



Universitatea din Craiova



Facultatea de Automatică, Claculatoare și Electronică

Teză de doctorat

Sisteme de acționare neconvenționale pentru conducerea roboților

Conducător Științific:

Prof.dr.ing. Ivănescu Mircea

Doctorand:

Ing. Vladu Ionel Cristian

- 2009 -

- 1 MATERIALE INTELIGENTE**
 - 1.1 Descriere generală
 - 1.2 Clasificarea materialelor inteligente
 - 1.3 Domenii de aplicabilitate ale materialelor inteligente
- 2 MODELE ANALITICE ȘI PROPRIETĂȚI ALE FLUIDELOR INTELIGENTE**
 - 2.1 Introducere
 - 2.2 Aplicații curente ale fluidelor inteligente
 - 2.3 Modelarea fluidelor inteligente
 - 2.4 Lichide electrorheologice și magnetorheologice
 - 2.5 Fluide magnetorheologice Lord
 - 2.6 Structuri bazate pe fluide inteligente
 - 2.7 Algoritm de proiectare a structurilor de control a subansamblelor care conțin fluide inteligente
 - 2.8 Prezentarea comparativă a lichidelor electrorheologice și a lichidelor magnetorheologice
 - 2.9 Concluzii
 - 2.10 Viitorul fluidelor inteligente
- 3 CONTROLERE FUZZY ÎN SISTEME DE CONDUCERE CU FLUIDE RHEOLOGICE**
 - 3.1 Introducere în tehnica reglării fuzzy
- 4 PROIECTAREA ȘI MODELAREA UNUI SISTEM CONTROLAT CU VALVĂ MAGNETORHEOLOGICĂ**
 - 4.1 Dinamica structurilor cu lichide inteligente-studiu de caz: valva stop
 - 4.2 Arhitecturi ale structurilor convenționale bazate pe fluide inteligente
- 5 PLATFORMA EXPERIMENTALĂ PENTRU DETERMINAREA CARACTERISTICILOR VALVELOR RHEOLOGICE.**
 - 5.1 Considerații generale
 - 5.2 Construcție și funcționare
 - 5.3 Adaptarea platformei pentru fluide ElectroRheologice
 - 5.4 Concluzii
- 6 REZULTATE EXPERIMENTALE PENTRU DIFERITE TIPURI CONSTRUCȚIVE DE VALVE MR PENTRU DIVERSE TIPURI DE CÂMP ELECTROMAGNETIC**
 - 6.1 Generalități
 - 6.2 Valve cu canal de parcurgere cilindric liniar, din oțel
 - 6.3 Valve cu canal de parcurgere cilindric liniar, din plastic
 - 6.4 Valve cu canal de parcurgere cilindric liniar, din ferită
 - 6.5 Valve cu canal de parcurgere labirintic, din plastic
 - 6.6 Concluzii
- 7 SISTEME DE ACȚIONARE NECONVENȚIONALE REALIZATE EXPERIMENTAL**
 - 7.1 Controlul dinamic al unui piston pneumatic cu valvă MR
 - 7.2 Sistem tentacular cu sisteme de acționare neconvenționale
 - 7.3 Gripper soft controlat cu fluide rheologice
 - 7.4 Robot hexapod cu elemente hyperredundante controlate cu valve rheologice
- 8 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PRINCIPALE**
- 9 BIBLIOGRAFIE**

Rezumat

Teza de doctorat, *Sisteme de acționare neconvenționale pentru conducerea roboților*, este rezultatul unei activități susținute de studiu și de cercetare.

Cercetarea desfășurată și-a propus să aibă valoare teoretică și practică, fapt ce s-a concretizat atât prin participarea autorului la conferințe naționale și internaționale cu lucrări științifice având ca suport capitole ale tezei, cât și prin realizarea unor prototipuri experimentale se sisteme de acționare și control cu fluide rheologice bazate pe fundamentul teoretico-științific dezvoltat în cadrul lucrării.

