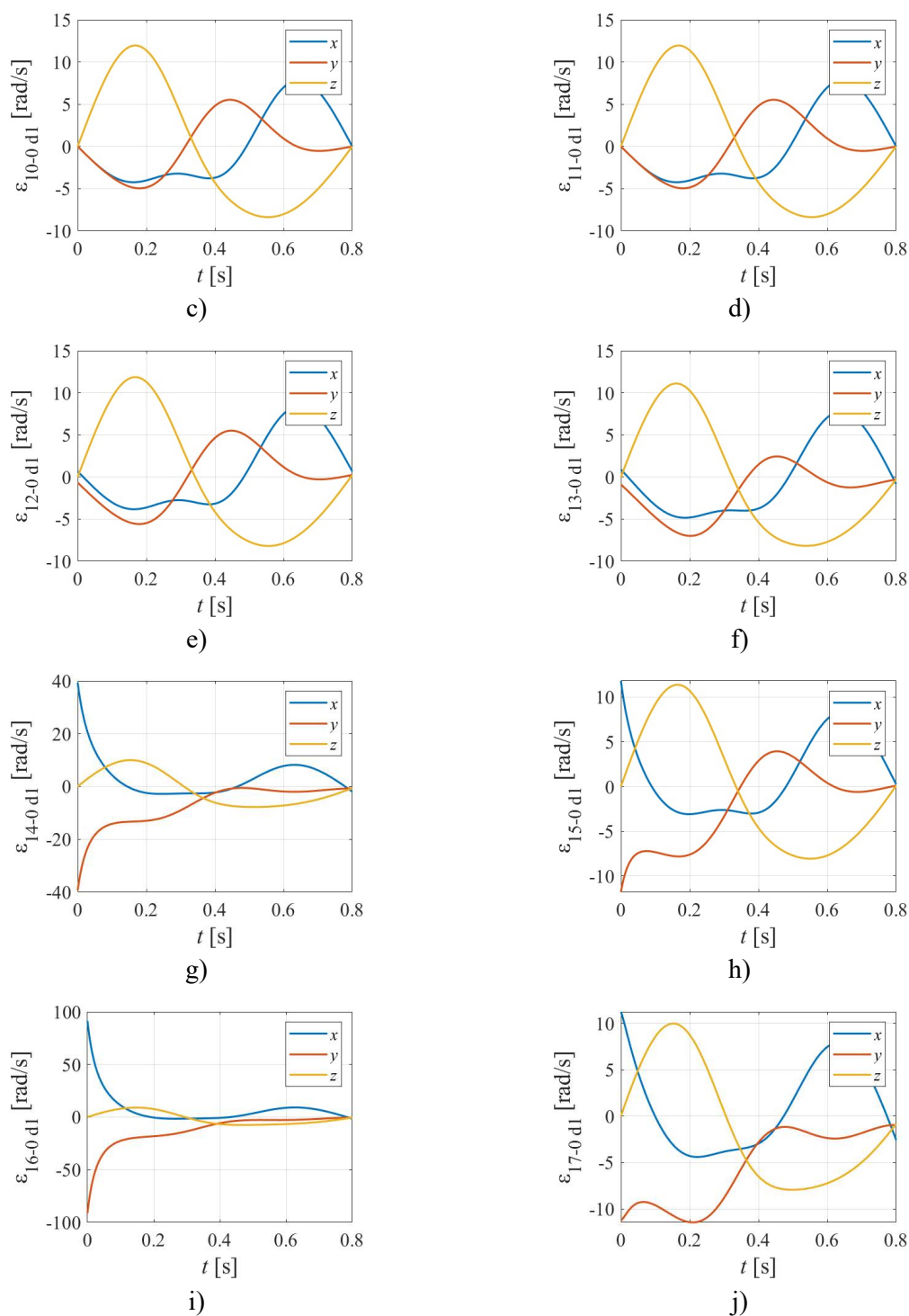


Fig. 5.22. Variația componentelor vectorilor accelerație unghiulară ale elementelor degetului 1 față de sistemul de referință global, în raport cu axele acestui sistem

În cele ce urmează, au fost reprezentate variațiile componentelor accelerațiilor punctelor din articulațiile O_2, \dots, O_7 (fig. 5.28), determinate în sistemul de referință global.

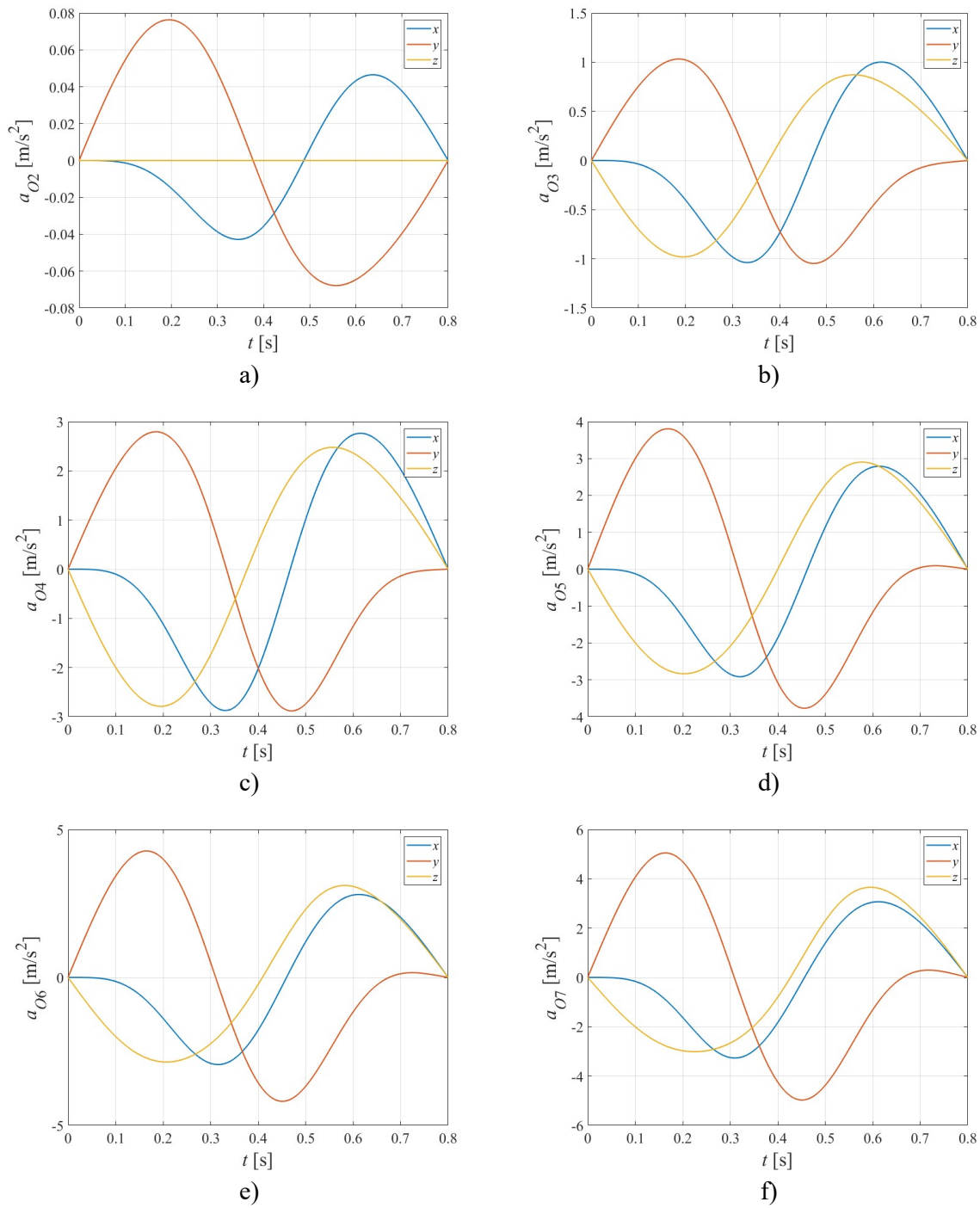
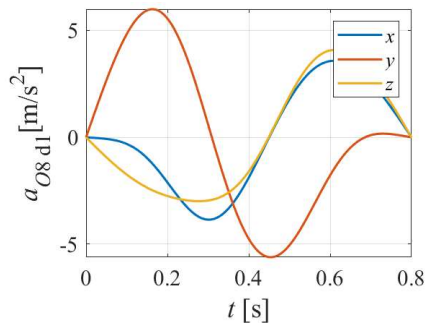
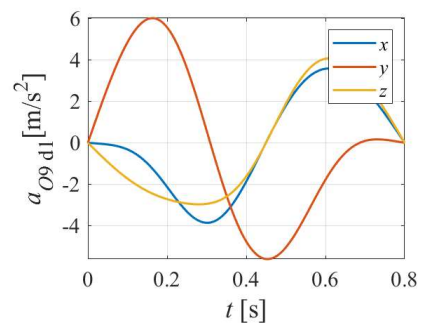


Fig. 5.28. Variația componentelor accelerațiilor punctelor din articulațiile elementelor brațului

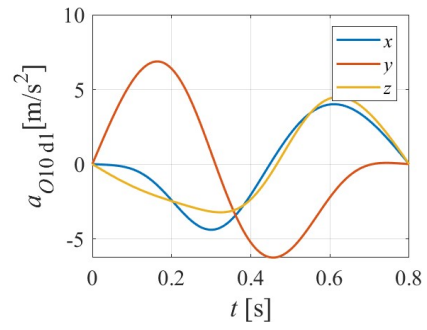
În figura 5.30 au fost reprezentate variațiile componentelor accelerațiilor punctelor de interes, O_8, \dots, O_{17}, E , ale ansamblului din care este compus degetul 1, în sistemul de referință global.



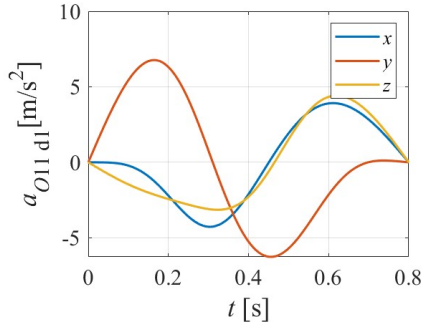
a)



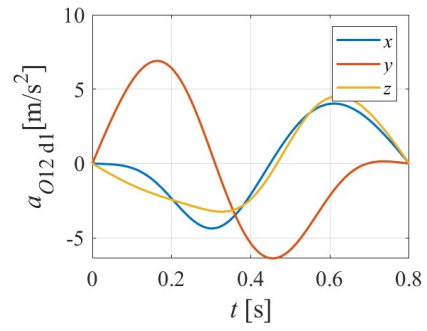
b)



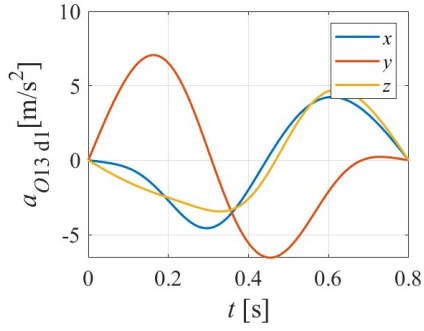
c)



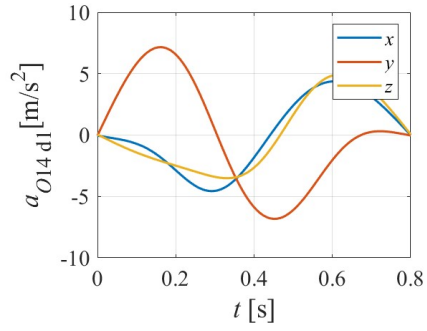
d)



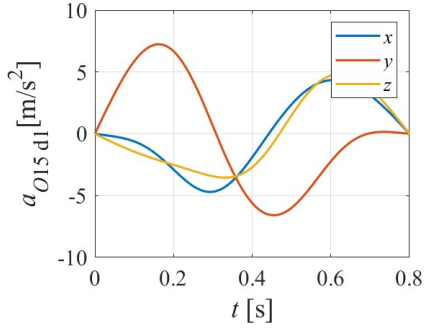
e)



f)



g)



h)

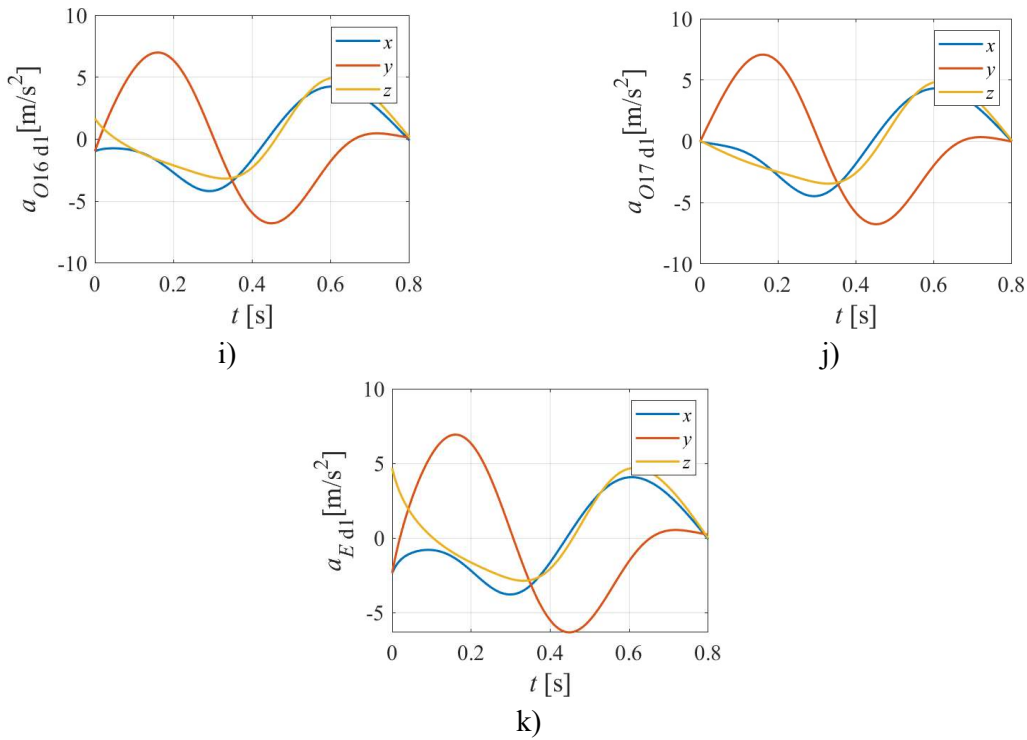


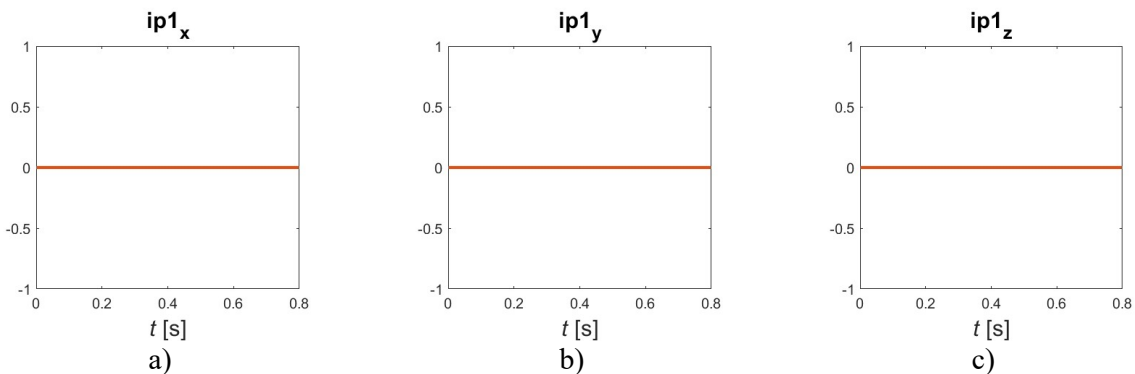
Fig. 5.30. Variația componentelor accelerațiilor punctelor de interes ale elementelor ansamblului degetului 1

5.3.3. Verificări

Pentru verificarea veridicității rezultatelor obținute în subparagrafele 5.3.1 și implicit 5.3.2 s-a utilizat formulele lui Poisson [9], [51], [66], [67], [68]:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{i}} &= \vec{\omega} \times \vec{i} \\ \dot{\vec{j}} &= \vec{\omega} \times \vec{j} \\ \dot{\vec{k}} &= \vec{\omega} \times \vec{k}\end{aligned}\quad (5.11)$$

În figura 5.39 s-au verificat aceste relații, proiectându-le pe sistemul de referință global, pentru sistemul de referință 1, și s-au reprezentat pe același grafic cu două culori diferite (albastru și roșu), fiecare componentă a fiecărui termen al egalităților prezentate anterior.



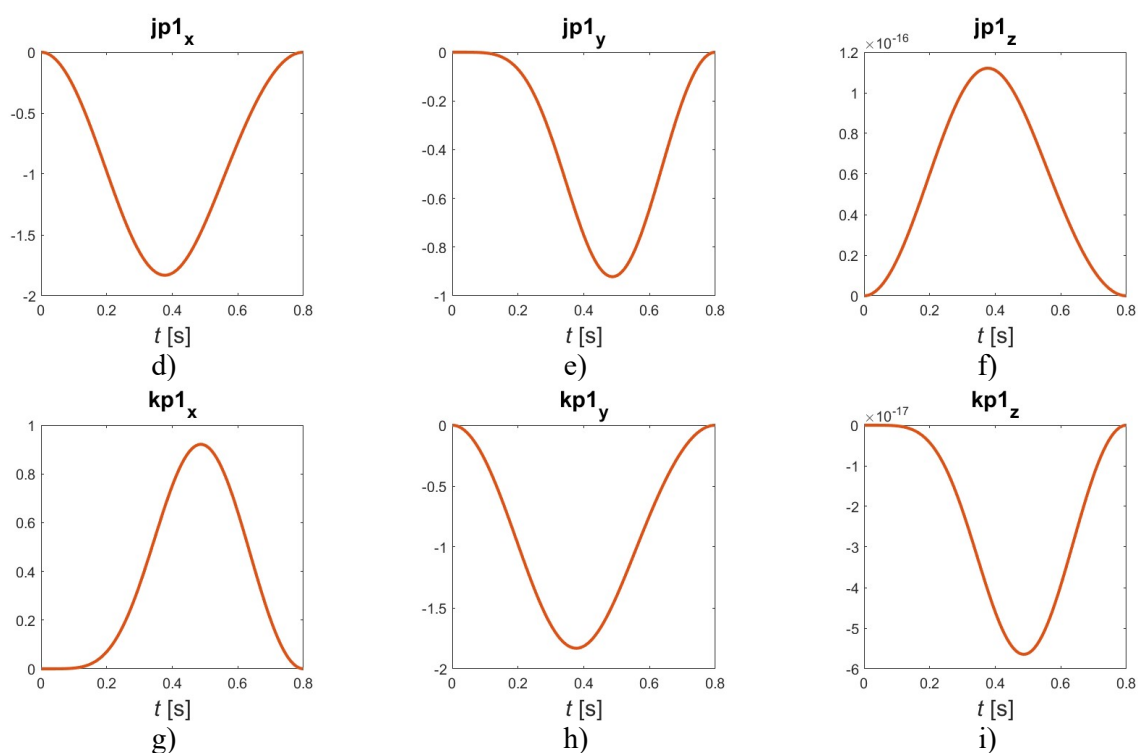


Fig. 5.39. Poisson pentru sistemul 1

5.4. Concluzii

După realizarea calculelor cinematice și determinarea vitezelor unghiulare, accelerațiilor unghiulare, precum și a vitezelor și accelerațiilor punctelor semnificative ale sistemului robotic mână-braț, au fost efectuate mai multe seturi de verificări, după cum urmează:

1. vitezele unghiulare ale copurilor componente determinate analitic au fost verificate cu ajutorul relațiilor lui Poisson, în care versorii \bar{i} , \bar{j} și \bar{k} au fost derivați numeric;
2. vitezele punctelor semnificative determinate analitic au fost comparate cu valorile obținute prin derivarea numerică a vectorilor de poziție;
3. accelerațiile unghiulare ale copurilor componente determinate analitic au fost comparate cu valorile obținute prin derivarea numerică a vitezelor unghiulare;
4. accelerațiile punctelor semnificative determinate analitic au fost comparate cu valorile obținute prin derivarea numerică a vitezelor.

