CERCETAREA PERFORMANȚELOR ROBOȚILOR PLAN PARALELI UTILIZÂND LANȚURI CINEMATICE CU BARE ȘI ROȚI DINȚATE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie mecanică

autor ing. Antonio-Marius-Flavius Lupuți

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Erwin Christian Lovasz

Tematica tezei prezente se încadrează în preocupările științifice actuale din aria roboțiilor plan paraleli. Obiectivul principal al tezei de doctorat reprezintă cercetarea preciziei roboților plan paraleli utilizând lanțuri cinematice cu bare și roți dințate. Astfel, obiectivele tezei doctorale pot fi împărțite următoarele etape:

A. Studii bibliografice referitoare la stadiul actual al cercetărilor roboţilor plan paraleli

- Stadiul actual al roboților industriali seriali;
- Stadiul actual al roboților industriali plan paraleli;
- Evoluția roboților industriali plan paraleli;
- Prezentarea diferitelor structuri de roboți plan paraleli;
- Domenii de aplicabilitate a roboților plan paraleli.

B. Realizarea analizei structurale şi a analizei cinematico-poziţională directe şi inverse ale roboţilor plan paraleli cu lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară

- Analiza structurală a roboţilor plan paraleli care utilizează lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară 3-R(T<u>T</u>RRRdR)R şi 3-R(R<u>T</u>RRRdR)R;
- Analiza cinematică a roboţilor plan paraleli care utilizează lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară având lanţul cinematic manivelă piston ca lanţ cinematic de bază 3-R(T<u>T</u>RRRdR)R;
- Analiza cinematică a roboţilor plan paraleli care utilizează lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară având lanţul cinematic cu culisă oscilantă ca lanţ cinematic de bază 3-R(R<u>T</u>RRRdR)R.

C. Caracterizarea performanţelor roboţilor plan paraleli cu lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară

- Analiza spaţiului de lucru al roboţilor plan paraleli având lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară 3-R(T<u>T</u>RRRdR)R şi 3-R(R<u>T</u>RRRdR)R;
- Analiza singularităţilor roboţilor plan paraleli având lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară 3-R(T<u>T</u>RRRdR)R şi 3-R(R<u>T</u>RRRdR)R;
- Analiza indiciilor de performanță a robotului plan paralel derivate din mecanismele cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară 3-R(R<u>T</u>RRRdR)R;

- Analiza indiciilor de performanță a roboţilor plan paraleli având lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară 3-R(TRRRdR)R şi 3-R(RTRRdR)R;
- compararea indicilor de performanţă globali a roboţilor plan paraleli având lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară 3-R(TRRRdR)R şi 3-R(RTRRdR)R cu robotul plan paralel elementar 3-RRR.

D. Realizarea modelelor CAD cu lanţuri de legătură cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară, simularea situării platformei mobile pentru diverse mişcări simple şi combinate în spaţiul de lucru, respectiv proiectarea și realizarea prototipului de robot plan paralel.

- Proiectarea CAD a robotului plan paralel 3-R(TRRRdR)R;
- Simularea mişcării platformei mobile pentru diverse mişcări: translaţii după axele X şi Y, rotaţie după axa Z şi mişcare combinată;
- Realizarea prototipului robotului plan paralel 3-R(TRRRdR)R.

E. Realizarea unor cercetări experimentale ale preciziei de realizarea a traiectoriilor pentru diverse regimuri de funcţionare, respectiv a curselor şi vitezelor actuatoarelor lineare.

- Studiul preciziei de realizare a traiectoriilor simulate cu prototipul de robot plan paralel 3-R(TRRRdR)R;
- Studii experimentale ale preciziei de realizare a traiectoriilor simulate pentru diverse regimuri de funcţionare cu prototipul de robot plan paralel 3-R(TRRRdR)R;
- Determinări experimentale ale curselor şi vitezelor actuatoarelor pentru traiectoriile simulate pentru diverse regimuri de funcţionare cu prototipul de robot plan paralel 3-R(TRRRdR)R.

F. Concluzii şi contribuţii personale.

- Prezentarea principalelor concluzii ale cercetărilor teoretice şi experimentale;
- Prezentarea contribuțiilor personale;
- Perspective de cercetare a roboţilor plan paraleli.

Teza de doctorat este structurată în 7 capitole: 1 capitol introductiv, 1 capitol privind stadiul actual al manipulatoarelor plan paraleli, 2 capitole de contribuții teoretice, 1 capitol de proiectare şi simulare a modelului CAD al manipulatorului, respectiv de realizate a prototipului experimental, 1 capitol de studii experimentale și 1 capitol de concluzii care sintetizează contribuțiile tezei.

Capitolul 1 prezintă o scurtă introducere și structura tezei de doctorat.