Realizarea activității de cercetare și a obiectivelor propuse, a implicat cunoașterea și aprofundarea conceptelor și metodelor de analiză proprii *disciplinelor de specialitate*: mecanicii, teoriei sistemelor și semnalelor, mecatronicii, matematicilor speciale, senzori și instrumentație, sisteme de achiziție de date și calculatoare de proces, a *domeniilor specifice fenomenelor studiate*: teoriilor curgerii vâscoase a fluidelor, teoria distribuției câmpului magnetic, realizarea electromagneților bazați pe ferită, precum și *folosirea algoritmilor și programelor soft* specifice teoriei reglării automate¹, a *mediilor CAD/CAM* Autodesk AutoCAD, Autodesk Inventor și mediilor de programare integrate AutoLISP și VisualBASIC, a *sistemelor de dezvoltare cu microcontrolere și sistemelor de achiziții de date* cu mediile de programare asociate.

Rezultatele obținute în lucrarea de față nu ar fi fost posibile fără abordări teoretice temeinice, care să pătrundă în intimitatea proceselor dinamice și fără desfășurarea unor cercetări experimentale de finețe, care să permită investigarea fenomenelor de un nivel ridicat de complexitate și particularitate specifice temei abordate.

Capitolul 1: MATERIALE INTELIGENTE

În acest prim capitol s-a realizat o definiție a materialelor inteligente din punct de vedere al adaptabilității, multifuncționalității precum și de prelucrare a informațiilor. A fost parcurs un scurt istoric al evoluției domeniului fiind realizată și o descriere a funcțiilor principale ale acestor tipuri de materiale.

Autorul a realizat o prezentare succintă a materialelor inteligente reprezentative și a domeniilor de aplicabilitate ale acestora, oferind o viziune de ansamblu asupra „materialelor inteligente”. S-au prezentat de asemenea principalele direcții de dezvoltare pentru fiecare material, avantajele și dezavantajele lor precum și o structurare a acestora pe domenii de aplicabilitate.

Capitolul 2: MODELE ANALITICE ȘI PROPRIETĂȚI ALE FLUIDELOR INTELIGENTE

Cel de-al doilea capitol al tezei realizează o descriere a fluidelor rheologice, prezentând structura, proprietățile fizico-chimice, domeniile de aplicabilitate, precum și un număr de aplicații reprezentative existente în acest moment pe piață.

În continuare a fost tratată modelarea fluidelor rheologice. S-a realizat de asemenea și un breviar al fluidelor, precum și descrierea formală a proprietăților și comportamentului acestora, prezentând cele două modele comportamentale principale ale curgerii vâscoase Newton și Hooke.

Sunt tratate mărimile fizice principale care intervin în descrierea modelelor constitutive, respective vâscozitatea, vâscoelasticitatea fluidelor, vâscozitatea cinetică.

Pentru descrierea comportamentului vâscoelastic al fluidelor rheologice au fost prezentate modelele: Maxwell, Maxwell generalizat, Kelvin-Voight, Maxwell extins și Kelvin-Voight, Burger.

Mai departe, în cadrul capitolului se prezintă o metodă grafică pentru studiul fluidelor.

¹ toolbox-urile pachetului Matlab&Simulink

De asemenea sunt prezentate modelele matematice utilizate în descrierea vâscozității: Newtonian, Bingham, Oswald-Waele, Herschel-Bulkley, Carson, Carreau, Cross.

S-a realizat o clasificare din punct de vedere al vâscozității a fluidelor newtoniene și non-Newtoniene, parcurgând fluidele plastice, dilatante și pseudoplastice, tratându-se și evoluția vâscozității în timp.

Pentru unul din producătorii principali ai fluidelor magnetorheologice și aplicațiilor acestora, respective firma Lord, sunt prezentate câteva aplicații ale acestei firme. Fluidul magnetorheologic folosit în cadrul lucrării a fost produs de firma Lord.

Se prezintă un algoritm simplificat de alegere a fluidului rheologic și a generatorului de câmp de excitație funcție de tipul aplicației.

În finalul capitolului se face o prezentare comparativă a celor două tipuri de fluide rheologice electrorheologice și magnetorheologice.