În toate cele patru seturi de verificări, rezultatele obținute prin cele două metode sunt în foarte bună concordanță.

6. Dinamica inversă

În robotică, dinamica inversă se ocupă cu determinarea forțelor și momentelor din articulații, atunci când se cunosc pozițiile, vitezele și accelerațiile punctelor de interes ale sistemului, precum și mărimile inerțiale (mase și momente de inerție).

În lucrarea de față s-au utilizat două metode:

- cu ajutorul metodelor mecanicii clasice, izolând toate cele 55 de corpuri ale sistemului și folosind teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă pentru fiecare corp în parte;
- cu ajutorul metodelor mecanicii analitice, folosind principiul lui D’Alambert și principiul puterilor virtuale.

6.1. Studiul cu metodele mecanicii clasice

În cazul studiului bazat pe metodele mecanicii clasice, pentru determinarea forțelor și momentelor din articulațiile sistemului, se izolează corpurile sistemului și se aplică succesiv teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă, pentru fiecare dintre acestea [9], [51], [68].

Pentru simplificare, se poate analiza doar sistemul format din brațul robotic și degetul 1 al prehsorului (fig. 6.1), deoarece, așa cum s-a arătat în capitolele anterioare, degetele 2-5 au un model mecanic asemănător degetului 1.

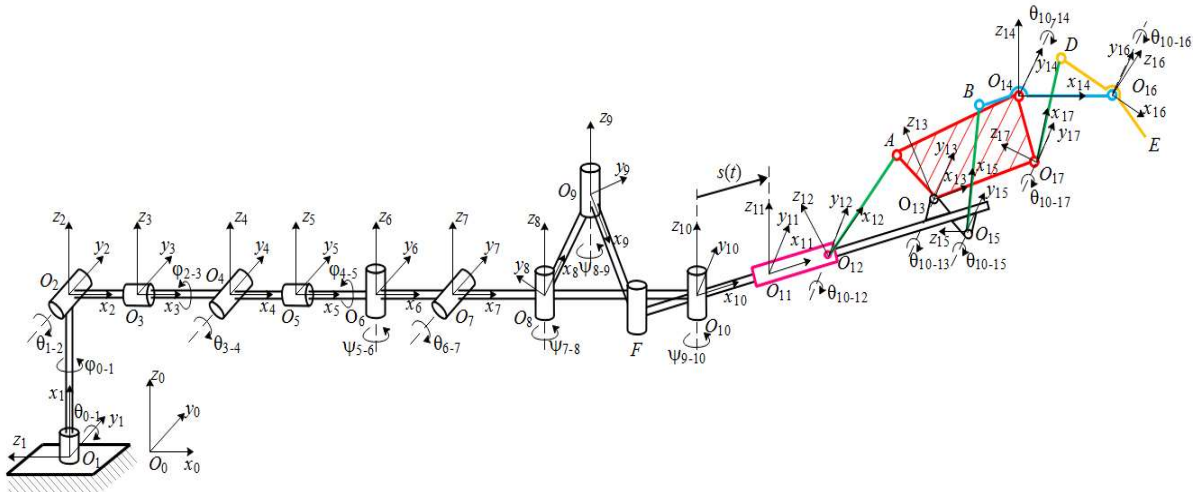


Fig. 6.1. Sistemul format din brațul robotic și prehsorul reprezentat cu degetul 1

În cele ce urmează, pentru un corp oarecare i , se notează:

- m_i – masa,
- \overline{J}_{C_i} – tensorul de inerție în raport cu centrul de masă C_i ,
- \overline{g} – accelerația gravitațională,
- \overline{e}_i – vectorul accelerație unghiulară absolută,
- \overline{a}_{C_i} – accelerația absolută a centrului de greutate,
- $\overline{\omega}_i$ – vectorul viteză unghiulară absolută,

- \bar{R}_i – forța din articulația O_i ,
- $-\bar{R}_{i+1}$ – forța din articulația O_{i+1} ,
- \bar{M}_i – momentul din articulația O_i ,
- $-\bar{M}_{i+1}$ – momentul din articulația O_{i+1} ,
- $\bar{C}_i\bar{O}_i$ – vectorul de poziție al punctului O_i față de centrul de masă C_i ,
- $\bar{C}_i\bar{O}_{i+1}$ – vectorul de poziție al punctului O_{i+1} față de centrul de masă C_i .

În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forțele și momentele din articulația O_{i+1} sunt considerate cu semnul plus pe corpul $i+1$ și cu semnul minus pe corpul i .

Ecuțiile care rezultă prin aplicarea celor două teoreme sunt exprimate în raport cu sistemul de referință atașat corpului respectiv, deoarece în raport cu acesta, matricea $[J_{C_i}]_i$ corespunzătoare tensorului de inerție \bar{J}_{C_i} este constantă.

6.1.1. Corpurile 1-6 și 8

Modelele mecanice ale corpurilor 1-6 și 8 sunt asemănătoare (fig. 6.2). În urma izolării corpului i ($i=1, 2, \dots, 6, 8$), articulația O_i se înlocuiește cu forța \bar{R}_i și momentul \bar{M}_i , iar articulația O_{i+1} cu forța $-\bar{R}_{i+1}$ și momentul $-\bar{M}_{i+1}$. Corpul este acționat și de greutatea sa, $m_i\bar{g}$.

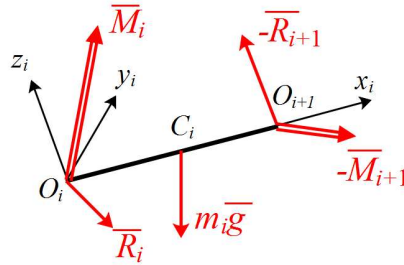


Fig. 6.2. Izolarea corpurilor 1-6 și 8

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale

$$m_i\bar{a}_{C_i} = \bar{R}_i - \bar{R}_{i+1} + m_i\bar{g}, \quad (6.1)$$

$$\bar{J}_{C_i} \cdot \bar{\varepsilon}_i + \bar{\omega}_i \times \bar{J}_{C_i} \cdot \bar{\omega}_i = \bar{M}_i - \bar{M}_{i+1} + \bar{C}_i\bar{O}_i \times \bar{R}_i - \bar{C}_i\bar{O}_{i+1} \times \bar{R}_{i+1}, \quad (6.2)$$

Ecuțiile (6.1), respectiv (6.2), iau următoarele forme matriceale:

$$m_i\{a_{C_i}\}_i = \{R_i\}_i - \{R_{i+1}\}_i + m_i\{g\}_i, \quad (6.3)$$

$$[J_{C_i}]_i\{\varepsilon_i\}_i + [\hat{\omega}_i]_i[J_{C_i}]_i\{\omega_i\}_i = \{M_i\}_i - \{M_{i+1}\}_i + [\bar{C}_i\bar{O}_i]_i\{R_i\}_i - [\bar{C}_i\bar{O}_{i+1}]_i\{R_{i+1}\}_i. \quad (6.4)$$

Modelele mecanice ale celorlalte corpuri sunt diferite și sunt prezentate în continuare.

6.1.2. Corpul 7

Corpul 7, izolat, este prezentat în figura 6.3. În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forțele și momentele din articulațiile O_8 și O_{10} sunt considerate cu semnul plus pe corpurile 8, respectiv 10 și cu semnul minus pe corpul 7.

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale

$$m_7 \overline{a_{C_7}} = \overline{R_7} - \overline{R_8} - \sum_{deget} \overline{R_{10}} + m_7 \overline{g}, \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} & \overline{J_{C_7}} \cdot \overline{\varepsilon_7} + \overline{\omega_7} \times \overline{J_{C_7}} \cdot \overline{\omega_7} = \\ = & \overline{M_7} - \overline{M_8} - \sum_{deget} \overline{M_{10}} + \overline{C_7 O_7} \times \overline{R_7} - \overline{C_7 O_8} \times \overline{R_8} - \sum_{deget} \overline{C_7 O_{10}} \times \overline{R_{10}}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

unde s-au notat:

- $-\sum_{deget} \overline{R_{10}}$ – vectorul rezultat al forțelor din articulațiile O_{10} , corespunzătoare celor cinci degete, care acționează asupra corpului 7,
- $-\sum_{deget} \overline{M_{10}}$ – vectorul rezultat al momentelor din articulațiile O_{10} , corespunzătoare celor cinci degete, care acționează pe corpul 7,
- $\overline{C_7 O_{10}}$ – vectorul de poziție al punctului O_{10} al fiecărui deget, față de centrul de masă C_7 .

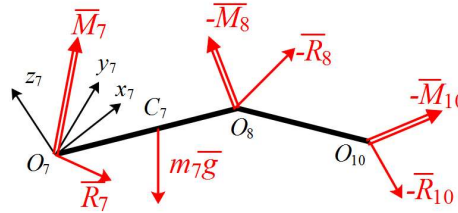


Fig. 6.3. Izolarea corpului 7

6.1.3. Corpul 9

Corpul 9, izolat, este prezentat în figura 6.4.

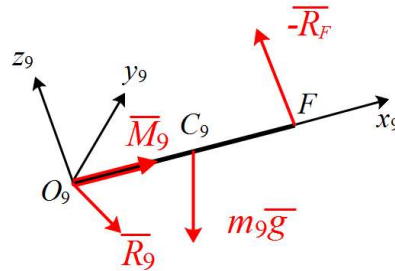


Fig. 6.4. Izolarea corpului 9

Legătura din O_9 a fost considerată articulație universală, deci momentul din această legătură are componentă doar pe axa x_9 . Legătura din F a fost considerată articulație sferică, deci momentul din această legătură este nul.

În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forța din articulația F este considerată cu semnul plus pe corpul 10 și cu semnul minus pe corpul 9.

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_9 \overline{a_{C_9}} = \overline{R_9} - \overline{R_F} + m_9 \overline{g}, \quad (6.7)$$

$$\overline{J_{C_9}} \cdot \overline{\varepsilon_9} + \overline{\omega_9} \times \overline{J_{C_9}} \cdot \overline{\omega_9} = \overline{M_9} + \overline{C_9 O_9} \times \overline{R_9} - \overline{C_9 F} \times \overline{R_F}, \quad (6.8)$$

unde s-au notat:

- $-\overline{R_F}$ – forța din articulația F a corpului 9,
- $\overline{C_9 F}$ – vectorul de poziție al punctului F față de centrul de masă C_9 .

6.1.4. Corpul 10

Corpul 10, izolat, este prezentat în figura 6.5. În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forțele și momentele din articulațiile O_{11} , O_{13} și O_{15} sunt considerate cu semnul plus pe corpurile 11, 13, respectiv 15 și cu semnul minus pe corpul 10.

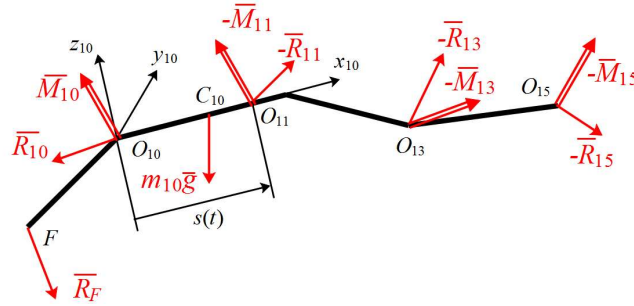


Fig. 6.5. Izolarea corpului 10

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{10}\overline{a}_{C_{10}} = \overline{R}_{10} + \overline{R}_F - \overline{R}_{11} - \overline{R}_{13} - \overline{R}_{15} + m_{10}\overline{g}, \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} & \overline{J}_{C_{10}} \cdot \overline{\varepsilon}_{10} + \overline{\omega}_{10} \times \overline{J}_{C_{10}} \cdot \overline{\omega}_{10} = \\ & = \overline{M}_{10} - \overline{M}_{11} - \overline{M}_{13} - \overline{M}_{15} + \\ & + \overline{C}_{10}O_{10} \times \overline{R}_{10} + \overline{C}_{10}F \times \overline{R}_F - \overline{C}_{10}O_{11} \times \overline{R}_{11} - \overline{C}_{10}O_{13} \times \overline{R}_{13} - \overline{C}_{10}O_{15} \times \overline{R}_{15}, \end{aligned} \quad (6.10)$$

unde s-au notat:

- \overline{R}_F – forța din articulația F a corpului 10,
- $-\overline{R}_{13}$ – forța din articulația O_{13} a corpului 10,
- $-\overline{R}_{15}$ – forța din articulația O_{15} a corpului 10,
- $-\overline{M}_{13}$ – momentul din articulația O_{13} al corpului 10,
- $-\overline{M}_{15}$ – momentul din articulația O_{15} al corpului 10,
- $\overline{C}_{10}F$ – vectorul de poziție al punctului F față de centrul de masă C_{10} ,
- $\overline{C}_{10}O_{13}$ – vectorul de poziție al punctului O_{13} față de centrul de masă C_{10} ,
- $\overline{C}_{10}O_{15}$ – vectorul de poziție al punctului O_{15} față de centrul de masă C_{10} .

6.1.5. Corpul 11

Corpul 11, izolat, este prezentat în figura 6.6.

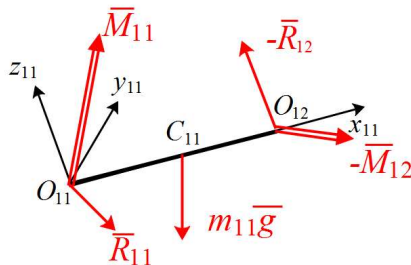


Fig. 6.6. Izolarea corpului 11

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{11}\overline{a_{C_{11}}} = \overline{R}_{11} - \overline{R}_{12} + m_{11}\overline{g}, \quad (6.11)$$

$$\overline{J_{C_{11}}} \cdot \overline{\varepsilon_{11}} + \overline{\omega_{11}} \times \overline{J_{C_{11}}} \cdot \overline{\omega_{11}} = \overline{M}_{11} - \overline{M}_{12} + \overline{C_{11}O_{11}} \times \overline{R}_{11} - \overline{C_{11}O_{12}} \times \overline{R}_{12}. \quad (6.12)$$

6.1.6. Corpul 12

Corpul 12, izolat, este prezentat în figura 6.7.

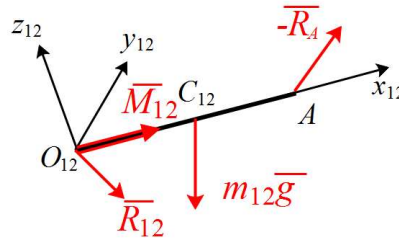


Fig. 6.7. Izolarea corpului 12

Legătura din O_{12} a fost considerată articulație universală, deci momentul din această legătură are componentă doar pe axa x_{12} . Legătura din A a fost considerată articulație sferică, deci momentul din această legătură este nul.

În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forța din articulația A este considerată cu semnul plus pe corpul 13 și cu semnul minus pe corpul 12.

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{12}\overline{a_{C_{12}}} = \overline{R}_{12} - \overline{R}_A + m_{12}\overline{g}, \quad (6.13)$$

$$\overline{J_{C_{12}}} \cdot \overline{\varepsilon_{12}} + \overline{\omega_{12}} \times \overline{J_{C_{12}}} \cdot \overline{\omega_{12}} = \overline{M}_{12} + \overline{C_{12}O_{12}} \times \overline{R}_{12} - \overline{C_{12}A} \times \overline{R}_A, \quad (6.14)$$

unde s-au notat:

- $-\overline{R}_A$ – forța din articulația A a corpului 12,
- $\overline{C_{12}A}$ – vectorul de poziție al punctului A față de centrul de masă C_{12} .

6.1.7. Corpul 13

Corpul 13, izolat, este prezentat în figura 6.8.

În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forțele și momentele din articulațiile O_{14} și O_{17} sunt considerate cu semnul plus pe corpurile 14, respectiv 17 și cu semnul minus pe corpul 13.

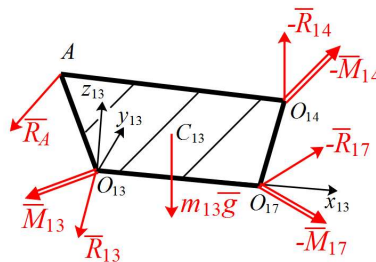


Fig. 6.8. Izolarea corpului 13

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{13}\overline{a_{C_{13}}} = \overline{R}_{13} + \overline{R}_A - \overline{R}_{14} - \overline{R}_{17} + m_{13}\overline{g}, \quad (6.15)$$

$$\begin{aligned} & \overline{J_{C_{13}}} \cdot \overline{\varepsilon}_{13} + \overline{\omega}_{13} \times \overline{J_{C_{13}}} \cdot \overline{\omega}_{13} = \\ = & \overline{M}_{13} - \overline{M}_{14} - \overline{M}_{17} + \overline{C_{13}O_{13}} \times \overline{R}_{13} + \overline{C_{13}A} \times \overline{R}_A - \overline{C_{13}O_{14}} \times \overline{R}_{14} - \overline{C_{13}O_{17}} \times \overline{R}_{17}, \end{aligned} \quad (6.16)$$

unde s-au notat:

- \overline{R}_A – forța din articulația A al corpului 13,
- $-\overline{R}_{17}$ – forța din articulația O_{17} a corpului 13,
- $-\overline{M}_{17}$ – momentul din articulația O_{17} al corpului 13,
- $\overline{C_{13}A}$ – vectorul de poziție al punctului A față de centrul de masă C_{13} ,
- $\overline{C_{13}O_{17}}$ – vectorul de poziție al punctului O_{17} față de centrul de masă C_{13} .

6.1.8. Corpul 14

Corpul 14, izolat, este prezentat în figura 6.9. În virtutea principiului acțiunii și al reacțiunii, forța și momentul din articulația O_{16} sunt considerate cu semnul plus pe corpul 16 și cu semnul minus pe corpul 14.

Legătura din B a fost considerată articulație sferică, deci momentul din această legătură este nul.

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{14}\overline{a_{C_{14}}} = \overline{R}_{14} + \overline{R}_B - \overline{R}_{16} + m_{14}\overline{g}, \quad (6.17)$$

$$\begin{aligned} & \overline{J_{C_{14}}} \cdot \overline{\varepsilon}_{14} + \overline{\omega}_{14} \times \overline{J_{C_{14}}} \cdot \overline{\omega}_{14} = \\ = & \overline{M}_{14} - \overline{M}_{16} + \overline{C_{14}O_{14}} \times \overline{R}_{14} + \overline{C_{14}B} \times \overline{R}_B - \overline{C_{14}O_{16}} \times \overline{R}_{16}, \end{aligned} \quad (6.18)$$

unde s-au notat:

- \overline{R}_B – forța din articulația B a corpului 14,
- $-\overline{R}_{16}$ – forța din articulația O_{16} a corpului 14,
- $-\overline{M}_{16}$ – momentul din articulația O_{16} a corpului 14,
- $\overline{C_{14}B}$ – vectorul de poziție al punctului B față de centrul de masă C_{14} ,
- $\overline{C_{14}O_{16}}$ – vectorul de poziție al punctului O_{16} față de centrul de masă C_{14} .