Capitolul 2 prezintă stadiul actual și evoluția roboţilor industriali cu structură serială în general, şi, în particular, cea a roboţilor paraleli. Sunt prezentate diferite structuri de roboţi industriali, caracteristicile generale și domeniile de aplicabilitate ale acestora. Analog, sunt studiaţi și roboţii paraleli, respectiv cele plan paraleli, evidenţiind structurile, sistemul de acționare și caracteristici acestora. Clasificarea roboţilor paraleli este realizată după avantajele și limitările acestora, precum și după gradul de libertate și structura cinematică. Sunt prezentate cele mai cunoscute modele ale producătorilor din industrie, împreună cu aplicațiile industriale ale acestora, respectiv modelele experimentale realizate de diverşi cercetători.

Pe baza stadiului actual al cercetărilor în domeniul roboții paraleli, teza de doctorat își propune ca obiectiv să studieze o soluţie constructivă de robot plan paralel care utilizează lanţuri cinematice de legătură între platforma fixă şi cea mobilă cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară. Studiul își propune să realizeze o analiză cinematico-poziţională direct şi invers pentru lanţurile cinematice propuse şi să simuleze mişcarea punctului caracteristic pe diverse traiectorii. De asemenea, este realizată caracterizarea acestor

manipulatoare plan paraleli din punctul de vedere al spaţiul de lucru, al singularităţii de ordinul I şi II, indicele de manevrabilitate, indicele de uniformitate a manevrabilităţii, numărul condiţiei matricei Jacobi, indicele de rigiditate şi indicele de transmitere. Pentru a confirma studiile teoretice a fost realizat un prototip şi au fost realizate cercetări experimentale. Rezultatele modelului matematic au fost interpretate și comparate cu cele experimentale în vederea validării rezultatelor şi s-a urmărit determinarea erorilor de poziţionare pe traiectorie pentru diverse regimuri de funcţionare, cursele şi vitezele actuatoarelor robotului plan paralel.

Capitolul se încheie prin stabilirea obiectivelor tezei de doctorat rezultate în urma analizei bibliografice efectuate.

Capitolul 3 prezintă o sinteză structurală a roboţilor plan paraleli cu lanțuri cinematice de legătură de tip grupe cinematice. De asemenea sunt sintetizate structurile roboților plan paraleli cu lanțuri cinematice de legătură cu bare și roți dințate. Sunt prezentate structurile care acceptă un număr maxim de cuple de translație motoare egală cu 1. Pe lângă soluțiile de roboţi plan paraleli cu lanțuri cinematice conținând grupe cinematice de clasa a 2-a ordinul 2, se prezintă şi structuri de roboți plan paraleli cu lanțuri cinematice formate din grupe cinematice de clasa 4 ordinul 2.

Pentru sinteza structurală a roboţilor plan paraleli a fost impus gradul de mobilitate al platformei mobile în plan egal cu 3, ceea ce înseamnă un robot plan paralel neredundant. Structurile de roboţi plan paraleli rezultate în urma sintezei structurale, care a acceptat un număr maxim de cuple de translaţie motoare egal cu 1 a fost 12 structuri utile dintr-un număr de 15 structuri posibile, alături de alte structuri derivate.

Astfel, au rezultat un număr de 5 lanțuri cinematice cu grupe cinematice de clasa a 2-a ordinul 2: RRR, RRT, RTR, TRT și RTT. Dintre acestea doar 3 structuri oferă sunt soluții convenabile, care utilizează lanţuri cinematice RRR, RTR și TRR. De asemenea exista o soluție derivată care utilizează lanțuri cinematice de legătură cu cuple cinematice inferioare de înfășurare RIR. Pe lângă aceste soluțiile de roboti plan paraleli cu lanțuri cinematice conținând grupe cinematice de clasa a 2-a ordinul 2 au fost prezentate şi structuri de roboți plan paraleli cu lanțuri cinematice formate din grupe cinematice de clasa 4 ordinul 2. Numărul acestor structuri posibile de roboţi plan paraleli este 3 utilizând lanţurile cinematice: R(RRRR)R,T(RRRR)R,T(RRRR)T, din care doar 2 structuri care utilizează lanţurile cinematice R(RRRR)R și T(RRRR)R oferă soluţii convenabile.

De asemenea, au fost sintetizate şi structurile de roboți plan paraleli care conţin lanţuri cinematice cu bare şi roţi dinţate. Astfel, pentru cazul lanţurilor cinematice cu bare şi roţi dinţate având 3 elemente au rezultat 3 soluții de roboţi plan paraleli: 3-R(RRdR)R, 3-<u>T</u>(RRdR)R și 3-<u>R</u>(TRdR)R. Suplimentar au mai rezultat şi 2 structuri alternative care conţin transmisii cu curele în locul transmisiei cu roţi dinţate: 3-<u>R</u>(RTcR)R și 3-<u>T</u>(RTcR)R. Pentru cazul lanţurilor cinematice cu bare și roţi dinţate cu 5 elemente rezultă 4 structuri convenabile care conţin lanţurile cinematice: R(RRRRdR)R, T(RRRRdR)R, R(RTRRdR)R si R(TRRRdR)R.