Capitolul 3: CONTROLERE FUZZY ÎN SISTEME DE CONDUCERE CU FLUIDE RHEOLOGICE

În capitolul 3 al tezei s-a realizat un studiu al aplicării algoritmilor fuzzy în sistemele de acționare cu fluide rheologice. S-au prezentat principiile controlerelor fuzzy, explicând conceptele de bază și structura internă a unui asemenea controler.

Astfel s-au explicat baza de date și baza de reguli ale unui CLF precum și mecanismul de inferență prezentând metodele MAX-DOT, MIN-MAX, Tsukamoto și Sugeno.

În continuare s-au tratat aspectele apărute la dezvoltarea legilor de control de tip fuzzy. S-a realizat o comparație între controlerul fuzzy și controlerul de tip convențional trecând în revistă controlerul de tip PI, PD și PID.

S-a realizat de asemenea aproximarea unui CLF printr-un controler de tip PI virtual bazat pe model fuzzy cvasiliniar.

În continuare s-a făcut un studiu în care s-a prezentat Structura robustă de auto-acordare pentru controler fuzzy de tip PI și PD. Astfel au fost prezentate funcțiile de apartenență, factorii de scală, baza de reguli și mecanismul de Auto-acordare.

În ultima secțiune a capitolului s-a realizat un studiu al controlului în logica fuzzy și Sliding mode control.

Capitolul 4: PROIECTAREA ȘI MODELAREA UNUI SISTEM CONTROLAT CU VALVĂ MAGNETORHEOLOGICĂ

În cadrul acestui capitol s-a realizat modelarea unui sistem controlat cu valvă magnetorheologică.

Studiul dinamicii valvei-stop, având ca drept agent fluidic lichidele rheologice, la diferite comenzi: intrare treaptă a variației presiunii, intrare treaptă a variației debitului, semnal treaptă a câmpului energizant, a evidențiat fenomenele interne care au fost parte integrantă a contractului de cercetare.

S-a realizat un studiu de caz a structurilor cu lichide inteligente pentru valva-stop determinându-se matematic distribuția vitezei de curgere, rezultat reprezentat grafic 3D în mediul Matlab. Folosind aceste rezultate s-a studiat dinamica unei valve-stop la o intrare tip

treaptă a câmpului energizant și la o intrare treaptă a variației de presiune. Folosind un set prestabilit de valori s-a realizat reprezentarea prin vizualizare 3D a rezultatelor folosind mediul Matlab.

La finalul capitolului este tratată o structură de actuator bazată pe arhitectura valvă-stop, având ca rezultat modelul matematic al acestuia.

Capitolul 5: PLATFORMĂ EXPERIMENTALĂ PENTRU DETERMINAREA CARACTERISTICILOR VALVELOR MAGNETORHEOLOGICE

S-a realizat un stand pentru determinarea experimentală a valvelor-stop rheologice. Conceptual, platforma este compusă din blocul de antrenare al fluidului rheologic, blocul de generare al câmpului de excitație și electrovalva propriuzisă

Pactic rezultatul final al determinărilor este dependența debitului de curgere prin valvă de intensitatea câmpului magnetic de excitație și de presiunea aplicată.

Platforma este creată modularizat, astfel încât orice ansamblu poate fi înlocuit foarte simplu fără modificări mecanice sau de altă natură.

Platforma este un stand de test complet și are în componență următoarele subsisteme

- sistemul pneumatic;
- sistemul hidraulic;
- sistemul electric și electronic;
- sistemul senzorial;
- sistemul de achiziție al parametrilor rheologici;
- sistemul de achiziție al parametrilor câmpului magnetic;
- programele software asociate achiziției sistemului.

Achiziția parametrilor și comanda sistemului se face cu ajutorul programului software Simulink prin intermediul plăcii de achiziție Quanser și a unui calculator PC.

Achiziția intensității câmpului magnetic este realizată cu un sistem de dezvoltare realizat cu microcontroler PIC, prin intermediul unei sonde magnetice.

Deși este un prototip este perfect capabil pentru realizarea determinărilor în regim industrial.