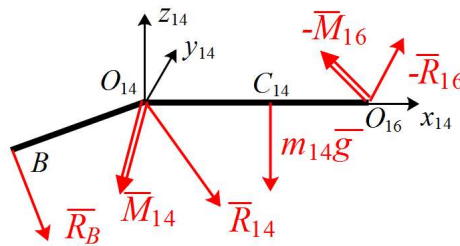


Fig. 6.9. Izolarea corpului 14

6.1.9. Corpul 15

Corpul 15, izolat, este prezentat în figura 6.10.

Legătura din O_{15} a fost considerată articulație universală, deci momentul din această legătură are componentă doar pe axa x_{15} .

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{15}\overline{a_{C_{15}}} = \overline{R}_{15} - \overline{R}_B + m_{15}\overline{g}, \quad (6.19)$$

$$\overline{J_{C_{15}}} \cdot \overline{\varepsilon}_{15} + \overline{\omega}_{15} \times \overline{J_{C_{15}}} \cdot \overline{\omega}_{15} = \overline{M}_{15} + \overline{C_{15}O_{15}} \times \overline{R}_{15} - \overline{C_{15}B} \times \overline{R}_B, \quad (6.20)$$

unde s-au notat:

- $-\overline{R}_B$ – forța din articulația B al corpului 15,
- $\overline{C_{15}B}$ – vectorul de poziție al punctului B față de centrul de masă C_{15} .

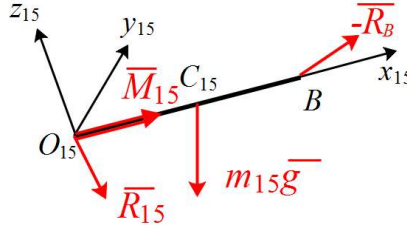


Fig. 6.10. Izolarea corpului 15

6.1.10. Corpul 16

Corpul 16, izolat, este prezentat în figura 6.11.

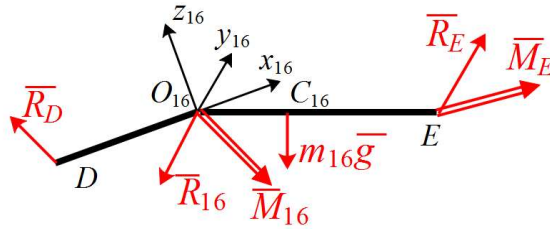


Fig. 6.11. Izolarea corpului 16

Legătura din D a fost considerată articulație sferică, deci momentul din această legătură este nul.

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{16}\overline{a_{C_{16}}} = \overline{R}_{16} + \overline{R}_D + \overline{R}_E + m_{16}\overline{g}, \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} & \overline{J_{C_{16}}} \cdot \overline{\varepsilon}_{16} + \overline{\omega}_{16} \times \overline{J_{C_{16}}} \cdot \overline{\omega}_{16} = \\ & = \overline{M}_{16} + \overline{M}_E + \overline{C_{16}O_{16}} \times \overline{R}_{16} + \overline{C_{16}D} \times \overline{R}_D + \overline{C_{16}E} \times \overline{R}_E, \end{aligned} \quad (6.22)$$

unde s-au notat:

- \overline{R}_D – forța din articulația D a corpului 16,
- \overline{R}_E – forța exterioară aplicată asupra degetului în punctul E al corpului 16,
- \overline{M}_E – momentul exterior aplicat asupra degetului în punctul E al corpului 16,
- $\overline{C_{16}D}$ – vectorul de poziție al punctului D față de centrul de masă C_{16} ,
- $\overline{C_{16}E}$ – vectorul de poziție al punctului E față de centrul de masă C_{16} .

6.1.11. Corpul 17

Corpul 17, izolat, este prezentat în figura 6.12.

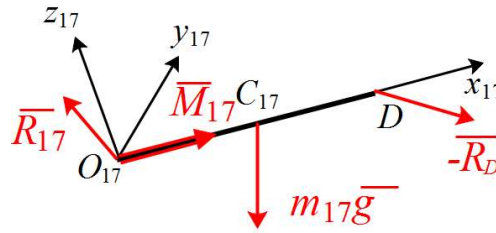


Fig. 6.12. Izolarea corpului 17

Aplicând teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă al corpului, se obțin relațiile vectoriale:

$$m_{17}\overline{a_{C_{17}}} = \overline{R_{17}} - \overline{R_E} + m_{17}\overline{g}, \quad (6.23)$$

$$\overline{J_{C_{17}}} \cdot \overline{\varepsilon_{17}} + \overline{\omega_{17}} \times \overline{J_{C_{17}}} \cdot \overline{\omega_{17}} = \overline{M_{17}} + \overline{C_{17}O_{17}} \times \overline{R_{17}} - \overline{C_{17}D} \times \overline{R_D}, \quad (6.24)$$

unde:

- $-\overline{R_D}$ reprezintă vectorul forță rezultantă din articulația D al corpului 17,
- $\overline{C_{17}D}$ reprezintă vectorul de poziție al punctului D față de centrul de greutate al corpului,

6.1.12. Analiza sistemului de ecuații rezultat

Ecuțiile obținute prin izolarea corpurilor și aplicarea teoremei impulsului și a teoremei momentului cinetic formează un sistem algebric liniar de 270 de ecuații, cu 270 de necunoscute.

Acest sistem trebuie rezolvat pentru fiecare moment de timp, ceea ce, necesită un timp de calcul ridicat, proporțional cu numărul punctelor de discretizare a intervalului de timp în care are loc mișcarea.

Pentru reducerea timpului de execuție și pentru sporirea preciziei, sistemul astfel rezultat poate fi decuplat în:

- 8 subsisteme de 6 ecuații, cu 6 necunoscute, corespunzătoare corpurilor 1-8;
- 5 subsisteme de 6 ecuații, cu 6 necunoscute, corespunzătoare corpului 11 al fiecărui deget;
- 1 subsistem de 12 ecuații, cu 12 necunoscute, corespunzător mecanismului O_9FO_{10} , prezent numai pe degetul 1;
- 15 subsisteme de 12 ecuații, cu 12 necunoscute, corespunzătoare mecanismelor $O_{12}AO_{13}$, $O_{14}BO_{15}$ și $O_{16}DO_{17}$ ale fiecărui deget.

Momentele și forțele motoare sunt anumite componente ale momentelor, respectiv forțelor, din legături, după cum urmează:

- componentele în raport cu axele de rotație din articulațiile $O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7$, precum și din articulația O_8 a degetului 1, ale momentelor, respectiv $M_{1x}, M_{2y}, M_{3x}, M_{4y}, M_{5x}, M_{6z}, M_{7y}, M_{8z}$;
- componentele în raport cu axele x_{11} corespunzătoare, ale forțelor aplicate tijelor 11, de pe cele cinci degete, respectiv F_{11dx} ($d = 1, 2, \dots, 5$).

6.2. Studiul cu metodele mecanicii analitice

În cazul în care interesează numai forțele și momentele motoare, calculul se poate eficientiza și mai mult, prin utilizarea principiului puterilor virtuale și a principiului lui D'Alambert.

În cele ce urmează, se prezintă aceste principii, precum și modul în care sunt ele utilizate în lucrarea de față.

6.2.1. Principiul puterilor virtuale în cazul echilibrului unui sistem de puncte materiale

Se cunoaște din literatură principiul puterilor virtuale [9], [51], [68], în virtutea căruia un sistem discret de puncte materiale P_i ($i=1, 2, \dots, n$), de mase m_i , supuse la legături ideale, este în echilibru dacă și numai dacă puterea virtuală efectuată de forțele direct aplicate \bar{F}_i ,

$$P' = \sum_i \bar{F}_i \cdot \bar{v}'_i \quad (6.25)$$

este nulă, pentru orice viteze virtuale \bar{v}'_i imprimabile punctelor sistemului:

$$P' = 0. \quad (6.26)$$

6.2.2. Principiul lui D'Alambert în cazul unui sistem de puncte materiale

Se cunoaște, de asemenea, din literatură principiul lui D'Alambert [9], [51], [68], conform căruia un sistem discret de puncte materiale P_i ($i=1, 2, \dots, n$), de mase m_i , în mișcare sub acțiunea forțelor direct aplicate \bar{F}_i , este echivalent cu sistemul în echilibru sub acțiunea forțelor direct aplicate, precum și a forțelor de inerție, $\bar{F}_i^{in} = -m_i \bar{a}_i$.

6.2.3. Principiul puterilor virtuale în cazul mișcării unui sistem de puncte materiale

Combinând principiul lui D'Alambert cu principiul puterilor virtuale, rezultă că mișcarea unui sistem discret de puncte materiale este guvernată de ecuația (6.26), în care, însă, puterea virtuală ia forma

$$P' = \sum_i (\bar{F}_i - m_i \bar{a}_i) \cdot \bar{v}'_i. \quad (6.27)$$

6.2.4. Principiul puterilor virtuale în cazul mișcării unui sistem de solide rigide

Principiul puterilor virtuale se poate aplica și unui sistem de n corpuri solide rigide, în mișcare sub acțiunea forțelor și momentelor direct aplicate, \bar{F}_j , ($j=1, 2, \dots, m$) respectiv \bar{M}_i , ($i=1, 2, \dots, n$).

Ecuația (6.26) rămâne valabilă, dar puterea virtuală se calculează luând în considerare forțele și momentele direct aplicate, precum și forțele de inerție, exprimate prin vectorii rezultanți \bar{R}_i^{in} și vectorii momente rezultante, calculați în raport cu centrele de masă corespunzătoare, $\bar{M}_{C_i}^{in}$,

$$\begin{aligned} P' &= \sum_{i=1}^n (\bar{R}_i^{in} \cdot \bar{v}'_{C_i} + \bar{M}_{C_i}^{in} \cdot \bar{\omega}'_i) + \sum_{j=1}^m \bar{F}_j \cdot \bar{v}'_j + \sum_{i=1}^n \bar{M}_i \cdot \bar{\omega}'_i = \\ &= - \sum_{i=1}^n [m_i \bar{a}_{C_i} \cdot \bar{v}'_{C_i} + (\bar{J}_{C_i} \bar{\varepsilon}_i + \bar{\omega}_i \times \bar{J}_{C_i} \bar{\omega}_i) \cdot \bar{\omega}'_i] + \sum_{j=1}^m \bar{F}_j \cdot \bar{v}'_j + \sum_{i=1}^n \bar{M}_i \cdot \bar{\omega}'_i, \end{aligned} \quad (6.28)$$

unde s-au notat:

- $\bar{\omega}_i$ – vectorul viteză unghiulară reală a corpului i ;
- $\bar{\varepsilon}_i$ – vectorul accelerație unghiulară a corpului i ;
- \bar{a}_{C_i} – accelerația centrului de masă C_i ;
- $\bar{\omega}'_i$ – vectorul viteză unghiulară virtuală a corpului i ;
- \bar{v}'_{C_i} – viteza virtuală a centrului de masă C_i ;
- \bar{v}'_j – viteza virtuală a punctului de aplicație al forței \bar{F}_j .

Pentru determinarea momentului motor M_{8z} , se consideră că O_8O_9 se rotește cu o viteză unghiulară virtuală ω'_8 , iar toți ceilalți parametri de comandă sunt fixați. Se determină vitezele virtuale ale centrelor de masă C_8, \dots, C_{17} și vitezele unghiulare virtuale ale corpurilor 9, ..., 17, din componența degetului 1. Apoi se determină puterea virtuală corespunzătoare, P'_8 , iar M_{8z} rezultă din condiția ca aceasta să fie egală cu 0.

Pentru determinarea forței motoare F_{11dx} , aplicată de motorul liniar al degetului d , se consideră că tija acestuia se deplasează cu viteza liniară virtuală v'_{11d} , iar toți ceilalți parametri de comandă sunt fixați. Se determină vitezele virtuale ale centrelor de masă C_{12}, \dots, C_{17} și vitezele unghiulare virtuale ale corpurilor 11, ..., 17, din componența degetului d . Apoi se determină puterea virtuală corespunzătoare, P'_{11d} , iar F_{11dx} rezultă din condiția ca aceasta să fie egală cu 0.

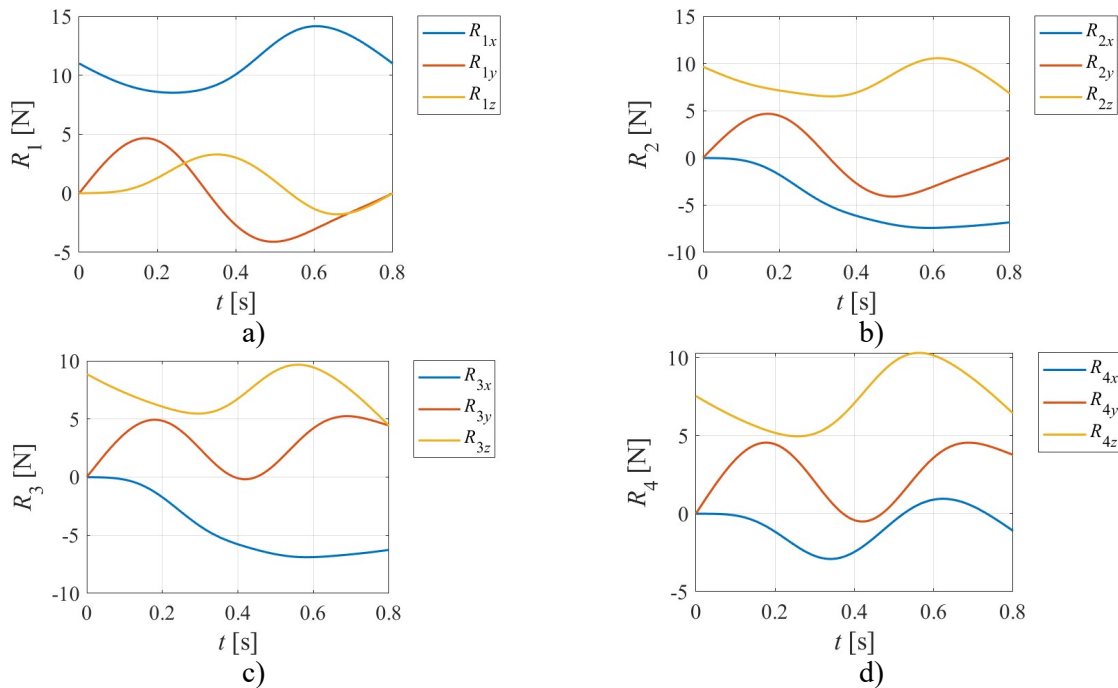
6.3. Aplicații numerice

În acest paragraf s-au determinat forțele și momentele din articulațiile sistemului, dacă se cunosc legile de mișcare ale corpurilor ce alcătuiesc sistemul, precum și parametrii dinamici (i.e. matricele de inerție și masele corpurilor).

6.3.1. Studiul cu metodele mecanicii clasice

Studiul folosind metodele mecanicii clasice al problemei se reduce la rezolvarea sistemului cu 270 de ecuații și 270 de necunoscute prezentat în paragraful 6.1.

În urma rezolvării acestui sistem, au rezultat în sistemul de referință global forțele R_1, \dots, R_7 (Fig. 6.13) și momentele M_1, \dots, M_7 (Fig. 6.14) din articulațiile brațului robotic, precum și forțele R_8, \dots, R_{17} , R_A , R_B , R_D și R_F (Fig. 6.15) și momentele M_8, \dots, M_{17} (Fig. 6.16) corespunzătoare degetului 1. Momentele M_A , M_B , M_D și M_F sunt 0, deoarece articulațiile A , B , D și F sunt articulații sferice.



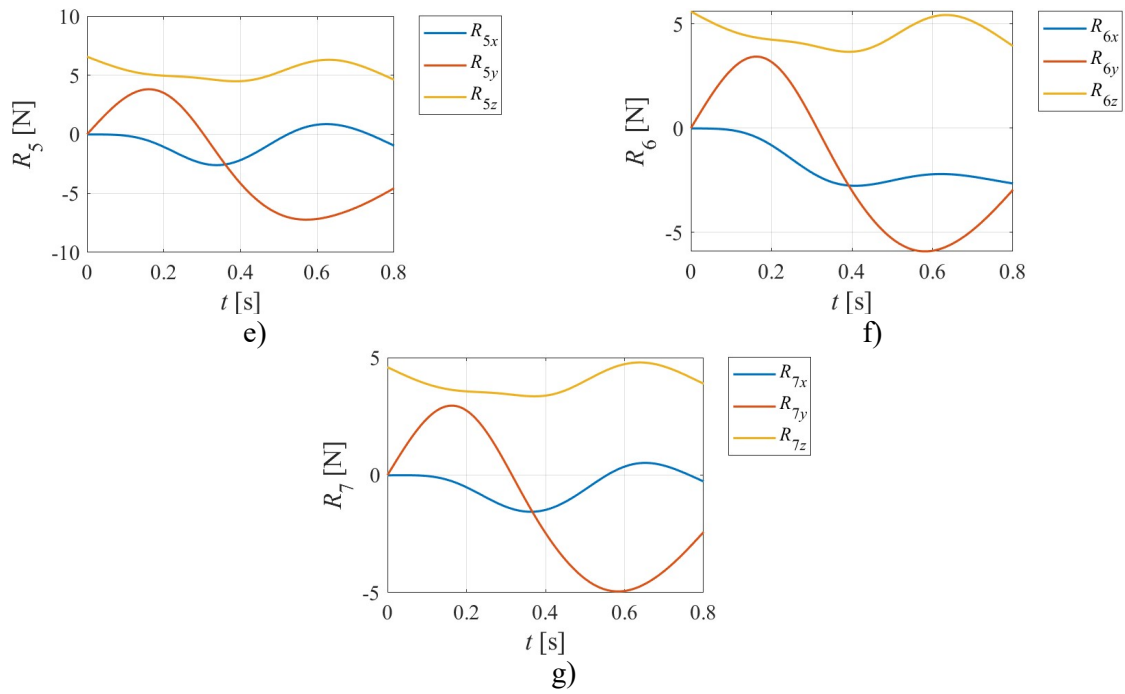
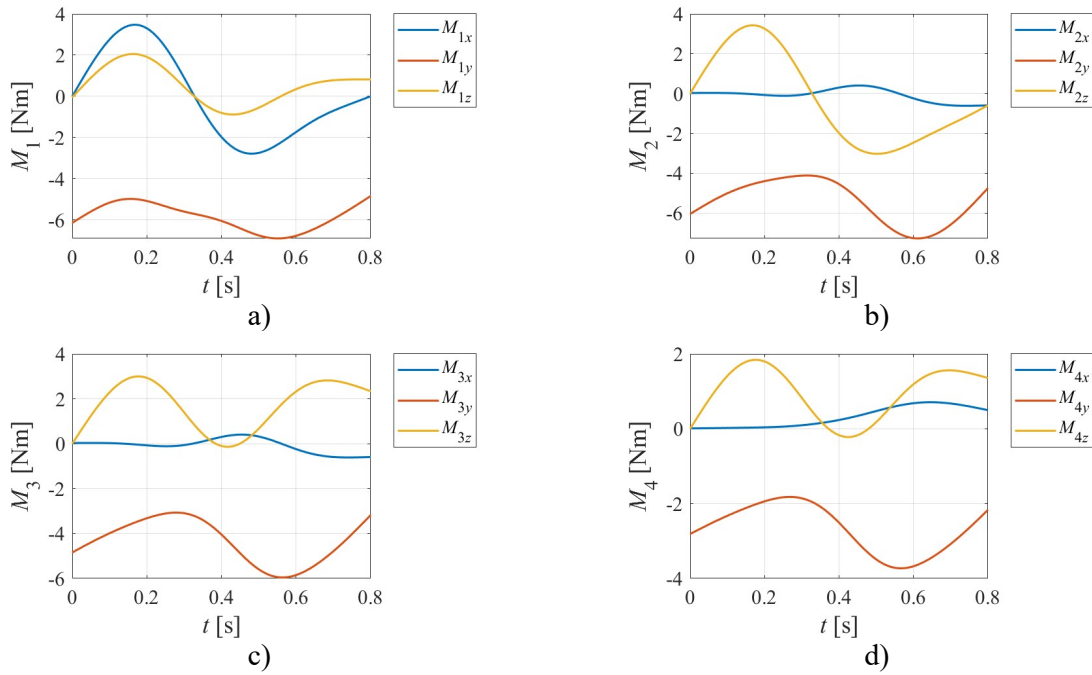


