



**Universitatea din Craiova**  
Facultatea de Automatică, Calculatoare și Electronică

## **Teză de doctorat**

# **Algoritmi de monitorizare, diagnoză și control pentru sisteme mecatronice complexe**

**Rezumat**

**Conducător Științific:**  
Prof.dr.ing. Mircea Ivănescu

**Doctorand:**  
Asist. Ing. Reșceanu Ionuț Cristian

**-2010-**

## Cuprins

Cap. 1. Introducere.....	1-1
1.1. Definirea conceptului de telerobotică .....	1-1
1.2. Controlul la distanță a sistemelor mecatronice .....	1-9
1.3. Detecția și identificarea defectelor la sistemele mecatronice .....	1-22
Cap. 2. Sisteme de monitorizare și diagnoză utilizate în teleconducerea sistemelor mecatronice .....	2-1
2.1. Metode analitice pentru detecția și localizarea defectelor .....	2-1
2.2. Sinteza comenzilor în regim de defect .....	2-14
2.3. Utilizarea fuziunii datelor pentru monitorizarea și diagnoza proceselor .....	2-23
Cap. 3. Controlul unui sistem mecatronic în regim de defect.....	3-1
3.1. Cinematica și dinamica unui robot manipulator .....	3-1
3.2. Determinarea spațiului de operare în condiții de defect.....	3-3
3.3. Detecția și localizarea defectelor utilizând metoda filtrelor multiple pentru un robot manipulator .....	3-7
3.4. Controlul robotului manipulator în condiții normale și în cazul blocării unei articulații .....	3-11
3.5. Conducerea servomotorului SRV-02 Quanser în condiții normale și de defect utilizând regulator convențional.....	3-20
3.6. Conducerea sistemului Rotflex Quanser în condiții normale și de defect utilizând LQR.....	3-31
Cap. 4. Controlul la distanță cu întârzieri a sistemelor mecatronice .....	4-1
4.1. Compensarea întârzierii în controlul la distanță.....	4-1
4.2. Modelarea operatorilor umani în sistemele de control.....	4-5
4.3. Controlul predictiv al sistemelor conduse de la distanță.....	4-8
4.4. Predictorul Smith în sistemele de control la distanță .....	4-16
4.5. Diagnoza unui sistem controlat prin rețea.....	4-46
Cap. 5. Studii de caz pentru controlul la distanță cu întârzieri .....	5-1
5.1. Studii de caz utilizând predictorul Smith modificat.....	5-1
5.2. Controlul poziției la distanță a unui servomotor Quanser SRV-02 utilizând predictorul Smith modificat .....	5-14
Cap.6. Concluzii	
Bibliografie	

# Rezumat

Teza de doctorat, *Algoritmi pentru monitorizare, diagnoză și conducerea sistemelor mecatronice complexe*, este rezultatul unei activități susținute de studiu și cercetare.

Realizarea activității de cercetare și obiectivelor propuse, a implicat cunoașterea și aprofundarea conceptelor și metodelor de analiză proprii disciplinelor de specialitate, mecanicii, teoriei sistemelor și semnalelor, mecatronicii și matematicilor speciale, precum și folosirea algoritmilor și programelor soft specifice teoriei reglării automate (toolbox-urile pachetului Simulink - Matlab).

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 de autor.

## **Capitolul 1: INTRODUCERE**

Se definește conceptul de telerobotică și teleoperare (1.1. Definierea conceptului de telerobotică), în particular: telerobotica bazată pe internet (1.1.1. Telerobotica bazată pe internet (web)). Consultarea literaturii de specialitate a evidențiat anumite aspecte privind modalitățile și criteriile de clasificare a metodelor și arhitecturilor de control în cazul teleoperării roboților prin intermediul internetului (1.1.2. Clasificarea metodelor de control în teleoperarea roboților prin intermediul internetului, 1.1.3. Clasificarea arhitecturilor de control).