Deși platforma a fost realizată pentru testarea și determinarea parametrilor valvelor magnetorheologice, a fost astfel concepută încât cu minime modificări să poată testa și valve electrorheologice.

Pentru realizarea finală a acestui stand de test au fost realizate mai multe variante de test, care au fost perfecționate pe parcurs, din punct de vedere constructiv, al materialelor folosite și al minimizării erorilor de măsură.

Deoarece determinarea experimentală a parametrilor necesită repetarea determinărilor de un număr satisfăcător de ori, modelul de comandă permite repetarea automată ciclului de achiziție într-o buclă finită.

Rezultatul acestei achiziții repetate a unui parametru fiind furnizat sub forma unui vector s-a creat un program în Matlab care generează o matrice care are ca vectori componenți valorile fiecărei determinări. Problemele generate de crearea acestui program rezidă în neregularitatea dimensiunii vectorilor, ca număr de elemente. Matricea rezultată este folosită pentru vizualizarea comparativă a ciclurilor de achiziție, fiind folosită

reprezentarea 3D în Matlab a rezultatelor.

Capitolul 6: REZULTATE EXPERIMENTALE PENTRU DIFERITE TIPURI CONSTRUCTIVE DE VALVE MR PENTRU DIVERSE TIPURI DE CÂMP ELECTROMAGNETIC

S-a realizat determinarea parametrilor pentru valvele rheologice construite de autor. Acestea diferă prin forma constructivă, materialul corpului valvelor, direcția de curgere a fluidului în câmp magnetic, suprafața de fluid aflată în câmp amagnetic și a permeabilității magnetice a materialelor folosite.

Astfel s-a realizat determinarea parametrilor pentru o valvă rheologică cilindrică, având forma canalului de trecere cilindric cu diametre de 3, 5 și 7 mm, cu direcția de curgere a fluidului perpendicular pe liniile de câmp magnetic, construită din oțel. Deși materialul folosit ar trebui să nu diminueze câmpul magnetic faptul că valva are o formă cilindrică scurtcircuitează liniile de câmp diminuând semnificativ efectul acestuia asupra fluidului. Din acest motiv sunt necesare câmpuri magnetice intense pentru acest tip de valve. O altă soluție ar fi ca fluidul să fie în contact direct cu ferita generatorului de câmp magnetic, dar această soluție constructivă impune atașarea permanentă a circuitului magnetic la valvă.

De asemenea materialul folosit impune limitarea frecvenței de generare a câmpului magnetic la 200 Hz, peste această frecvență apare saturarea materialului.

Pentru un câmp magnetic corespunzător efectul rheologic a fost ferm determinat, pentru valori mari ale intensității câmpului fiind blocată mișcarea.

Avantaje: sub acțiunea câmpului magnetic particulele solide „aderă” la pereți, materialul metalic magnetizându-se în câmp magnetic; ușor de prelucrat; nu este atacat de uleiul existent în fluidului magnetorheologic; foarte rezistent la presiune; material ieftin.

Dezavantaje: dacă masa cilindrului este mare² diminuează intensitatea câmpului magnetic în interior³; o parte a liniilor de câmp magnetic se închide prin corpul valvei, diminuând efectul acestuia; materialul se saturează la o frecvență mai mare de 200Hz a tensiunii de generare a câmpului electromagnetic.

S-au realizat determinările parametrilor pentru o valvă de același tip constructiv realizată din plastic, având forma canalului de trecere cilindric cu diametre de 1.5, 2, 3 și 4 mm. Diferența semnificativă constă că materialul constructiv al valvei este plasticul. S-a observat în timpul testelor că acest tip de valvă se comportă mai bine, fiind necesare câmpuri magnetice de intensitate relativ redusă pentru blocarea mișcării.

Avantaje: ușor de prelucrat; nu este atacat de uleiul existent în fluidului magnetorheologic; rezistent la presiune; material ieftin; poate funcționa și la frecvențe mari de generare a câmpului magnetic.

Dezavantaje: este dificil de realizat contactul direct al fluidului cu generatorul de câmp magnetic fără integrarea acestuia în structura valvei⁴.