Fig. 6.13. Forțele din articulațiile brațului R_1, \dots, R_7 , în sistemul de referință global



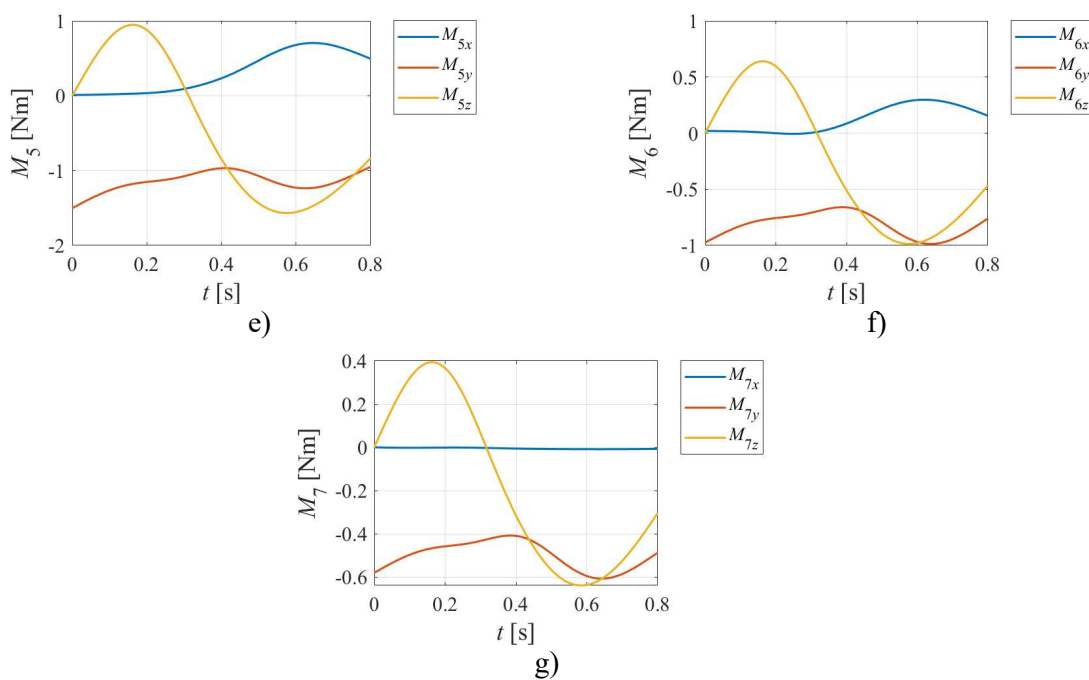
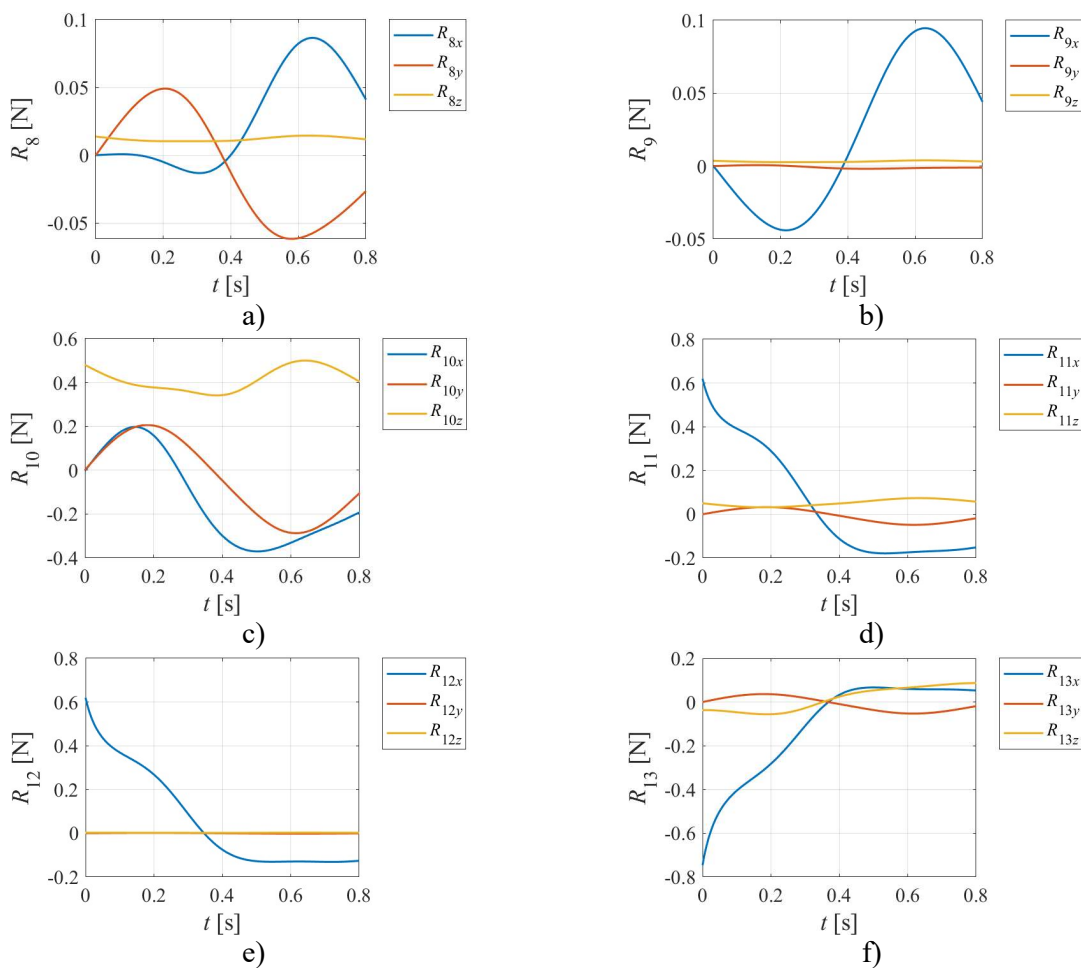


Fig. 6.14. Momentele din articulațiile brațului M_1, \dots, M_7 , în sistemul de referință global



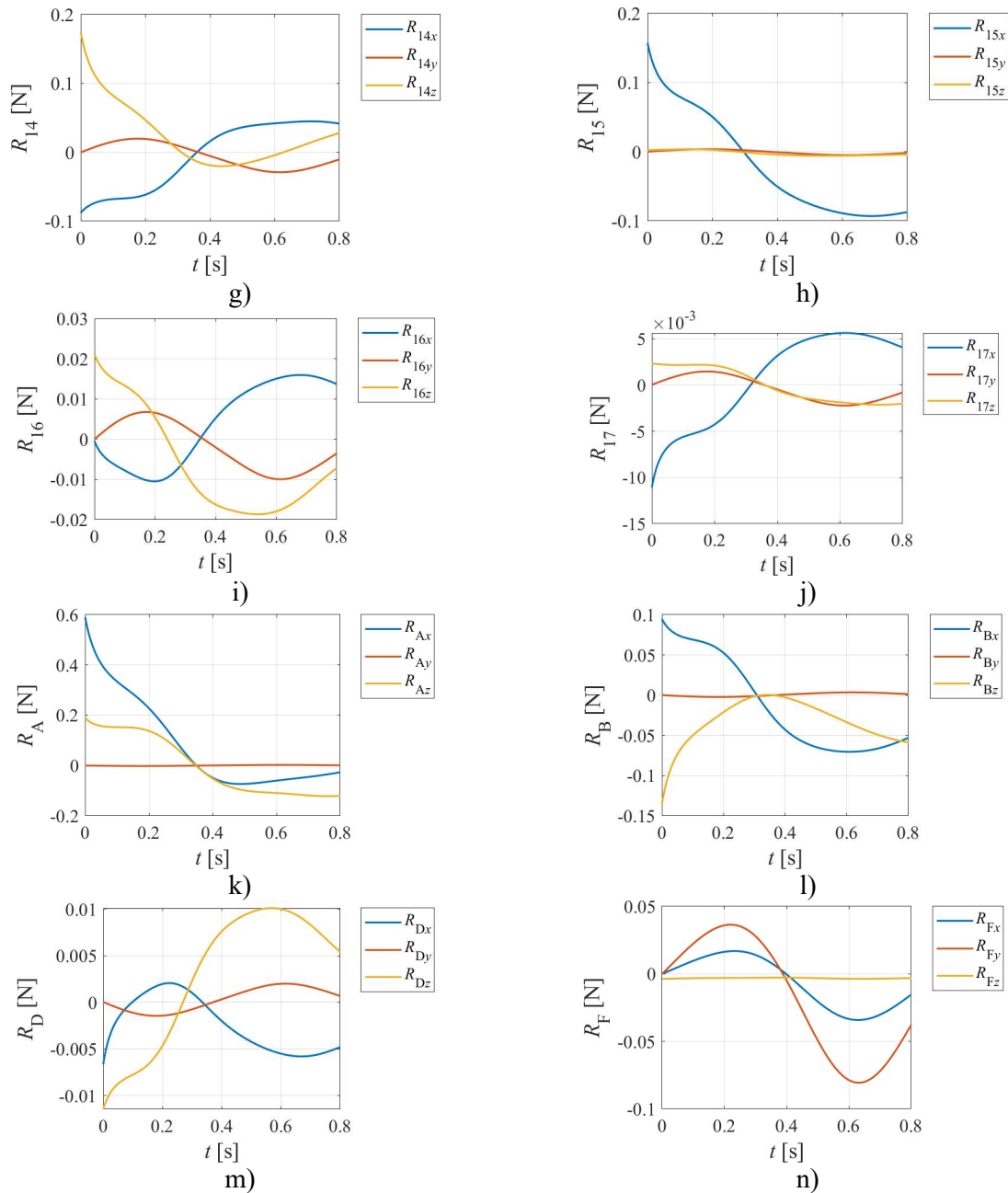
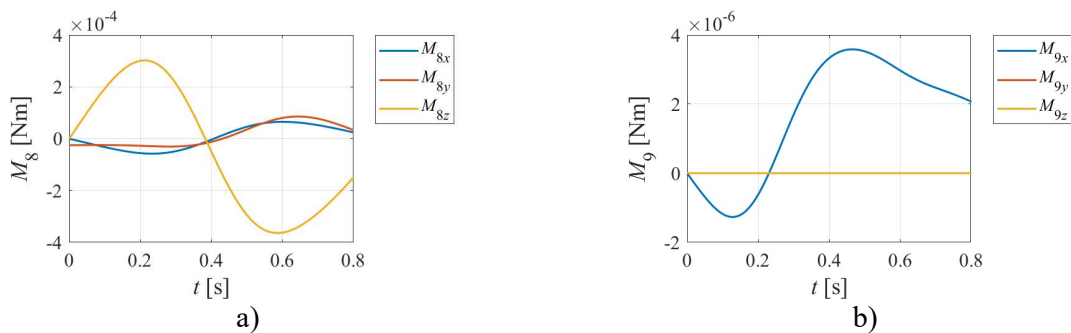
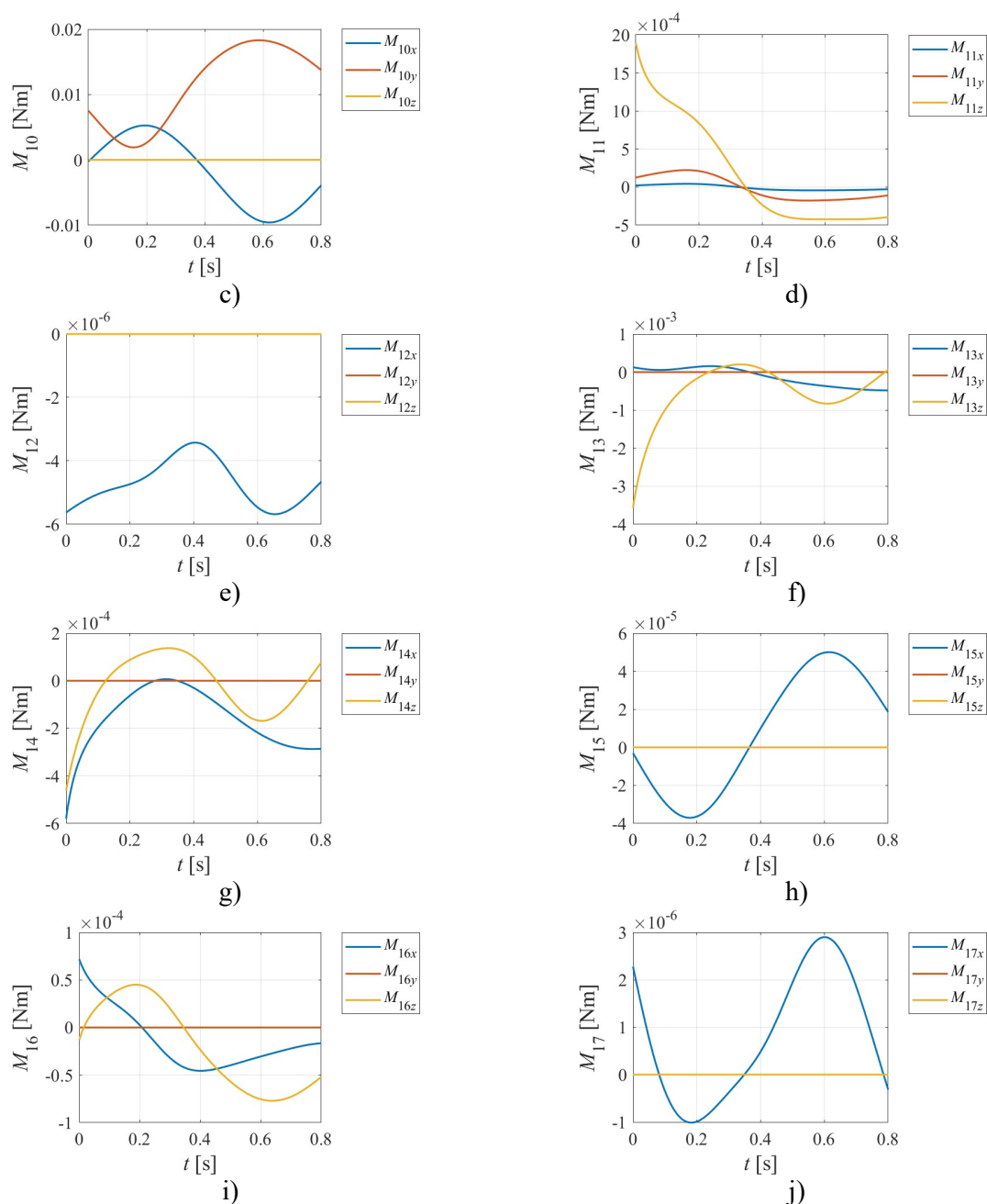


Fig. 6.15. Forțele din articulațiile degetului 1 R_8, \dots, R_{17} , R_A , R_B , R_D , R_F în sistemul de referință global



Fig. 6.16. Momentele din articulațiile degetului 1 M_8, \dots, M_{17} în sistemul de referință global

6.3.2. Studiul cu metodele mecanicii analitice

Calculând puterile virtuale ale subsistemelor $O_8, O_9, \dots, O_{17}, E$ pentru degetul 1 și $O_{11}, O_{12}, \dots, O_{17}, E$ pentru fiecare deget se pot determina direct momentul motor din corpul 8, precum și forțele motoare din corpurile 11, pentru fiecare deget, fără a mai determina toate forțele și momentele din celelalte articulații ale sistemului.

Utilizând această metodă au fost trasate forțele motoare în lungul axelor pe care are loc mișcarea corpurilor 11 (Fig. 6.17), precum și momentele motoare pentru articulațiile O_i

($i=1\dots 8$)(Fig. 6.18), comparativ cu valorile obținute în urma calculelor efectuate folosind metodele mecanicii clasice. Așa cum se poate observa, rezultatele sunt foarte apropiate ca valoare, motiv pentru care metoda analitică a fost utilizată în continuare pentru dinamica directă, datorită rapidității sale.