Tot în cadrul acestui capitol au fost prezentate principiile fundamentale privind controlul la distanță (1.2. Controlul la distanță a sistemelor mecatronice, 1.2.1. Principii fundamentale privind sistemele de control la distanță) introducându-se termenul de întârziere și modurile sub care aceasta poate apare în sistemele de control la distanță (1.2.3. Întârzierea în sistemele de control la distanță, 1.2.3. Tipuri de întârzieri), precum și compensarea acesteia (1.2.4. Compensarea întârzierilor).

Un alt element introdus în acest capitol a fost cel al detecției și localizării defectelor în sistemele mecatronice (1.3. Detecția și localizarea defectelor la sistemele mecatronice), evidențiindu-se importanța acestui aspect în conducerea sistemelor (1.3.1. Importanța detecției și localizării defectelor) și prezentându-se totodată câteva concept de bază privind diagnoza defectelor sistemelor conduse la distanță (1.3.2. Concepte de bază în diagnoza defectării proceselor, 1.3.3. Clasificarea metodelor de diagnoză a defectelor, 1.3.4. Aspecte ale sincronizării pachetelor în funcție de protocol, 1.3.5. Detecția și identificarea defectelor la articulațiile unui robot).

## **Capitolul 2: SISTEME DE MONITORIZARE ȘI DIAGNOZĂ UTILIZATE ÎN TELECONDUCEREA SISTEMELOR MECATRONICE**

În acest capitol eforturile autorului s-au concentrat asupra studiului comparativ privind metodelor analitice de detecție și localizare a defectelor (2.1. Metode analitice de detecție și localizare a defectelor) și selectării din vasta literatură de specialitate a unor soluții relevante și complexe de interes ingineresc utile în studiile experimentale realizate în lucrare.

Tot în cadrul acestui capitol au prezentate și câteva aspecte privind fuziunea datelor pentru monitorizarea și diagnoza proceselor (2.3. Utilizarea fuziunii datelor pentru monitorizarea și diagnoza proceselor).

**Contribuțiile originale** revendicate de autor constă în determinarea:

- unui sistem de diagnoză pentru fuziunea datelor utilizând funcția de coerență și de corelație.

## **Capitolul 3: CONTROLUL UNUI SISTEM MECATRONIC ÎN REGIM DE DEFECT**

Sistemele mecatronice, fie ele: staționare sau mobile, cu braț articulată sau tentacular, simple platforme de transport pe roți sau structuri complexe de tip multipozi, sunt utilizate în prezent în diverse domenii, în special în mediile nocive sau periculoase pentru om, cum ar fi: manevrarea unor substanțe toxice, etc. În aceste condiții problema detecției și localizării defectelor în sistemul de acționare și conducere a roboților devine o problemă de bază.

Defectele în structurile robotice pot fi cauzate de condițiile de mediu extern (mediu de operare) sau condiții interne (structură, senzori, elemente de execuție sau programarea conducerii).

Toate situațiile descrise mai sus pot fi controlate prin intermediul unui sistem de monitorizare (autodiagnosticare), care va detecta orice schimbare și va analiza și controla robotul conform unui algoritm adecvat.

Sistemul de monitorizare, în funcție de complexitatea sa, poate adopta următoarele strategii de conducere (pornind de la simplu spre complex): doar detecția și localizarea defectelor și eventual sugerarea acțiunilor de izolare și/sau evitare a componentelor defecte; continuarea mișcării robotului cu asigurarea condițiilor de stabilitate și siguranță în cazul defectelor minore; continuarea mișcării robotului până la aducerea lui într-o stare de siguranță într-o vecinătate a punctului final în cazul defectelor majore; oprirea robotului într-o stare de siguranță cu menținerea stabilității în cazul defectelor catastrofale.