S-au realizat determinările parametrilor pentru o valvă de același tip constructiv realizată din ferită. Diferența semnificativă constă în faptul că direcția de curgere a fluidului este de-a lungul liniilor de câmp pentru această valvă, ceea ce reduce semnificativ efectul

² pereți groși

³ în canalul de curgere

⁴ dar interpunerea materialului plastic în liniile de câmp nu reduce semnificativ intensitatea acestuia

rheologic de creștere a vâscozității.

Avantaje: contact direct cu fluidul a generatorului de câmp magnetic; nu este atacat de uleiul existent în fluidului magnetorheologic; rezistent la presiune; poate funcționa la frecvențe foarte mari de generare a câmpului magnetic.

Dezavantaje: realizare prin tehnici speciale de turnare; nu se poate prelucra ulterior; creșterea vâscozității este maximă de-a lungul axului de curgere în lungul liniilor de câmp, ceea ce diminuează mult efectul de blocare al mișcării generatorul de câmp magnetic este integrat în structura valvei.

S-au realizat determinările parametrilor pentru o valvă de același tip constructiv realizată din plastic, având traseul canalului de trecere cilindric cu formă labirintică. Diferența semnificativă constă în forma labirintică a canalului de trecere. S-a observat în timpul testelor că acest tip de valvă se comportă mai bine, fiind necesare câmpuri magnetice de intensitate relativ redusă pentru blocarea mișcării.

Avantaje: ușor de prelucrat; nu este atacat de uleiul existent în fluidului magnetorheologic; rezistent la presiune; material ieftin; poate funcționa și la frecvențe mari de generare a câmpului magnetic; forma labirintică a canalului, crește suprafața de interacțiune cu liniile de câmp, de asemenea forma canalului este proprie blocării unei curgeri vâscoase.

Dezavantaje: este dificil de realizat contactul direct al fluidului cu generatorul de câmp magnetic fără integrarea acestuia în structura valvei.

Parametrii determinanți în performanțele unei valve-stop sunt:

- parametrii geometrici;
- forma și dimensiunile secțiunii canalului de parcurgere;
- factorul de rugozitate al pereților;
- forma traseului activ;
- dimensiunile traseului activ;
- parametrii materialului din care este construită;
- parametrii geometrici⁵;
- parametrii diamagnetici ai materialului din care este construită;
- factorul de aderență al materialului;
- caracteristicile fluidului magnetorheologic;
- caracteristica de vâscozitate în câmp magnetic;
- viteza de sedimentare;
- factorul de aderență al fluidului;
- viteza de variație a vâscozității;
- parametrii câmpului magnetic
- direcția câmpului magnetic aplicat;
- frecvența tensiunii de generare a câmpului magnetic;
- intensitatea câmpului magnetic.

Câteva caracteristici principale ideale ale valvei-stop⁶ ar putea fi:

- aderența materialului valvei-stop și a fluidului rheologic trebuie să fie direct

⁵ volumul de material interpus între fluid și câmpul magnetic

⁶ deduse după experimente

- proporțională cu intensitatea câmpului magnetic⁷;
- viteza de sedimentare trebuie să fie zero;
 - câmpul magnetic trebuie să fie transversal pe direcția de curgere;
 - viteza de modificare a vâscozității trebuie să fie infinită
 - forma geometrică a canalului de curgere trebuie să permită înghețarea curgerii la valori nominale ale câmpului magnetic și să nu introducă pierderi în absența câmpului magnetic;
 - frecvența câmpului magnetic trebuie să fie egală cu histerezisul fluidului⁸.

Este evidentă contradicția acestor condiții ideale.

În cazul proiectării practice a unei valve-stop determinanți sunt parametrii generali de funcționare, care impun de altfel condițiile de determinare a tuturor parametrilor de construcție.