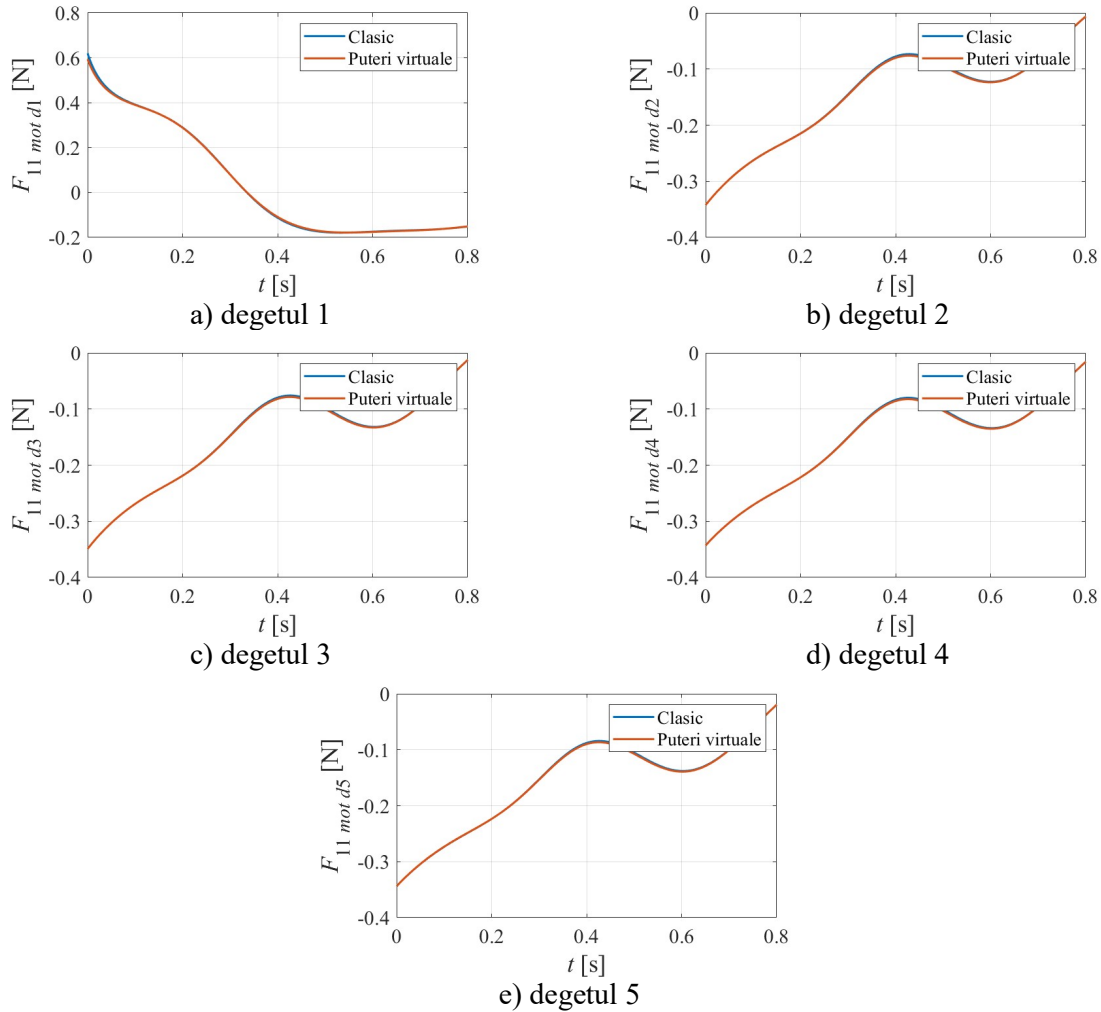
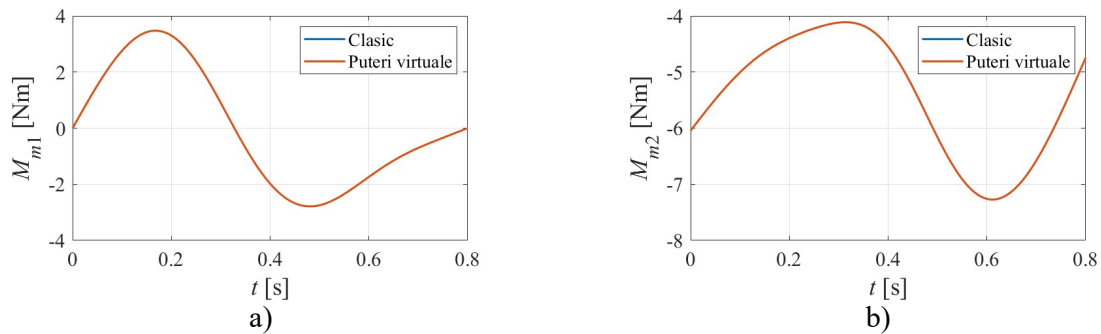


Fig. 6.17. Forțele motoare din cuplele prismatice 11



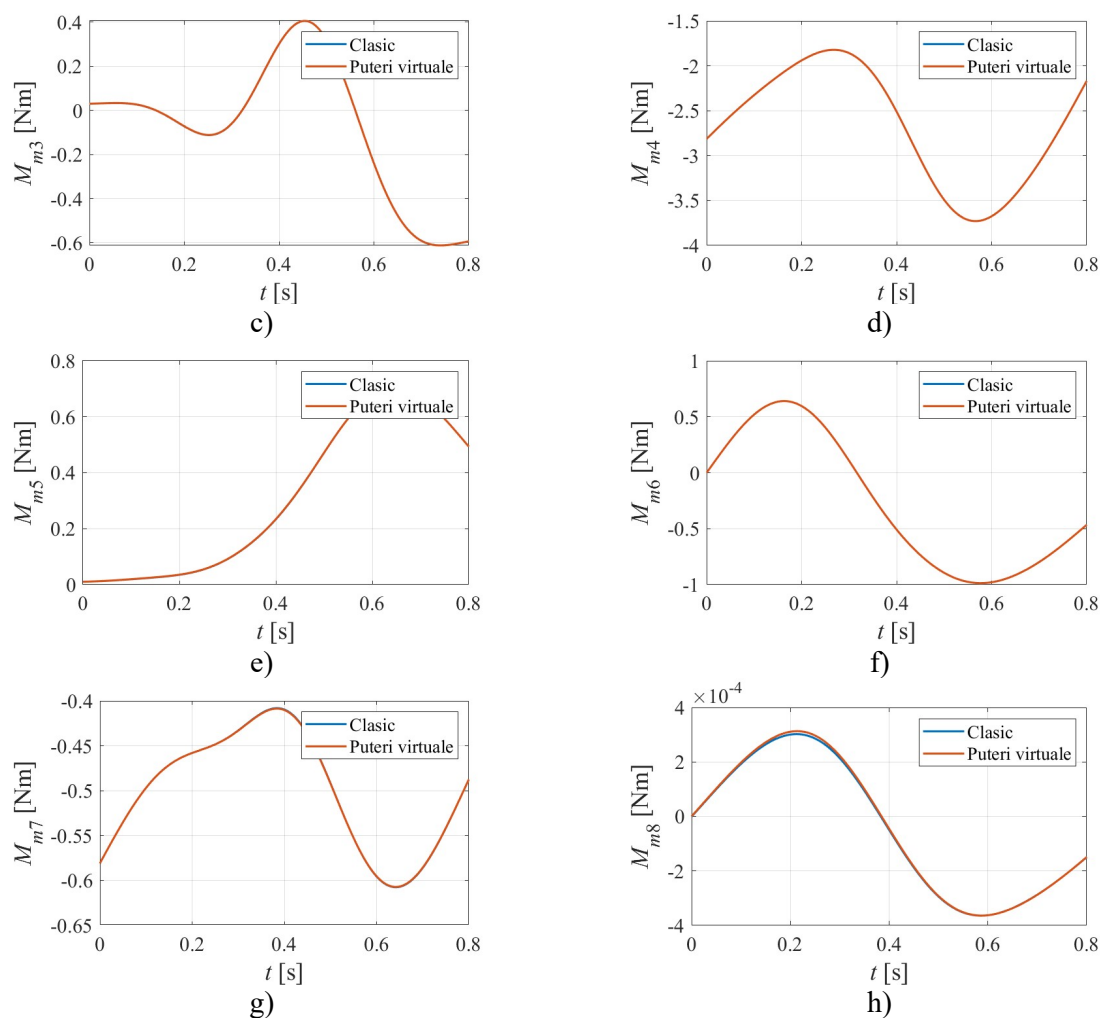


Fig. 6.18. Momentele motoare din articulațiile 1...8

6.4. Concluzii

În configurația aleasă, cuplul necesar al servomotorului din articulația 2 a sistemului este cel mai mare, ceea ce se explică prin brațele mari ale greutateilor componentelor, față de punctul O_2 . Acest rezultat conduce la necesitatea, fie a utilizării unui actuator suficient de puternic, fie a scăderii cuplului motor necesar producerii mișcării, folosind un sistem de contragreutăți sau un sistem de elemente elastice.

Cuplurile de reacțiune din articulațiile 1 și 3 sunt considerabil mai mari decât celelalte, motiv pentru care este recomandabilă realizarea unor componente mai robuste a acestor articulații.

Valorile mici ale componentelor cuplului M_8 se datorează valorilor mici ale parametrilor de inerție ai degetului 1, precum și ale brațului O_8O_9 .

Forțele și momentele motoare au fost calculate atât prin metodele mecanicii clasice, cât și prin metodele mecanicii analitice, rezultatele obținute suprapunându-se la scara reprezentării.

Verificările efectuate prin aplicarea teoremei impulsului și teoremei momentului cinetice pe subsisteme, analizând astfel toate cele 5 degete în parte, au arătat și el suprapuneri ale rezultatelor obținute.

7. Dinamica directă

În robotică, dinamica directă se ocupă cu determinarea mișcării sistemului atunci când se cunosc forțele și momentele motoare, precum și mărimile inerțiale (mase și momente de inerție).

Din punct de vedere matematic, aceasta înseamnă să se considere sistemul de ecuații obținut în capitolul 6 având drept necunoscute parametrii de comandă, precum și forțele și momentele nemotoare din legături, toate ca funcții de timp. Considerat în acest fel, sistemul este diferențial în parametrii de comandă și algebric în forțele și momentele nemotoare.

Însă, rezolvarea sistemelor de ecuații algebrodiferențiale este, în general, dificilă și laborioasă [7], [35]. În aplicația de față, o dificultate suplimentară rezultă din faptul că sistemul este neexplicitat în derivatele de ordinul al II-lea al variabilelor de comandă.

Rezolvarea problemei de față se simplifică prin utilizarea metodelor mecanicii analitice pentru determinarea forțelor motoare F_{11dx} ($d = 1, 2, \dots, 5$) și a momentului motor M_{8z} .

În cele ce urmează, se prezintă o metodă originală de rezolvare a acestui sistem, care se bazează pe observația că dependența ecuațiilor diferențiale ale mișcării de derivatele de ordinul al II-lea al variabilelor de comandă este liniară.

7.1. Aspecte teoretice

Se consideră cazul general al unui sistem oonom de puncte materiale, P_i ($i = 1, 2, \dots, n$), descris de coordonatele generalizate independente q_k ($k = 1, 2, \dots, h$).

Vectorul de poziție al punctului P_i poate fi scris în funcție de coordonatele generalizate și de timp [9], [51], [68]:

$$\bar{r}_i = \bar{r}_i(q_k, t) \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, h). \quad (7.1)$$

Rezultă viteza punctului

$$\bar{v}_i = \frac{d\bar{r}_i}{dt} = \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_h} \dot{q}_h + \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^h \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_j} \dot{q}_j + \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t}. \quad (7.2)$$

Se consideră ecuațiile lui Lagrange de speța a II-a, în cazul forțelor oarecare,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial E}{\partial q_k} = Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, h), \quad (7.3)$$

în care s-a introdus energia cinetică a sistemului,

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2, \quad (7.4)$$

precum și forța generalizată Q_k .

Înlocuind expresia (7.2) în ecuația (7.4), rezultă

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^h \sum_{l=1}^h A_{jl} \dot{q}_j \dot{q}_l + \sum_{l=1}^h B_l \dot{q}_l + \frac{1}{2} C, \quad (7.5)$$

unde coeficienții

$$A_{jl} = \sum_{i=1}^n m_i \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_j} \cdot \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_l} \quad (j, l = 1, 2, \dots, h), \quad (7.6)$$

$$B_l = \sum_{i=1}^n m_i \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial q_l} \cdot \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t} \quad (l = 1, 2, \dots, h), \quad (7.7)$$

$$C = \sum_{i=1}^n m_i \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t} \cdot \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t}, \quad (7.8)$$

depind de coordonatele generalizate q_1, q_2, \dots, q_h și de timpul t .

Rezultă

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial E}{\partial q_k} = \sum_{l=1}^h A_{kl} \ddot{q}_l + D_k \quad (k = 1, 2, \dots, h), \quad (7.9)$$

unde coeficienții

$$D_k = \sum_{l=1}^h \sum_{j=1}^h \left(\frac{\partial A_{kl}}{\partial q_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial A_{jl}}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_l + \sum_{l=1}^h \left(\frac{\partial A_{kl}}{\partial t} + \frac{\partial B_k}{\partial q_l} - \frac{\partial B_l}{\partial q_k} \right) \dot{q}_l + \frac{\partial B_k}{\partial t} - \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial q_k}, \quad (k = 1, 2, \dots, h) \quad (7.10)$$

depind de coordonatele generalizate q_1, q_2, \dots, q_h , de vitezele generalizate $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_h$ și de timpul t .

Prin urmare, ecuațiile lui Lagrange de speța a II-a (7.3) iau forma:

$$\sum_{l=1}^h A_{kl} \ddot{q}_l + D_k = Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, h). \quad (7.11)$$

Rezultă că forțele generalizate depind liniar de derivatele de ordinul II ale coordonatelor generalizate.

7.2. Explicitearea sistemului

Sistemul (7.11) se poate scrie sub forma matriceală

$$[A]\{\ddot{q}\} + \{D\} = \{Q\}, \quad (7.12)$$

unde s-au introdus matricele

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1h} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{h1} & \dots & A_{hh} \end{bmatrix}, \quad (7.13)$$

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_h \end{Bmatrix}, \quad (7.14)$$

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_h \end{Bmatrix}, \quad (7.15)$$

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_h \end{Bmatrix}. \quad (7.16)$$

Înmulțind la stânga sistemul (7.12) cu inversa matricei (7.13), rezultă forma explicitată în derivatele de ordinul II ale coordonatelor generalizate,

$$\{\ddot{q}\} + \{D'\} = \{Q'\}, \quad (7.17)$$

unde

$$\{D'\} = [A]^{-1}\{D\}, \quad (7.18)$$

$$\{Q'\} = [A]^{-1}\{Q\}. \quad (7.19)$$

Sistemul (7.17) poate scris sub forma dezvoltată

$$\ddot{q}_k = Q'_k - D'_k \quad (k = 1, 2, \dots, h). \quad (7.20)$$

Matricele (7.13), (7.15), (7.16), (7.18) și (7.19) depind de coordonatele generalizate q_k , de vitezele generalizate \dot{q}_k și de timpul t .

7.3. Integrarea sistemului explicitat

Dacă pentru valori cunoscute ale parametrilor q_k , \dot{q}_k , \ddot{q}_k și t se pot determina forțele generalizate Q_k , atunci, pentru q_k , \dot{q}_k și t date, coeficienții A_{kl} și D_k se calculează în felul următor:

1) se aleg

$$\ddot{q}_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, h), \quad (7.21)$$

și se determină Q_k ,

$$D_k = Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, h); \quad (7.22)$$

2) succesiv, pentru $l = 1, 2, \dots, h$, se aleg

$$\ddot{q}_l = 1, \ddot{q}_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, h; k \neq l), \quad (7.23)$$

și se determină Q_k , precum și

$$A_{kl} = Q_k - D_k \quad (k = 1, 2, \dots, h). \quad (7.24)$$

Cu coeficienții (7.22) și (7.24) se determină matricele (7.13), (7.18) și (7.19) cu care se construiește forma explicită (7.20) a sistemului.

Acest sistem este format din h ecuații diferențiale de ordinul II, care poate fi pus sub forma unui sistem de $2h$ ecuații de ordinul I, introducând variabilele auxiliare

$$s_k = \dot{q}_k \quad (k = 1, 2, \dots, h). \quad (7.25)$$

Cu aceste variabile, sistemul (7.20) ia forma

$$\{\dot{X}\} = [B]\{X\} + \{E\}, \quad (7.26)$$

unde

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_h \\ s_1 \\ \vdots \\ s_h \end{Bmatrix}, \quad (7.27)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ A_{11} & \cdots & A_{1h} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{h1} & \cdots & A_{hh} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (7.28)$$

$$\{E\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ Q'_1 - D'_1 \\ \vdots \\ Q'_h - D'_h \end{Bmatrix}. \quad (7.29)$$

Sistemul (7.26) poate fi integrat numeric cu metoda Runge-Kutta.

7.4. Aplicații numerice

Sistemul de ecuații diferențiale (7.26), de ordinul I, a fost integrat numeric cu ajutorul metodei Runge-Kutta, utilizând pasul de timp $\Delta t=0.00001$ s.

Pentru a verifica metoda, s-au utilizat ca date de intrare variațiile forțelor și momentelor motoare calculate în capitolul 6 și s-au comparat legile de mișcare obținute prin integrare cu cele impuse în capitolul menționat.

Integrarea numerică a sistemului de ecuații diferențiale a fost efectuată, mai întâi, cu funcția *ode45*, din programul MATLAB. În acest caz, valorile obținute au coincis într-o măsură bună cu cele impuse în capitolele 4-5 numai într-un prim subinterval, de aproximativ 30%, din intervalul de timp considerat, $t=0 \dots 0.8$ s. În ultima parte a intervalului, erorile cumulate ale metodei de integrare numerice au condus la diferențe importante.

Apoi s-au încercat succesiv funcțiile *ode23*, *ode78*, *ode89* și *ode113*, dar niciuna nu a adus îmbunătățiri semnificative.

În final, integrarea a fost efectuată cu funcția *ode45*, aplicată succesiv pe 4000 de subintervale $t=t_i \dots t_i + 2 \cdot 10^{-4}$ s ale intervalului considerat, $t=0 \dots 0.8$ s. În acest caz precizia a crescut considerabil, valorile obținute coincidând în măsură foarte bună cu cele impuse în capitolul 6 pe cea mai mare parte a intervalului de timp considerat (aproximativ 88%).

Astfel, s-au obținut variațiile parametrilor de comandă (φ_{0-1} , θ_{1-2} , φ_{2-3} , θ_{3-4} , φ_{4-5} , ψ_{5-6} , θ_{6-7} , ψ_{7-8} , s_1 , s_2 , s_3 , s_4 și s_5), precum și primele două derivate ale acestora ilustrate în figurile 7.1-7.13, suprapuse peste cele impuse în capitolele 4-5.

O creștere suplimentară a preciziei se poate obține reducând pasul de timp, dar timpul de execuție se lungeste considerabil.