Tehnicile generale de detecție și identificare a defectelor existente, precum și cele de recuperare după defect, pot fi aplicate sistemelor de roboți manipulatori, determinând-se

astfel spațiul de operare a acestora în regim de defect (3.2. Determinarea spațiului de operare în condiții de defect). În cazul unei linii de fabricație care conține mai mulți roboți având aceeași configurație cinematic, depășirea acestor spații de operare admise pentru fiecare robot duce la apariția problemelor de interferență. Pentru a evita acest lucru, s-a eliminat apriori toate ariile care pot fi depășite, astfel încât fiecare robot să aibă propria lui regiune distinctă. Astfel, s-a definit pentru fiecare robot câte o regiune de operare (numită celulă de operare) de formă dreptunghiulară. Apoi, s-a analizat din punct de vedere cinematic cazul apariției unui defect datorat blocării articulației robotului (3.2.1 Defectarea manipulatorului datorate blocării unei articulații). S-a presupus, de asemenea, că valoarea unghiului articulației blocate este cunoscută. Chiar dacă poziția de blocare nu ar fi disponibilă de la senzorul atașat fiecărei articulații, aceasta poate fi calculată din poziția terminalului manipulatorului prin rezolvarea cinematicii inverse.

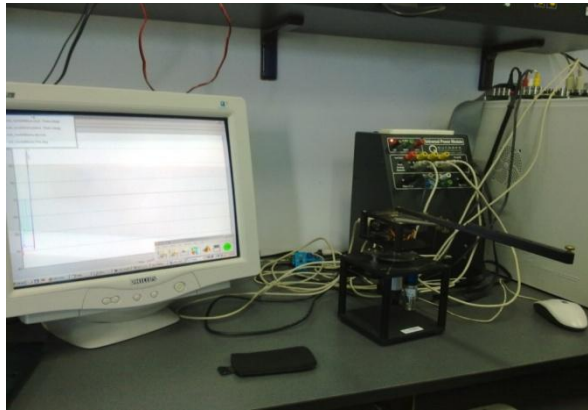
**Contribuțiile originale** revendicate de autor constau în determinarea:

- restricțiilor cinematice ale spațiului de operare a robotului în caz de defect;
- testarea utilizând mediul Matlab și Simulink a metodei filtrelor multiple pentru detecția și localizarea defectelor pentru acest tip de manipulator, considerând trei filtre în care unul dintre acestea conține modelul matematic corect, iar celelalte două conțin modelele matematice corespunzătoare defectării datorate blocării uneia dintre cele două articulații. Prin compararea pe rând a celor trei filtre între ele s-a putut detecta și localiza defectul apărut (3.3. Detecția și localizarea defectelor utilizând metoda filtrelor multiple pentru un robot manipulator);
- realizarea controlului poziției robotului manipulator prin legi de conducere convenționale în condiții normale și de defect datorat blocării uneia dintre articulații (3.4. Controlul robotului manipulator în condiții normale și în cazul blocării unei articulații);
- realizarea conducerii unui proces în condiții normale și de defect utilizând regulator convențional și metode de protecție la defectarea traductoarelor, efectuându-se o serie de simulări utilizând mediul Matlab și Simulink. Algoritmul a fost testat folosind echipamentul SRV-02 Quanser. În cadrul acestui experiment s-a considerat un bloc „Semnal de alarmă” prin care s-a pus în evidență funcționarea corectă a primului traductor (encoder) până la secunda 8 și a celui de-al doilea traductor (potențiomtru de poziție) până la secunda 16, semnalul având valoarea 0 și apariția defectului prin comutarea acestuia la valoarea 1. (3.5. Conducerea servomotorului SRV-02 Quanser în condiții normale și de defect utilizând regulator convențional);
- conducerea unui braț flexibil de robot în condiții normale și de defect, a elementelor de execuție utilizând LQR - regulator liniar pătratic (3.6. Conducerea sistemului Rotflex

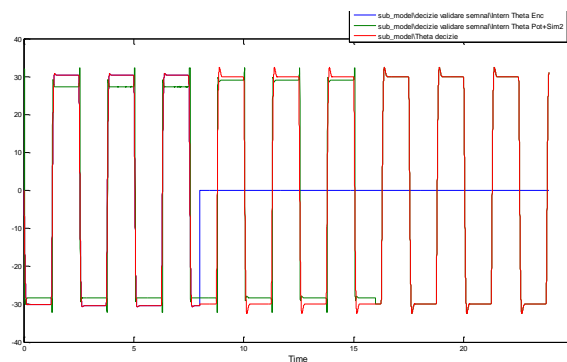
Quanser în condiții normale și de defect utilizând LQR). În cadrul acestui experiment s-a propus o schemă de control cu ajutorul căreia s-au simulat (în mediul Simulink) următoarele cazuri:

- funcționarea corectă fără defect;
- funcționarea cu defect fiind afectate pe rând cele două unghiuri:  $\theta$  (unghiul servomotorului) și  $\alpha$  (unghiul de deviație a brațului).

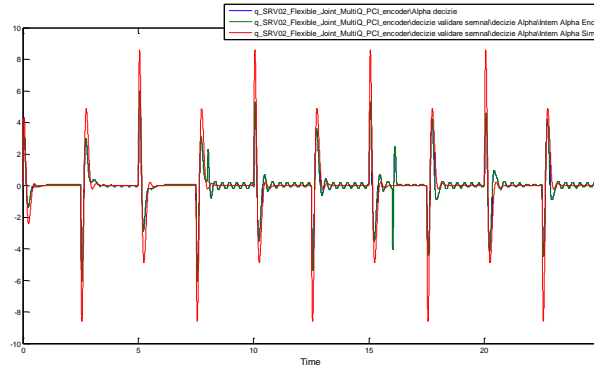
În urma studiilor efectuate se desprinde ca o cerință majoră necesitatea asigurării pentru echipamentele mecatronice ce operează la distanță a unui înalt grad de robustețe. Această condiție poate fi îndeplinită atât prin asigurarea unei redundanțe hardware cât și prin introducerea unei redundanțe analitice. S-a utilizat în experimentele de laborator atât redundanța hardware cât și redundanța analitică. Aceasta din urmă permite folosind mijloace software, detecția și localizarea defectelor și permite reconfigurarea procesului.



Sistemul Quanser SRV-02 cu echipamentul Rotflex atașat



Unghiul  $\theta$  (pentru SRV-02) măsurat de encoder și potențiomtru de poziție. Se observă defecțiunea apărută la encoder la secunda 8 și la potențiomtru la secunda 16. Sistemul este condus doar de semnalul simulat



Unghiul  $\alpha$  (pentru braț ROTFLEX )are o funcționare corectă, chiar dacă potențiometru și tahometru sunt defecte și se observă că la secunda 8 și 16 apar perturbații pe grafic în momentul când se trece pe un nou semnal de comandă combinat

#### **Capitolul 4: CONTROLUL LA DISTANȚĂ CU ÎNTÂRZIERE A SISTEMELOR MECATRONICE**

Acest capitol se ocupă cu studiul compensării întârzierii în controlul la distanță utilizând predictorul Smith. La început sunt prezentate câteva noțiuni generale privind termenul de compensare a întârzierii (4.1. Compensarea întârzierii în controlul la distanță) și de modelare a operatorului uman (4.2. Modelarea operatorilor umani în sistemele de control). În cazul în care întârzierile datorate propagării sunt mai mari decât perioada de eșantionare acestea se atașează sub forma unui timp mort procesului condus. Am obținut rezultate satisfăcătoare folosind atât teoreme ce validează condițiile de stabilitate ale sistemelor numerice cu timp mort cât și algoritmi de conducere specifici pentru această situație. Se propune o structură de control utilizând o variantă modificată a predictorului Smith. Din simulările efectuate a rezultat o comportare foarte bună, algoritmul dezvoltat având următoarele avantaje: structură simplă, ușor de implementat, și robustețe față de erorile de modelare. Consider că predictorul Smith poate fi implementat în regim de autoacordare dacă se determină automat timpii de întârziere din rețea. (4.4. Predictorul Smith în sistemele de control la distanță).