Studiile teoretice din cadrul tezei de doctorat se vor concentra în continuare pe caracterizarea cinematică a celor 3 soluții de roboţi plan paraleli cu lanţuri cinematice cu bare şi roţi dinţate având 5 elemente şi utilizând acţionari lineare.

Capitolul 4 realizează o analiza structurală și cinematică a roboţilor plan paraleli 3-<u>R</u>RR, precum şi a roboţilor plan paraleli care utilizează lanţuri cinematice derivate din mecanismele cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară: 3-R(R<u>T</u>RRdR)R, având ca mecanism de bază un mecanism cu culisă oscilantă şi 3-R(<u>T</u>RRRdR)R, având ca mecanism de bază un mecanism manivelă-piston. Pentru fiecare dintre aceşti roboţi se prezintă structura mecanismelor şi analiza cinematică poziţională directă și inversă.

Inițial, a fost prezentată analiza cinematică a structurii 3-<u>R</u>RR datorită faptului că cele două structuri ale roboţilor plan paraleli cu lanţuri cinematice cu bare şi roţi dinţate având acţionare lineară sunt derivate din structura unui robot plan paralel 3-<u>R</u>RR prin legarea în paralel cu lanţurile cinematice RRR a unor lanţuri

cinematice cu bare şi roţi dinţate. Analiza cinematico-poziţională a fost prezentată prin modelul cinematic direct şi invers cu relaţiile de calcul aferente lanţurilor cinematice de legătură cu bare şi roţi dinţate.

Datorită faptului că structura robotului plan paralel 3-T(RRRRdR)R conţine lanţurile cinematice cu bare şi roţi dinţate legate în paralel ca lanţuri cinematice pasiv nu a mai fost luat în considerare acest robot plan paralel.

Capitolul 5 realizează o caracterizare a roboţilor plan paraleli care utilizează lanţuri cinematice derivate din mecanismele cu bare şi roţi dinţate cu acţionare lineară prin analiza spaţiului de lucru, a singularităţilor şi a indiciilor de performanță. Astfel, sunt analizate şi reprezentate prin grafice de nivel:

- Spaţiul de lucru;
- Matricea Jacobiană;
- Singularitățile de ordinul I;
- Singularitățile de ordinul II;
- Manevrabilitatea;
- Numărul de condiţiei;
- Rigiditatea;
- Indicii de transmitere a mișcării și a forțelor.

Sunt prezentate studii de caz pentru fiecare dintre indicii de performanță cu parametri constructivi stabiliți la începutul capitolului. Capitolul se încheie cu compararea indicilor de performanță a roboţilor plan paraleli 3-R(TRRRdR)R și 3-RRR.

Capitolul 6 prezintă proiectarea modelului CAD a robotului plan paralel 3-R(TRRRdR)R. Astfel, sunt prezentate concepția și designul mecanic al robotului plan paralel 3-R(TRRRdR)R, în varianta de model CAD. Se prezintă componentele sistemului mecanic, de acţionare şi de control al robotului plan paralel. În acest capitol sunt realizate simulări CAD. Aceste simulări sunt efectuate pentru diverse mișcări realizate de robot, translație după axa X și axa Y, rotație în jurul axei Z, dar și mișcări combinate.

Capitolul 7 prezintă studiile experimentale realizate cu prototipul de robot plan paralel 3-R(TRRRdR)R. Astfel, prin dotarea robotului cu senzori de poziţie unghiulară se va determina experimental traiectoria punctului caracteristic şi se vor compara rezultatele cu cele teoretice realizate prin simularea CAD. Aceste, determinări experimentale se vor realiza pentru toate cele 4 mişcări simulate teoretic şi se vor determina erorile de poziţionare pe traiectorie pentru diverse regimuri de funcţionare, cursele şi vitezele actuatoarelor robotului plan paralel. La finalul capitolului, se vor discuta concluzii legat de prototipului experimental de robot plan paralel.

Capitolul 8 este alocat pentru concluzii şi contribuţii personale, unde sunt prezentate principalele concluzii, contribuţiile personale şi perspectivele de cercetare ulterioare identificate. Din cadrul tezei de doctorat, o parte din rezultatele obţinute au fost publicate şi sunt în curs de publicare. Au fost publicate 8 lucrări științifice până în prezent, 2 articole publicate în reviste indexate ISI, unul în calitate de prim autor, 3 lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice indexate ISI Proceedings, în calitate de coautor și 3 lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice indexate BDI (Scopus), 2 în calitate de prim autor.

Rezultatele cercetării au fost diseminate în cadrul unor conferințe științifice naționale și internaționale: European Conference on Mechanism Science (EuCoMeS), 2020; International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions (MTM & Robotics), 2020; International Conference on Mechanical Engineering, Design and Manufacturing (MEDER), 2021; Innovation for Sustainable Development Goals

Conference (I4SDG), 2021; IFToMM Italy Conference on Mechanism Science, 2022; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022 și Robotica, 2023. De asemenea, rezultatele au fost incluse în New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications, 2025.