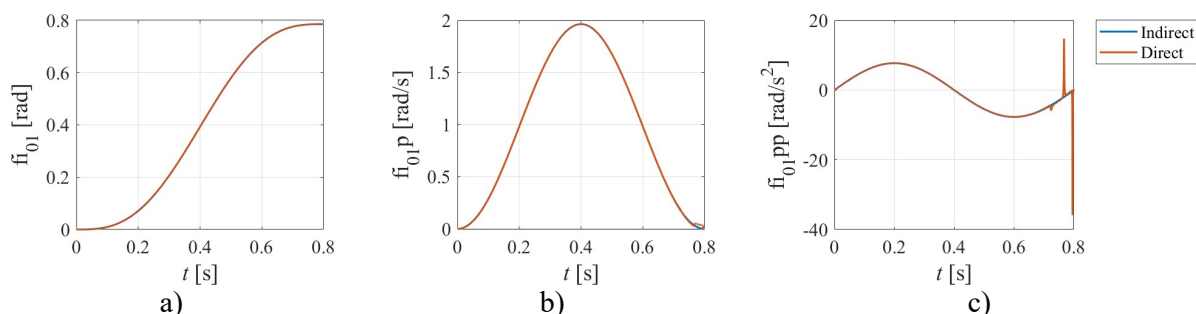


Fig. 7.1. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acesteia pentru servomotorul 1

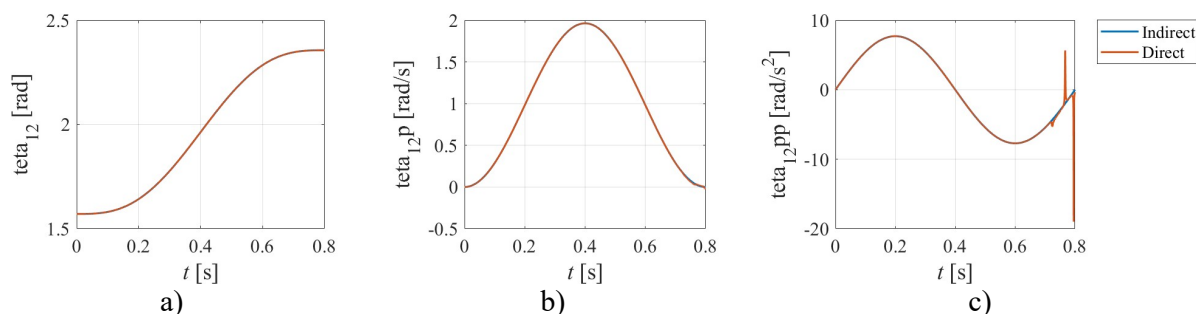


Fig. 7.2. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acesteia pentru servomotorul 2

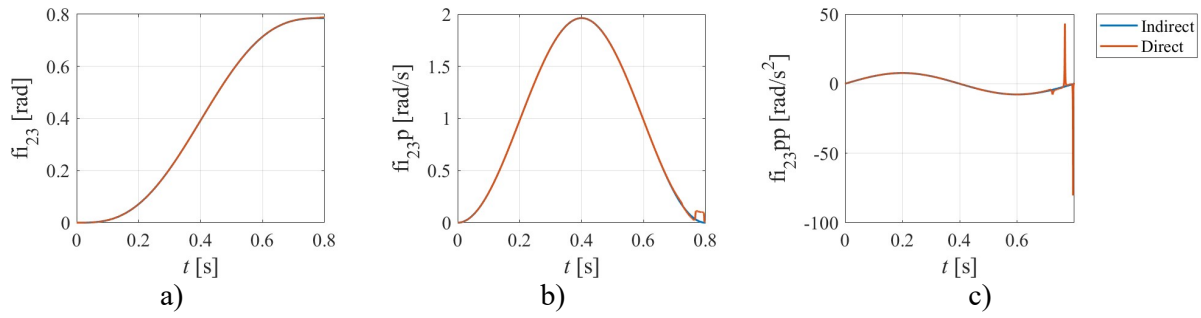


Fig. 7.3. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru servomotorul 3

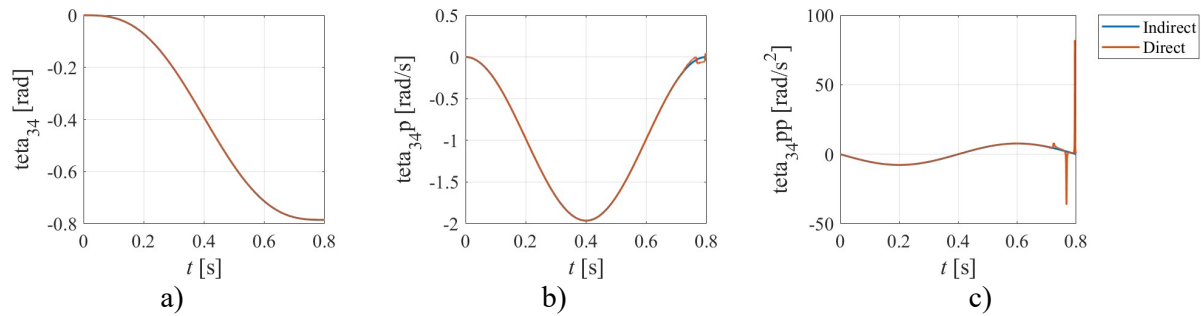


Fig. 7.4. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru servomotorul 4

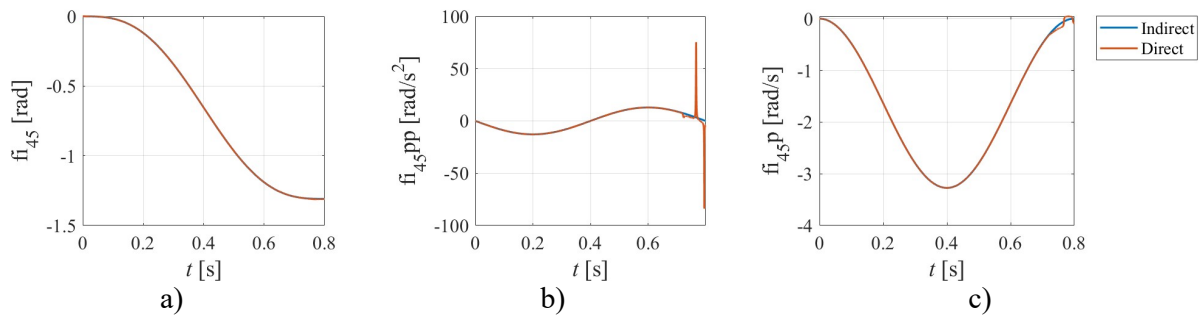


Fig. 7.5. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru servomotorul 5

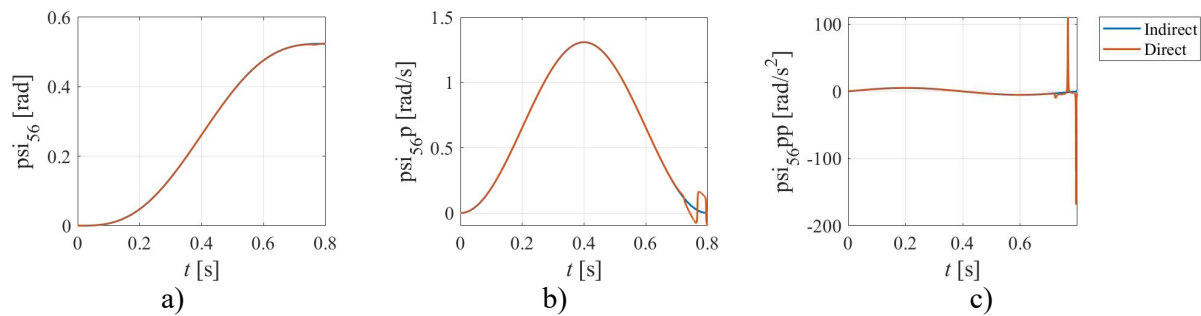


Fig. 7.6. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru servomotorul 6

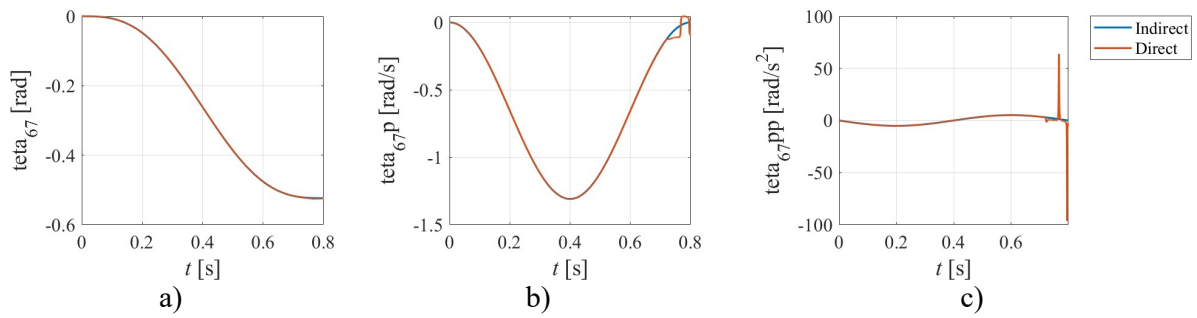


Fig. 7.7. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru servomotorul 7

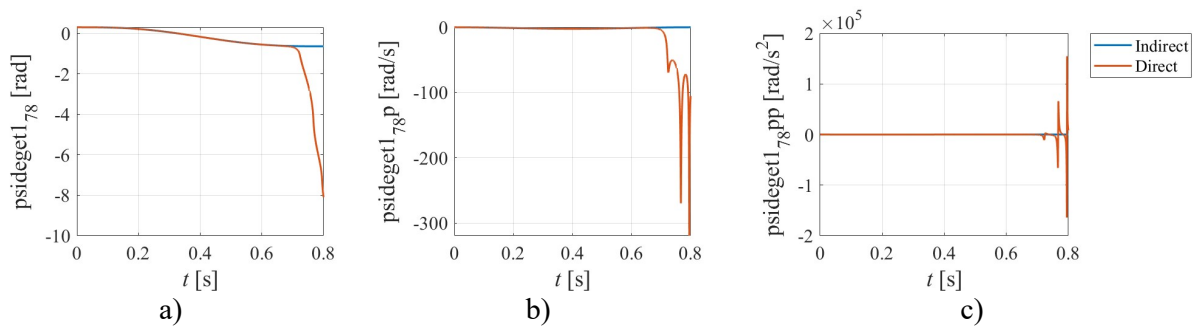


Fig. 7.8. Deplasarea unghiulară și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru servomotorul 8

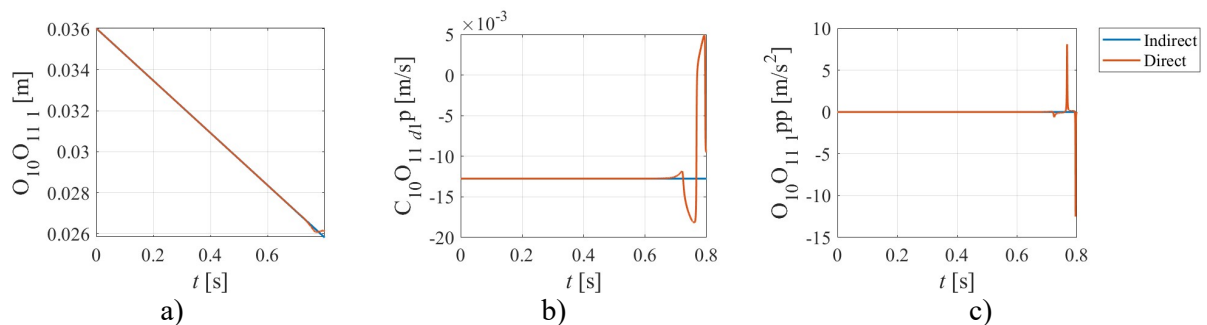


Fig. 7.9. Deplasarea și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru actuatorul liniar 1

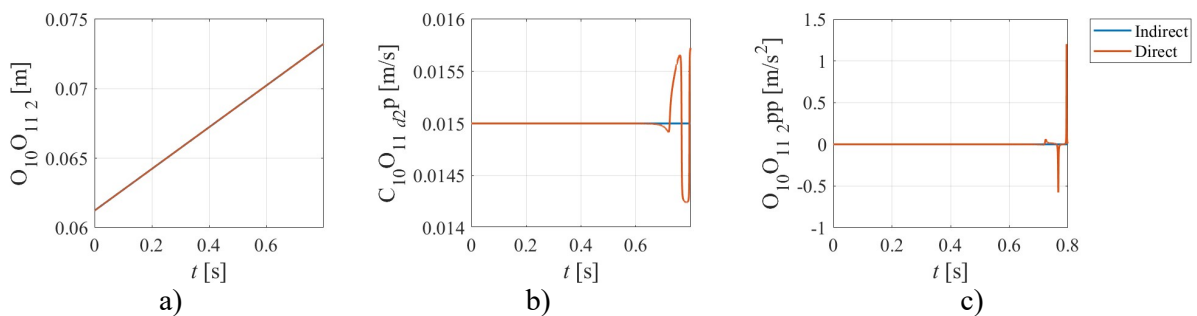


Fig. 7.10. Deplasarea și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru actuatorul liniar 2

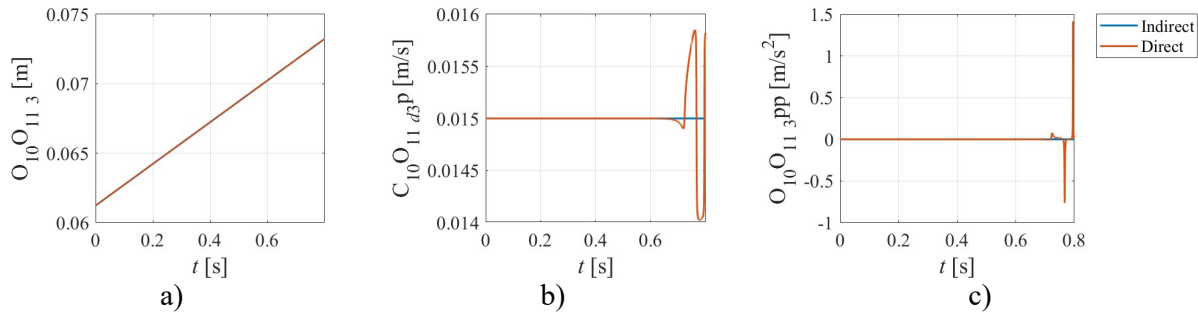


Fig. 7.11. Deplasarea și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru actuatorul liniar 3

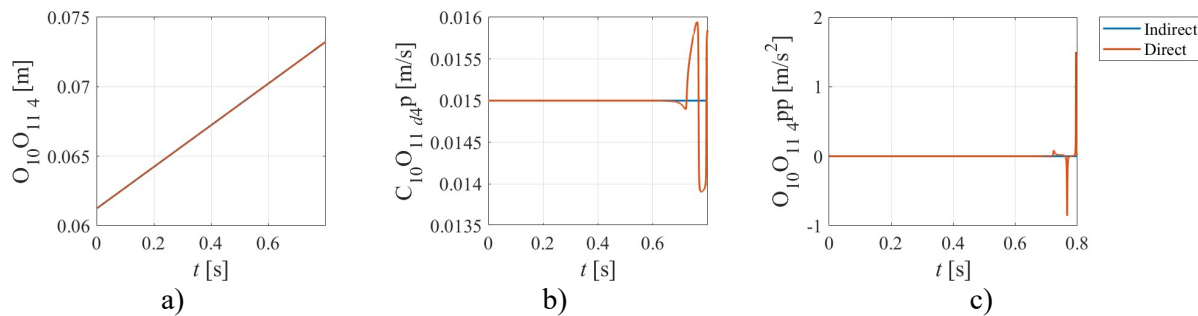


Fig. 7.12. Deplasarea și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru actuatorul liniar 4

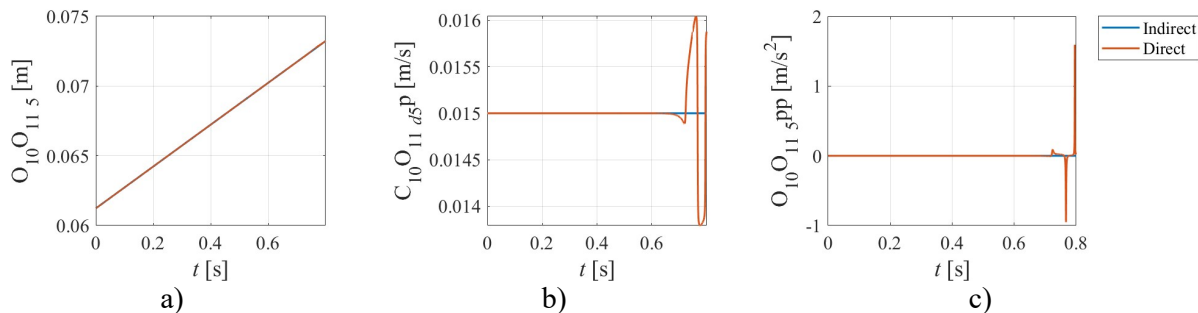


Fig. 7.13. Deplasarea și prima respectiv a doua derivată a acestei pentru actuatorul liniar 5

7.5. Concluzii

Valorile deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor actuatorilor liniare care acționează fiecare deget în parte, precum și deplasările unghiulare, și primele două derivate ale acestora, obținute în cazul dinamicii directe, coincid în bună măsură cu valorile date ca parametrii de intrare pentru calculul forțelor și momentelor din articulații în cazul dinamicii inverse. Această suprapunere a rezultatelor confirmă corectitudinea metodei de rezolvare numerică a ecuațiilor diferențiale ale mișcării sistemului robotic mână-braț, prezentată în acest capitol.

Erorile apărute în ultima optime a intervalului de timp în care are loc mișcarea, se datorează metodei numerice de integrare. O diminuare a acestor erori se poate realiza alegând un pas de timp mai mic, ceea ce, însă, mărește considerabil timpul de execuție.

8. Vibrații

Funcționalitatea prehensorului antropomorfic prezentat în capitolul 3 poate fi afectată de vibrațiile apărute în urma diferitelor interacțiuni mecanice din sistemul robotic mână-braț, sau din cauza unor factori externi, în funcție de condițiile de operare.

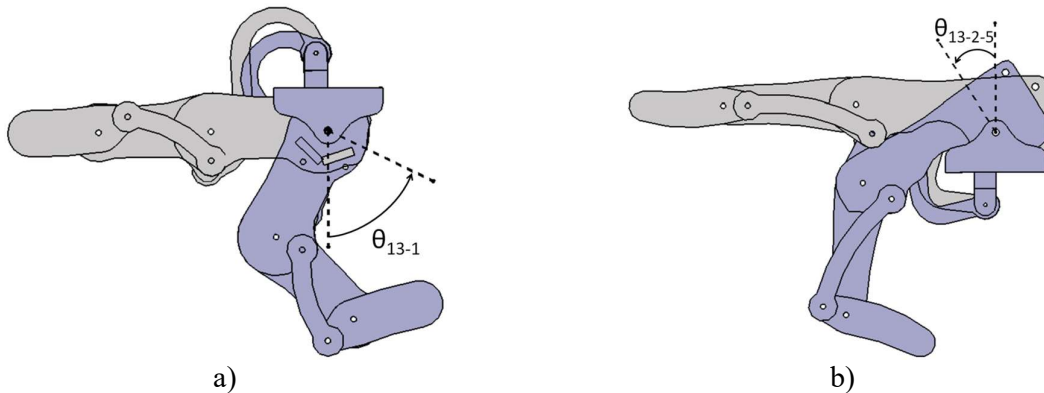
S-au considerat două tipuri de studii:

1. numeric, al degetelor modelate 3D ca sisteme de solide elastice, legate rigid;
2. experimental, al degetului 1, realizat cu articulații reale.

8.1. Studiul numeric

Au fost analizate cu ajutorul metodei elementelor finite din CATIA V5, vibrațiile libere, neamortizate ale următoarelor subsisteme:

- 1) degetul mare (degetul 1), considerat ca un sistem rigid separat (fig. 8.1.a),
- 2) unul dintre degetele 2-5, considerat ca un sistem rigid separat (fig. 8.1.b),
- 3) mâna, considerând că degetele, considerate rigide, sunt fixate rigid pe palmă.



4) Fig. 8.1. Degetele extinse (gri deschis), respectiv flexate (gri închis) [16]

Fiecare dintre cele trei cazuri prezentate a fost studiat pentru două configurații (fig. 8.1) definite de unghiul θ_{13-1} pentru degetul mare, respectiv de unghiurile și θ_{13-2-5} pentru celelalte degete:

- deget extins (culoare gri deschis) - $\theta_{13-1}=0^\circ$, $\theta_{13-2-5}=0^\circ$,
- deget flexat (culoare gri închis) - $\theta_{13-1}=64^\circ$, $\theta_{13-2-5}=32^\circ$.

Suplimentar, au fost determinate și frecvențele proprii ale degetelor, considerate ca sisteme separate, în șapte configurații intermediare între cele două de mai sus, cu pașii $\Delta\theta_{13-1}=8^\circ$ (tab. 8.1) respectiv $\Delta\theta_{13-2-5}=4^\circ$ (tab. 8.2), precum și a sistemului mâinii cu degetele întinse și flexate (tab. 8.3).

Variațiile cu unghiurile de flexare θ_{13-1} , respectiv θ_{13-2-5} , ale primelor două frecvențe proprii ale degetului 1, respectiv ale unuia dintre celelalte degete, considerate ca sisteme independente, sunt reprezentate în figura 8.2.

Valorile primelor două frecvențe proprii sunt mai mari pentru degetul 1, decât pentru celelalte degete. Acest lucru se datorează dimensiunilor mai mici ale degetului 1, față de degetele 2-5. Această observație nu este însă valabilă și pentru moduri proprii superioare, ceea ce se explică prin forma diferită a degetelor.