Tot în cadrul acestui capitol s-a studiat diagnoza unui sistem de control prin rețea (4.5. Diagnoza unui sistem controlat prin rețea), punându-se accent pe afectarea acestuia datorită:

- întârzierilor induse de rețea (4.5.1. Afectarea procesului de diagnoză de către întârzierile induse de rețea);
- pierderii pachetelor în rețea (4.5.2. Afectarea procesului de diagnoză de pierderea pachetelor în rețea).

În urma studiilor efectuate a reieșit că structurile de conducere la distanță pot fi echivalate cu conducerea unui proces cu timp mort.

Această echivalare este posibilă atâta timp cât perioada de eșantionare este mai mare decât întârzierile introduse de rețeaua de comunicație. Această condiție conduce la următorii pași ce trebuie parcurși atunci când se implementează un astfel de sistem.

- P1. Se analizează rețeaua de comunicație ce urmează a fi folosită și se determină experimental timpul mediu de propagare al unui pachet de date în regim full duplex.
- P2. Se studiază procesul și în funcție de dinamica acestuia se stabilește frecvența (perioada) de eșantionare. Se recomandă ca valoarea fixată să fie mai mare dar apropiată de valoarea de prag sub care controlul procesului ar fi imposibil.
- P3. Se sintetizează legea de reglare folosind după caz algoritmi standard specifici sistemelor de reglare numerică.

## **Capitolul 5: STUDII DE CAZ PENTRU CONTROLUL LA DISTANȚĂ CU ÎNTÂRZIERE**

Acest capitol se axează pe testarea și experimentarea unui sistem de control la distanță utilizând predictorul Smith modificat (5.1. Studii de caz utilizând predictorul Smith modificat).

În acest studiu se consideră că echipamentul de conducere este plasat la distanță față de procesul condus. Elementele de execuție primesc semnale de comandă prin intermediul rețelei de comunicație în timp ce datele achiziționate din proces de către traductoare sunt direcționate către controler tot prin intermediul rețelei. Datorită acestei topologii apar întârzieri suplimentare datorate transferului de date.

Aceste întârzieri de rețea pot fi clasificate din punct de vedere al direcției transferurilor de date ca: întârzieri senzor - controler  $\tau_{sc}$  și întârzieri controler – proces  $\tau_{ca}$ , aceste întârzieri fiind prezente atât pe calea directă cât și pe calea de reacție. Timpii de întârziere pot fi grupați, pentru ușurința analizei sub forma unei singure constante de timp  $\tau_c$ , denumită „întârziere de control”.

Ambele întârzieri introduse de rețea pot fi mai mici sau mai mari decât perioada de eșantionare  $T$ . În primul caz procesul poate fi condus în condiții optime (presupunând că nu se pierd pachete). În cel de-al doilea caz apar probleme majore de discontinuitate a procesului de conducere ceea ce poate să ducă la evoluții nesatisfăcătoare și la pierderea stabilității procesului.

În urma experimentelor efectuate se propun următoarele etape:

-evaluarea caracteristicilor dinamice ale procesului condus, inclusiv elementele de execuție și traductoarele (partea fixă a elementelor de reglare)

-alegerea perioadei de eșantionare cu respectarea condițiilor de stabilitate și performanță



-testarea rețelei ce va fi utilizată în procesul de conducere și/sau monitorizare; se au în vedere timpii de întârziere medii și probabilitatea de eroare (pierderea pachetelor).

În cazul în care acești timpii de întârziere sunt mult mai mici decât perioada de eșantionare necesară, procesul poate fi condus prin înglobarea în partea fixă a unui bloc de întârziere.

Dacă timpii de întârziere devin comparabili cu perioada de eșantionare atunci se recomandă utilizarea unei structuri ce folosește un predictor Smith.

Întârzieri  $\tau_{sc}$  și  $\tau_{ca}$  conțin cel puțin următoarele părți:

- Timpul de așteptare  $\tau_W$  - este o întârziere, în care o sursă (controlerul) trebuie să aștepte disponibilitatea de rețea înainte de a trimite pachetele de date.
- Timp  $\tau_F$  - este o întârziere datorată introducerii pachetului de date în rețea.
- Timpul de propagare  $\tau_P$  - este o întârziere datorată transmiterii pachetului de date prin rețeaua fizică. Timpul de propagare depinde de viteza de transport a semnalului și distanța dintre sursă și destinație.