Capitolul 7: CONTROLUL DINAMIC AL UNUI PISTON PNEUMATIC CU VALVĂ MR

În prima parte a acestui capitol este prezentat un piston pneumatic cu dinamică controlată prin intermediul unei valve-stop rheologice realizat de către autor. Avantajul major al acestei soluții practice constă în controlul absolut al dinamicii unui piston pneumatic sau rheologic existent prin adăugarea la structura acestuia a unei componente, unitare cu acesta, piston hidraulic-valva rheologică. Această soluție de acționare reprezintă un element de noutate absolut în acționarea cu pistoane pneumatice⁹, nefiind regăsit în literatura de specialitate.

Această platformă experimentală a fost realizată ca structură deschisă putând fi folosită și ca element didactic. Platforma a fost creată și folosită pentru studiul acestui tip de pistoane, respectiv pentru determinarea parametrilor valvei rheologice funcție de dimensiunile pistonului și presiunea de lucru.

Platforma dispune de un sistem complet de determinare a comportării pistonului, fiind folosite în acest scop o parte din modulele prezentate în capitolul 5, respectiv sistemul de achiziție Quanser, sistemul senzorial pentru determinarea deplasării, senzorul de presiune în sistem și modulul valva magnetorheologică-generator câmp magnetic. Comanda și achiziția datelor se face prin intermediul plăcii de achiziție Quanser folosind mediul de lucru Matlab&Simulink.

Subcapitolul următor realizează o prezentare a roboților hyperredundanți. Este prezentată evoluția, variantele constructive existente, moduri de acționare și domeniile de aplicabilitate ale acestora.

Este tratat în special brațul hyperredundant format din elemente flexibile continue tip trompă de elefant. Este realizată practic o variantă constructivă cu o singură cameră de presiune a acestui tip de braț. Prin controlul presiunii se controlează funcția de apucare prin încolăcire a brațului. Brațul hyperredundant realizat a fost conectat și comandat prin intermediul pistonului pneumatic cu dinamică controlată, descris în subcapitolul anterior. Acest braț de robot reprezintă una din posibilele posibilități de aplicare a pistonului

⁷ zero în lipsa câmpului magnetic și maximă pentru câmp magnetic de intensitate maximă

⁸ pentru economisirea energiei

⁹ consideră autorul

pneumatic realizat.

Folosind același principiu a fost realizată și o mână cu trei degete triortogonal opuse, foecare deget fiind hyperredundant. În structura realizată cele trei degete sunt comandate unitar, dar din punct de vedere constructiv pot fi acționate independent. Prin controlul presiunii se realizează funcția de apucare prin încolăcire a degetelor sau prin presiune de contact a degetelor pe obiectul manipulat. Mâna cu degete hyperredundante realizată a fost conectat și comandat prin intermediul pistonului pneumatic cu dinamică controlată, descris în subcapitolul anterior. Această mână de robot reprezintă una din posibilele posibilități de aplicare a pistonului pneumatic realizat.

În următorul subcapitol tratează problema controlului unui robot hyperredundant care folosește funcția de încovoire pentru apucare. Prima dată este studiat modelul dinamic pentru un braț hyperredundant format din elemente continue din materiale flexibile în combinație cu elemente rheologice activ-controlabile. Sunt analizate problemele de control al poziției și control al forței. Dificultățile generate de complexitatea ecuațiilor neliniare integro-diferențiale sunt evitate prin introducerea în sistem a relațiilor pe bază de energie. Legice de control pe bază de energie sunt introduse pentru rezolvarea controlului poziției. Metoda propusă pentru controlul forței folosește metoda DSMC pentru fiecare evoluție a sistemului în care este controlată vâscozitatea fluidului rheologic, folosind de asemenea simulările numerice.

În ultimul subcapitol este prezentată o soluție practică de realizare a unui robot mobil hexapod având ca picioare hyperredundante cu fluid rheologic. Avantajul major al acestui tip de robot constă în mobilitatea picioarelor ceea ce îl face ideal pentru teren accidentat, permițându-i deplasări fără balansul corpului central, deplasări laterale, rotații în jurul axei, etc. De asemenea unele picioare pot fi folosite ca manipuloare. Pentru acest robot s-a realizat un program în Visual Basic for AutoCAD care permite simularea vizuală a deplasării robotului funcție de comanda independentă a evoluției picioarelor.