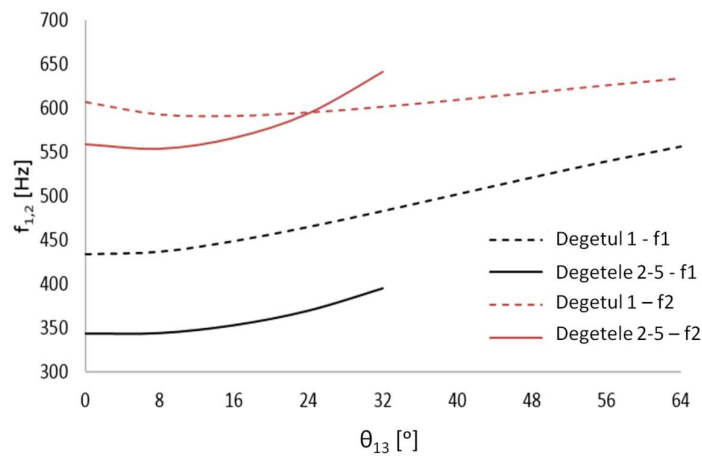


Fig. 8.2. Variația primelor două frecvențe proprii față de unghiul θ [16]

Primul mod propriu de vibrație al degetului 1 (fig. 8.3), precum și al degetelor 2-5 (fig. 8.4), este de încovoiere într-un plan paralel cu cel al plăcii, în care, flexibilitatea corpului este mai mare.

Al doilea mod propriu de vibrație al degetului 1 (fig. 8.5), precum și al degetelor 2-5 (fig. 8.6), este de încovoiere într-un plan perpendicular pe cel al plăcii.

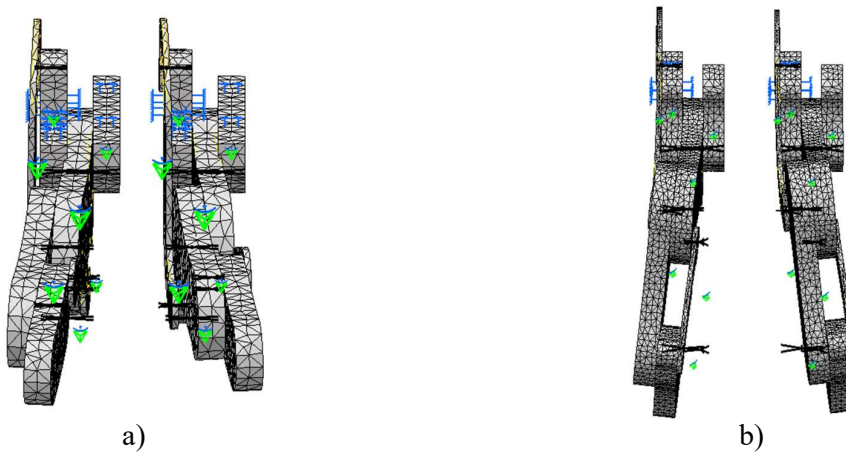


Fig. 8.3. Primul mod de vibrație al degetului 1: a) extins b) flexat [16]

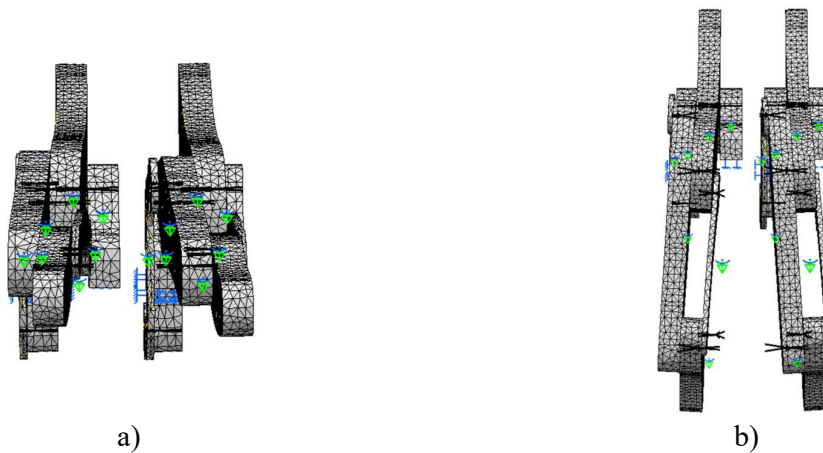


Fig. 8.4. Primul mod de vibrație al degetelor 2-5: a) extins b) flexat [16]

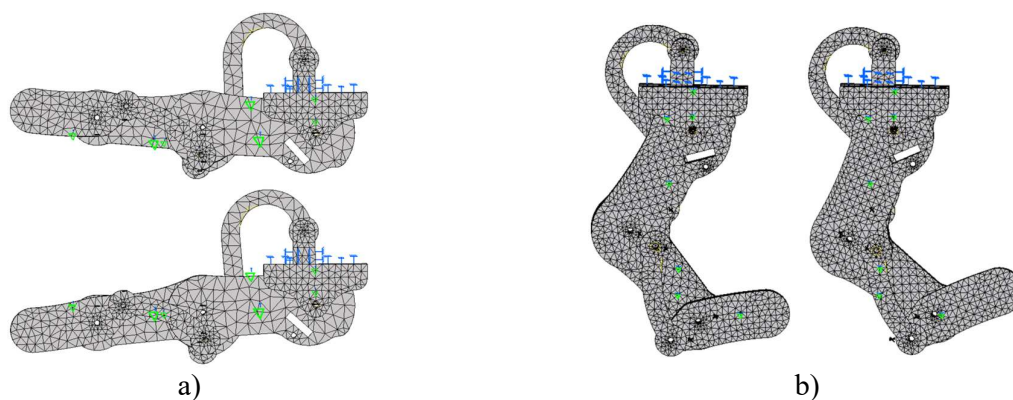


Fig. 8.5. Al doilea mod de vibrație al degetului 1: a) extins b) flexat [16]

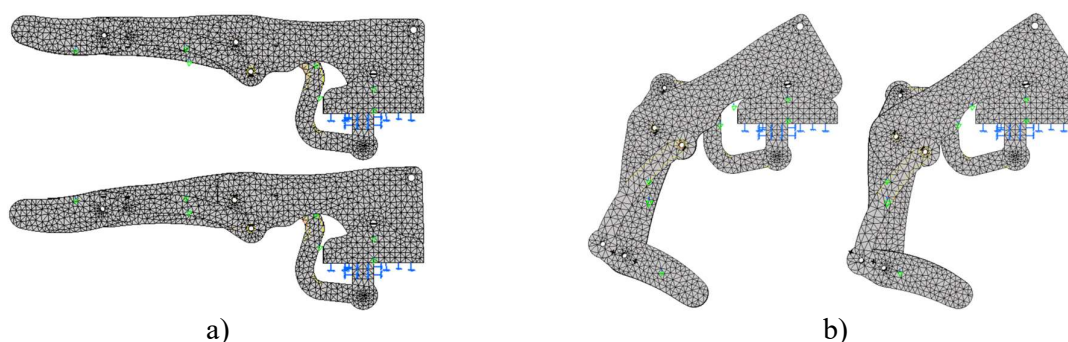


Fig. 8.6. Al doilea mod de vibrație al degetelor 2-5: a) extins b) flexat [16]

8.2. Studiul experimental

Determinările experimentale au fost realizate cu ajutorul vibrometrului laser format din controlerul Polytec OFV-5000 (fig. 8.33) și capul laser Polytec OFV-505 (fig. 8.34).



Fig. 8.33. Controler



Fig. 8.34. Cap laser

Vibrometrul laser măsoară viteza relativă de vibrație a corpului asupra căruia este îndreptat fascicolul laser (fig. 8.35).

Degetul mare al mâinii, împreună cu actuatorul liniar atașat acestuia, au fost fixate în consolă pe un suport realizat prin printare 3D (fig. 8.36).



Fig. 8.35. Capul laser îndreptat către unul dintre degetele mâinii



Fig. 8.36. Ansamblul degetului 1, a actuatorului liniar corespunzător și a suportului

Au fost făcute reglaje pentru măsurarea frecvențelor joase, iar ca trigger s-a utilizat amplitudinea semnalului de ieșire, prin lovirea ușoară a sistemului în diferite locații ale acestuia (fig. 8.37).

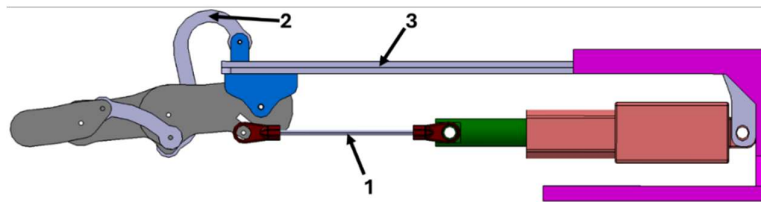
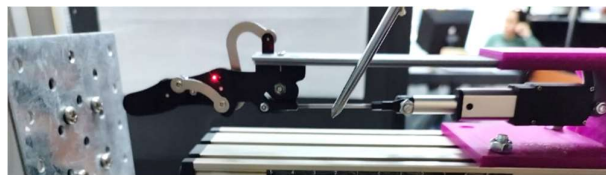


Fig. 8.37. Locațiile teoretice unde s-a dorit lovirea sistemul



a)



b)



c)

Fig. 8.38. Locațiile reale unde a fost lovit sistemul pentru a se începe măsurarea vibrațiilor

Măsurătorile au fost efectuate de cinci ori pentru fiecare locație a loviturii (fig. 8.38 a-c), pe o durată de 10s, cu o frecvență de eșantionare de 1000 Hz.

Analiza semnalului a fost efectuată utilizând transformata Fourier rapidă, care calculează transformata Fourier discretă a semnalului, obținându-se astfel prima frecvență proprie în intervalul 0...500Hz.

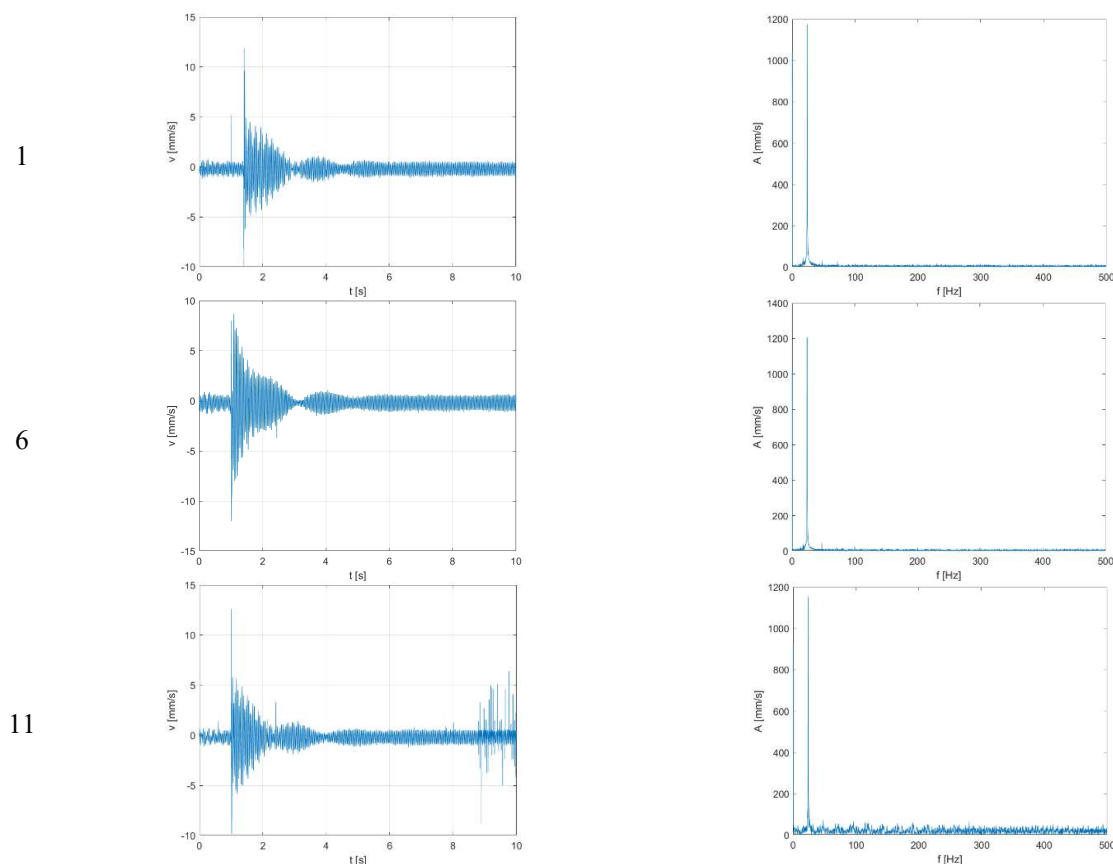


Fig. 8.39. Semnalul și spectrul corespunzător

Astfel s-au obținut semnalele din figura 8.39 și spectrele corespunzătoare, fiind prezentate doar 3 măsurători. Toate spectrele prezintă maxime accentuate la frecvența de 24.2 Hz.

8.3. Concluzii

Modelul considerat în studiul numeric diferă semnificativ de sistemul real, în care elementele sunt articulate. Flexibilitatea mare a articulațiilor în raport cu cea a corpurilor componente are drept efect valori mai mici ale frecvențelor proprii.

Studiile prezente în acest capitol reprezintă doar o etapă de inițiere a unor studii mai precise și mai complete, care ar putea face subiectul unor dezvoltări ulterioare.

9. Considerații finale

9.1. Concluzii finale

Dispozitivul de prehensiune folosit este un mecanism cu un număr redus de mobilități, comparativ cu cel al unei mâini umane, ceea ce îl face mai ieftin, mai ușor și mai ușor de construit decât un model mai realist.

Pentru a îmbunătăți funcționalitatea mâinii comerciale existente, utilizată ca punct de pornire a prezentei teze de doctorat, a fost introdusă o mobilitate suplimentară a degetului mare, de rotație a acestuia în jurul unei axe perpendiculare pe planul palmei. Suplimentar, s-a proiectat un braț antropomorfic, care, împreună cu mâna, formează un sistem robotic mână-braț.

Datorită simplității și dimensiunilor relativ mici, cele mai multe părți ale dispozitivului pot fi fabricate prin imprimare 3D. Alte părți sunt realizate direct din semifabricate disponibile comercial. Această strategie de proiectare permite cu ușurință aducerea unor îmbunătățiri ulterioare ale sistemului.

Studiul prezintă o analiză cinematică, o analiză dinamică indirectă, precum și una dinamică directă a sistemului robotic mână-braț.

Mișcarea sistemului robotic mână-braț a fost vizualizată printr-o reprezentare grafică animată a punctelor semnificative ale acestuia, realizată cu ajutorul programului elaborat pentru determinarea calculelor cinematice și dinamice.

S-au efectuat mai multe seturi de verificări ale calculelor cinematice:

1. vitezele unghiulare ale copurilor componente determinate analitic au fost verificate cu ajutorul relațiilor lui Poisson, în care versorii \bar{i} , \bar{j} și \bar{k} au fost derivați numeric;
2. vitezele punctelor semnificative determinate analitic au fost comparate cu valorile obținute prin derivarea numerică a vectorilor de poziție;
3. accelerațiile unghiulare ale copurilor componente determinate analitic au fost comparate cu valorile obținute prin derivarea numerică a vitezelor unghiulare;
4. accelerațiile punctelor semnificative determinate analitic au fost comparate cu valorile obținute prin derivarea numerică a vitezelor.

În toate cele patru seturi de verificări, rezultatele obținute prin cele două metode sunt în foarte bună concordanță.

În configurația aleasă, cuplul necesar al servomotorului din articulația 2 a sistemului este cel mai mare, ceea ce se explică prin brațele mari ale greutateților componentelor, față de punctul O_2 . Acest rezultat conduce la necesitatea, fie a utilizării unui actuator suficient de puternic, fie a scăderii cuplului motor necesar producerii mișcării, folosind un sistem de contragreutăți sau un sistem de elemente elastice.

Cuplurile de reacțiune din articulațiile 1 și 3 sunt considerabil mai mari decât celelalte, motiv pentru care este recomandabilă realizarea unor componente mai robuste a acestor articulații.

Valorile mici ale componentelor cuplului M_8 se datorează valorilor mici ale parametrilor de inerție ai degetului 1, precum și ale brațului O_8O_9 .

Rezultatele oferă date de calcul utile pentru proiectarea de bază a unui sistem robotizat mână-braț, precum și pentru un proces de optimizare.

Forțele și momentele motoare (forțele necesare pentru motoarele liniare ale degetelor și momentele necesare pentru servomotoarele din articulațiile care oferă grade de mobilitate sistemului) au fost calculate prin două metode:

- cu ajutorul metodelor mecanicii clasice, izolând toate cele 55 de corpuri ale sistemului și folosind teorema impulsului și teorema momentului cinetic în raport cu centrul de masă pentru fiecare corp în parte;

- cu ajutorul metodelor mecanicii analitice, folosind principiul lui D'Alambert și principiul puterilor virtuale.

Rezultatele obținute prin cele două metode sunt în foarte bună concordanță.

O altă metodă de verificare a constat în aplicarea teoremei impulsului și teoremei momentului cinetice pe subsisteme, fiind analizate astfel toate cele 5 degete în parte. Și în acest caz, rezultatele au coincis cu precizie foarte bună.

Valorile deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor actuatorilor liniare care acționează fiecare deget în parte, precum și deplasările unghiulare, și primele două derivate ale acestora, obținute în cazul dinamicii directe, coincid în bună măsură cu valorile date ca parametri de intrare pentru calculul forțelor și momentelor din articulații în cazul dinamicii inverse. Această suprapunere a rezultatelor confirmă corectitudinea metodei de rezolvare numerică a ecuațiilor diferențiale ale mișcării sistemului robotic mână-braț.

Erorile apărute în ultima optime a intervalului de timp în care are loc mișcarea, se datorează metodei numerice de integrare. O diminuare a acestor erori se poate realiza alegând un pas de timp mai mic, ceea ce, însă, mărește considerabil timpul de execuție.

9.2. Contribuții originale

Lucrarea aduce un număr de contribuții originale privind studiul sistemelor robotice antropomorfe mână-braț. Acestea sunt trecute în revistă în cele ce urmează.

S-a conceput și realizat modelul 3D al unui braț robotic antropomorf, astfel încât acesta să poată fi realizat în principal din semifabricate.

Articulațiile brațului robotic au fost proiectate astfel încât să poată fi realizate prin printare cu ajutorul unei imprimante 3D.

Conceptul general din spatele design-ului brațului robotic a fost dezvoltat astfel încât robotul să fie modular, fiind posibilă adăugarea de piese noi în vederea îmbunătățirii performanțelor sistemului.

S-au modificat mijloacele de acționare ale prehensurului antropomorf studiat, pentru reducerea dimensiunilor și greutatea acestuia și i s-a adăugat un nou grad de mobilitate în vederea realizării unor mișcări mai complexe și îmbunătățirii capacității de a manipula obiecte deja apucate de către acesta.

Legăturile dintre corpurile componente ale mâinii robotice au fost modelate astfel încât să se evite atât subconstrângerea, cât și supraconstrângerea sistemului mecanic, prin urmare astfel încât sistemul de ecuații dinamice ce calculează forțele și momentele din legături să fie compatibil și determinat.

S-a realizat o analiză cinematică completă, prin determinarea ecuațiilor de mișcare, a vitezelor și accelerațiilor tuturor punctelor sistemului, precum și a vitezelor și accelerațiilor unghiulare ale corpurilor ce compun robotul.

S-a realizat analiza dinamică inversă, atât utilizând teoremele generale ale mecanicii clasice, cât și prin metodele mecanicii analitice, pentru determinarea forțelor și momentelor din legăturile sistemului, atunci când mișcarea este impusă. O parte dintre aceste forțe și momente sunt motoare, iar altele sunt reacțiuni. Forțele și momentele motoare sunt necesare pentru alegerea actuatorilor, iar cele de reacțiune sunt utilizate pentru dimensionarea elementelor sistemului.

Analiza dinamică directă a sistemului a fost efectuată printr-o metodă originală, bazată pe observația că ecuațiile diferențiale ale mișcării unui sistem mecanic oarecare depind liniar de derivatele de ordinul al doilea ale coordonatelor generalizate. Această analiză a fost verificată prin utilizarea rezultatelor obținute în urma analizei dinamice inverse și stă la baza determinării mișcării

sistemului mână-braț în orice altă configurație, precum și sub acțiunea oricărui alt sistem de forțe și momente motoare.

S-a realizat o analiză numerică a vibrațiilor degetelor modelate 3D ca sisteme de solide elastice, legate rigid. Analiza a fost efectuată cu metoda elementelor finite, din programul de proiectare, utilizat și pentru conceperea elementelor brațului și mâinii, CATIA V5. S-au determinat primele zece moduri proprii de vibrație ale degetelor sistemului de prehensiune precum și ale sistemului cu degetele atașate rigid palmei prehsorului, în configurații diferite. Studiul reprezintă o etapă preliminară, în vederea determinării eventualelor frecvențe proprii dăunătoare.

S-a realizat un studiu experimental, în vederea determinării valorilor reale ale primei frecvențe proprii a degetului 1, utilizând un sistem de achiziție de la distanță a vitezei de vibrație. Datele experimentale au fost prelucrate cu transformata Fourier rapidă, obținând-se spectrul corespunzător. Analiza acestuia a permis determinarea frecvenței proprii fundamentale a degetului studiat.

9.3. Direcții de dezvoltare

Studiile prezentate în lucrarea de față pot fi continuate cu o gamă largă de direcții de dezvoltare.

O primă direcție constă în extinderea analizei cinemati și a celei dinamice inverse pentru alte legi de variație a parametrilor de comandă ai sistemului robotic prezentat.

O a doua direcție constă în determinarea unor mișcări optime din punctul de vedere al consumului de energie și al timpului de execuție.

Se pot studia și alte sisteme, utilizând atât cunoștințele dobândite, cât și programele de calcul realizate în cadrul acestei lucrări.

O altă direcție de interes constă în implementarea unor algoritmi pe baza de inteligență artificială, în vederea realizării unor sarcini complexe.

Modelul prezentat poate fi realizat practic, cu costuri reduse, utilizând procesul de printare 3D.

De asemenea, se pot aduce îmbunătățiri succesive sistemului, prin adăugarea unor contragreutăți sau a unor elemente elastice, care să reducă momentele motoare necesare, astfel încât sistemul mână-braț să devină mai ușor și mai eficient.

Bibliografie

1. Abdel-Malek, et al., *Towards a new generation of virtual humans*, International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, vol. 1(1), pp. 2-39, 2006.
2. Abondance, S., Teeple, C. B., și Wood, R. J., *A dexterous soft robotic hand for delicate in-hand manipulation*, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5(4), pp. 5502-5509, 2020.
3. Angeles J., *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms, Second Edition*, Editura Springer, Germania, 2002.
4. Bishop, R. H., (Editor), *The Mechatronic Handbook*, CRC Press Inc., Boca Raton, 2002.
5. Buondonno, G. și De Luca, Al., *A recursive Newton-Euler algorithm for robots with elastic joints and its application to control*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 5526-5532, 2015.
6. Burger, M., Gerdt, M., *DAE aspects in vehicle dynamics and mobile robotics*, Campbell, S., Ilchmann, A., Mehrmann, V., Reis, T. (eds.) Applications of Differential-Algebraic Equations: Examples and Benchmarks. Differential-Algebraic Equations Forum. Springer, Cham, 2018.
7. Campbell, St., Lihn, V.H. și Petzold, L. Differential-algebraic equations. Scholarpedia, vol. 3(8), 2008., doi:10.4249/scholarpedia.2849.
8. Choi, D., Lee, D.-W., Shon, W. și Lee, H.-G., *Design of 5 D.O.F Robot Hand with an Artificial Skin for an Android Robot*, The Future of Humanoid Robots - Research and Applications, InTech, Rijeka, Croatia, pp. 81-96, 2012.
9. Craifaleanu, A., *Mecanica*, Editura MATRIXROM, București, 2021.
10. Cutkosky, M., *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5(3), pp. 269-279, 1989.
11. Daoud, N., Gazeau, J.P., Zeqhloul, S., Arsicault, M., *A real-time strategy for dexterous manipulation: Fingertips motion planning, force sensing and grasp stability*, Journal of Robotics and Autonomous Systems, vol. 60(2), pp. 377-386, 2012.
12. Deimel, R. și Brock, O., *A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping*, The International Journal of Robotics Research, vol. 35(1-3), pp. 161-185, 2015.
13. Dragoș, L., *Principiile mecanicii analitice*, Ed. tehnică, București, 1976.
14. Dumitru, Șt., Craifaleanu, A., *Kinematic and dynamic analysis of an anthropomorphic hand-arm system*, U.P.B. Sci. Bull., Series D, vol. 85(4), pp. 27-42, 2023.
15. Dumitru, Șt., Craifaleanu, A., *Kinematic Model of an Anthropomorphic Robotic Arm*, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, vol. 20(1), pp. 55-60, 2022.
16. Dumitru, Șt., Craifaleanu, A. și Petre R.A., *Vibratory analysis of a robotic hand*, Herisanu, N., Marinca, V. (eds) Acoustics and Vibration of Mechanical Structures – AVMS-2021, Springer Proceedings in Physics, vol. 274., Springer, Cham, pp. 213-221, 2022.
17. Farman, M., Al-Shaibah, M., Aoraiath, Z., și Jarrar, F., *Design of a three degrees of freedom robotic arm*, International Journal of Computer Applications, vol. 179(37), pp. 12-17, 2018.
18. Ferrolho, H., Ivan, V., Merkt, W., Havoutis, I., și Vijayakumar, S., *Inverse dynamics vs. forward dynamics in direct transcription formulations for trajectory optimization*, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, pp. 12752-12758, 2021.
19. Gasparetto, A., Scalera, L., *A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century*. Advances in Historical Studies, 8, Scientific Research Publishing, pp. 24-35, 2019.
20. Gonçalves, F., et al., *Dynamic Modeling of a Human-Inspired Robot Based on a Newton-Euler Approach*, Kecskeméthy, A., Parenti-Castelli, V. (eds) ROMANSY 24 - Robot Design, Dynamics and Control, ROMANSY 2022, CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol. 606. Springer, Cham, pp. 79-90, 2022.
21. Hesse, S., Monkman, G. J., Steinmann, R., Schunk, H., *Robotergreifer: Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greiftechnik*, Hanser Verlag, München, 2007.
22. Hofer, M., și D'Andrea, R., *Design, fabrication, modeling and control of a fabric-based spherical robotic arm*, Mechatronics, vol. 68, 2020.
23. Ionescu, M., Borcoși, I., Gilcă, Gh. și Bizdoacă, N.G., *Description and control of a Lobot uHand STM 32 structure*, Annals of the „Constantin Brancusi” University of Târgu Jiu, Engineering Series, vol. 1, Târgu Jiu, pp. 14-19, 2019.
24. Ionescu, M., Gilcă, Gh., Borcoși, I., Besnea (Petcu), F.L., Cismaru, S.I. și Bizdoacă, N.G., *The Simulation of positioning of a Lobot uHand STM32 structure*, 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, pp. 1-6, 2019.
25. Iqbal, J., Islam, R. U., și Khan, H., *Modeling and analysis of a 6 DOF robotic arm manipulator*, Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, vol. 3(6), pp. 300-306, 2012.
26. Jones, L. A. și Lederman, S. J., *Human hand function*, Oxford university press, 2006.

27. Kang, B., Chu, J., Mills, J. K., *Design of High Speed Planar Parallel Manipulator and Multiple Simultaneous Specification Control*, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2723-2728, 2001.
28. Kawasaki, H., Komatsu, T., Uchiyama, K. și Kurimoto, T., *Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II*, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics Proceedings, vol. 2, pp. 782-787, 1999.
29. Kivell, T. L., Baraki, N., Lockwood, V., Williams-Hatala, E. M., și Wood, B. A., *Form, function and evolution of the human hand*, American Journal of Biological Anthropology, vol. 181, pp. 6-57, 2023.
30. Kocin, N. E., *Calcul vectorial și introducerea în calculul tensorial*, Ed. tehnică, București, 1954.
31. Küçük S. (Editor), *Serial and Parallel Robot Manipulators – Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, InTech: Rijeka, Croatia, 2012.
32. Kurfess, T. R., (Editor), *Robotics and Automation Handbook*, CRC Press Inc., Boca Raton, 2005.
33. Kurosh, A., *Higher Algebra*, Mir Publishers, Moscow, 1975.
34. Lach, L., Lemaignan, S., Ferro, F., Ritter, H., și Haschke, R., *Bio-Inspired Grasping Controller for Sensorized 2-DoF Grippers*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, pp. 11231-11237, 2022.
35. Lamour, R., März, R. și Tischendorf, C., *Differential-algebraic equations: a projector based analysis*, Springer Science & Business Media, 2013.
36. Lurie, A. I., *Analytical Mechanics*, Springer, 2002.
37. Luo, X., Mu, D., Wang, Z., Ning, P. și Hua, C., *Adaptive full-state constrained tracking control for mobile robotic system with unknown dead-zone input*, Neurocomputing, vol. 524, pp. 31-42, 2023.
38. Mahmoud, R., Ueno, A. și Tatsumi, S., *Dexterous Mechanism Design for an Anthropomorphic artificial hand: Osaka City University Hand I*, 10th IEEEERAS International Conference on Humanoid Robots, Nashville, TN, 2010.
39. Mangeron, D., Irimciuc, N., *Mecanica rigidelor cu aplicații în inginerie*, vol. I-III, Ed. tehnică, București, 1978-1981.
40. Mataric, M. J., *The robotics primer*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2007.
41. Meirovitch, L., *Fundamentals of vibrations*, McGraw-Hill International Edition, 2001.
42. Moran, M. E., *Evolution of robotic arms*, Journal of Robotic Surgery, vol. 1(2), Springer, Londra, pp. 103-111, 2007.
43. Murray, R. M., Li, Z., Sastry, S., *A mathematical introduction to robotic manipulation*, CRC Press Inc., Boca Raton, 1994.
44. Nurpeissova, A., Tursynbekov, T. și Shintemirov, A., *An Open-Source Mechanical Design of ALARIS Hand: A 6-DOF Anthropomorphic Robotic Hand*, Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2021), Xi'an, China, pp. 1077-1183, 2021.
45. Otten, E., *Inverse and forward dynamics: models of multi-body systems*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Seria B: Biological Sciences, nr. 358(1437), pp. 1493-1500, 2003.
46. Pagoli, A., Chapelle, F., Corrales, J. A., Mezouar, Y., și Lapusta, Y., *A soft robotic gripper with an active palm and reconfigurable fingers for fully dexterous in-hand manipulation*, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6(4), pp. 7706-7713, 2021.
47. Park, H. și Kim, D., *An open-source anthropomorphic robot hand system: HRI hand*, HardwareX, vol. 7, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00100>.
48. Pars, L.A., *A Treatise on Analytical Dynamics*, Heinemann Educational Books Ltd, London, 1965.
49. Plosceanu, B., Craifaleanu, A., Untăroiu, C., *Vibrațiile sistemelor cu un grad de libertate*, Ed. Bren, București, 2001.
50. Predoi, M. V., *Vibrații mecanice. Modele și aplicații în MATLAB*, Ed. MATRIX ROM, București, 2011.
51. Rădoi, M., Deciu, E., *Mecanica*, Ed. didactică și pedagogică R. A., București, 1993.
52. Reckhaus, M., Hochgeschwender, N., Paulus, J., Shakhimardanov, A., și Kraetzschmar, G. K., *An overview about simulation and emulation in robotics*, Proceedings of SIMPAR, pp. 365-374, 2010.
53. Săvescu, A.V., Cheze, L., Xuguang, W., Beurier, G., Verriest, J.P., *A 25° of freedom hand geometrical model for better hand attitude simulation*, SAE transactions, vol. 113(1) pp. 270-275, 2004.
54. Schlesinger, G., *Der mechanische Aufbau der kunstlichen Glieder in Ersatzglieder und Arbeitshilfen*, Springer, Berlin, 1919.
55. Schwarz, R. J. și Taylor, C., *The anatomy and mechanics of the human hand*, Artificial limbs, vol. 2(2), pp. 22-35, 1955.
56. Sireteanu, T., Solomon, O., Mitu, A.M., Giuclea, M., *A linearization method of piecewise linear systems based on frequency domain characteristics with application to semi-active control of vibration*, Journal of Vibration and Acoustics, vol 140(6), 061006, 2018.
57. Sireteanu, T., Solomon, O., Mitu, A.M.; Giuclea, M., *Application of a novel linearization method to compare the on-off control strategies modeled by piecewise linear systems*, Journal of Vibration and Control, vol. 26(23-24), pp. 2125-2135, 2020.
58. Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., *Robot Modeling and Control, First Edition*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
59. Stroe, I., Staicu, Șt. și Craifaleanu, A., *Internal forces calculus of compass robotic arm using Lagrange equations*, 10th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation 'ASTRA 2011', ESTEC, Noordwijk, (pe CD-ROM), pp. 1-6, 2011.

60. Sutanto, G., et al., *Encoding Physical Constraints in Differentiable Newton-Euler Algorithm* Proceedings of the 2nd Conference on Learning for Dynamics and Control, Proceedings of Machine Learning Research, pp. 804-813, 2020.
61. Sutiyasadi, P. și Wicaksono, M. B., *Joint control of a robotic arm using particle swarm optimization based H2/H ∞ robust control on arduino*, TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), vol. 18(2), pp. 1021-1029, 2020.
62. Șabac, I. Gh., *Matematici speciale*, vol. I-II, Ed. didactică și pedagogică, București, 1981, 1983.
63. Touvet, F., Daoud, N., Gazeau, J. P., Zeghloul, S., Maier, M. A., Eskiizmirliler, S., *A biomimetic reach and grasp approach for mechanical hands*, Journal of Robotics and Autonomous Systems, vol. 60(3), pp. 473-486, 2012.
64. Tsai, L. W., *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley & Sons, 1999.
65. Voinea, R., Deciu, E., Dragomirescu, C., *Technische Mechanik*, ed. ALMA, Craiova, 2009.
66. Voinea, R., Stroe, I., *Introducere în teoria sistemelor dinamice*, Ed. Academiei Române, București, 2000.
67. Voinea, R., Stroe, I., Predoi, M. V., *Technical mechanics*, Ed. POLITEHNICA PRESS, București, 2010.
68. Voinea, R., Voiculescu, D. și Ceaușu, V., *Mecanica*, Editura didactică și pedagogică, București, 1983.
69. Wahit, M. A. A., Ahmad, S. A., Marhaban, M. H., Wada, C., și Izhar, L. I., *3d printed robot hand structure using four-bar linkage mechanism for prosthetic application*, Sensors, Basel, vol. 20(15), 2020.
70. Wallén J., *The history of the industrial robot*, Linköping University Electronic Press, Linköping, 2008.
71. Wang, S., et al., *Dynamic simulation analysis and experimental study of an industrial robot with novel joint reducers* Multibody Syst Dyn vol. 57(2), pp. 107-131), 2023, <https://doi.org/10.1007/s11044-022-09864-7>.
72. Xu, J., et al., *Efficient tactile simulation with differentiability for robotic manipulation*, Conference on Robot Learning, pp. 1488-1498, PMLR, 2023.
73. Ye, T., Ling, J., Yao, T., și Xiao, X., *Design of a 2-DOF constant force compliant microgripper for optical switch assembly*, The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, pp. 4403-4408, 2020.
74. Zhang, D., Ma, W. și Zhang, H., *Analysis and Simulation of Mechanical Arm Dynamics Model Based on Simulink* 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPICAI), Guangzhou, pp. 416-419, 2022.
75. *** - *A Glossary of Terms for Robotics* pregătit pentru Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. Biroul Național de Standardizare a Statelor Unite, Washington, D.C., 1980.
76. *** - ISO 8373:2012, *Robots and robotic devices - Vocabulary*.
77. *** - <https://math.stackexchange.com/questions/569856/function-with-zero-first-to-nth-derivative-at-end-points>, accesat 15.09.2023.
78. *** - https://uk.banggood.com/LOBOT-uHand-STM32-Open-Source-RC-Robot-Right-Arm-APP-or-Stick-or-Glove-Control-Educational-Robot-Arm-Kit-p-1403202.html?cur_warehouse=CN, accesat 15.09.2023.
79. *** - https://www.amazon.com/ELEPHANT-ROBOTICS-Collaborative-Programming-Applications/dp/B0C2CXT52/ref=sr_1_1_sspa?adgrpid=1340307075889385&hvadid=83769455604490&hvbm=bb&hvdev=c&hvlocphy=140908&hvnetw=o&hvqmt=b&hvtargid=kwd-83770243317663&hydader=7668_13583979&keywords=wearable%2Brobotic%2Barm&msclid=097173ab178f181487d316156dd93ca5&qid=1706982017&sr=8-1-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGY&th=1, accesat 03.01.2024.
80. *** - https://www.amazon.com/dp/B094FRPJ16/ref=sspa_dk_detail_0?psc=1&pd_rd_i=B094FRPJ16&pd_rd_w=23Tj6&content-id=amzn1.sym.eb7c1ac5-7c51-4df5-ba34-ca810f1f119a&pf_rd_p=eb7c1ac5-7c51-4df5-ba34-ca810f1f119a&pf_rd_r=ZC33CZPCFZM XJS73NZTZ&pd_rd_wg=u915M&pd_rd_r=2fdd8a4b-a0a0-4cea-8c58-9a12e77682e4&s=toys-and-games&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9kZXRhaww, accesat 03.09.2023.
81. *** - https://www.amazon.com/dp/B0BX52FSX8/ref=sspa_dk_detail_0?psc=1&pd_rd_i=B0BX52FSX8&pd_rd_w=6AwCV&content-id=amzn1.sym.eb7c1ac5-7c51-4df5-ba34-ca810f1f119a&pf_rd_p=eb7c1ac5-7c51-4df5-ba34-ca810f1f119a&pf_rd_r=JFZTPKKTVCV12FGQAZV6M&pd_rd_wg=32e6B&pd_rd_r=140a3dca-4d1d-4811-82ee-bfea78a33e5a&s=toys-and-games&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9kZXRhaww
82. *** - <https://www.aliexpress.com/i/1005004514454645.html>, accesat 03.09.2023.
83. *** - <https://www.rmigo.com/shop/platforms/arduino/lobot-uhand-arduino-gesture-recognition-bionic-mechanical-hand/>, accesat 15.09.2023.
84. *** - <https://www.sutori.com/en/item/1963-the-rancho-arm-is-developed-at-rancho-los-amigos-hospital-in-downey-cal>, accesat 02.08.2023.