Aceste trei tipuri sunt întârzieri fundamentale care au loc într-o rețea locală. În cazul în care pachetele de date sunt transmise pe rețea, pot exista întârzieri suplimentare, cum ar fi timpul de așteptare de la un switch sau un router, și timpul de propagare între nodurile rețelei. Întârzieri  $\tau_{sc}$  și  $\tau_{ca}$ , de asemenea, depind de alți factori, cum ar fi lungimea maximă a benzii și dimensiunile pachetelor de date.

Ca urmare a experimentelor efectuate am putut grupa în trei situații distincte conducerea la distanță a proceselor.

Caz 1: Control predictiv pentru sisteme cu întârziere.

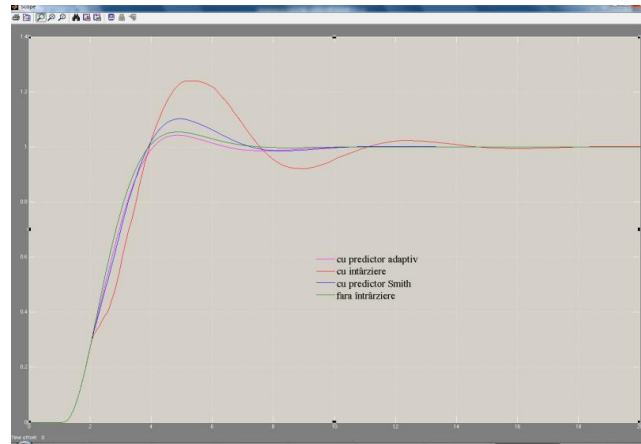
Caz 2: Control predictiv adaptiv utilizând o întârziere calculată a-posteriori: bazându-ne pe valorile experimentale ale întârzierilor s-a calculat o valoare medie care este utilizată în algoritmul de conducere.

Caz 3: Control predictiv adaptiv utilizând o întârziere variabilă estimată a-priori: bazându-ne pe valorile experimentale ale întârzierilor s-a estimat timpul de întârziere la următoarea perioadă de eșantionare.

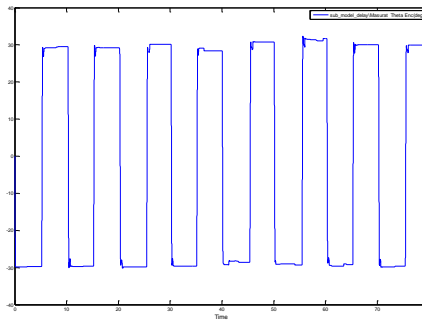
**Contribuțiile originale** revendicate de autor constau în determinarea:

- testarea controlului la distanță a unui proces utilizând predictorul Smith modificat în cazul apariției a două tipuri de întârziere: fixă și variabilă. În urma simulărilor efectuate utilizând mediul Matlab și Simulink s-a constatat că în cazul utilizării unei întârzieri fixe, apare un decalaj mai mare a răspunsului față de cazul utilizării unei întârzieri variabile (5.5.1. Controlul la distanță a unui motor de curent continuu utilizând predictorul Smith modificat);

- testarea controlului la distanță a unui proces utilizând un predictor adaptiv, realizându-se o serie de experimente în care s-au comparat răspunsurile în patru cazuri (5.5.2. Controlul la distanță a unui motor de curent continuu utilizând un predictor adaptiv):
  - fără întârziere;
  - cu întârziere variabilă;
  - cu predictor Smith;
  - cu predictor –structură adaptivă.
- testarea controlului la distanță a poziției servomotorului Quanser SRV-02, utilizând predictorul Smith modificat realizându-se o serie de experimente în timp real (5.2. Controlul poziției la distanță a unui servomotor Quanser SRV-02 utilizând predictorul Smith modificat).



Răspunsul procesului în cele patru cazuri: a) fără întârziere; b) cu întârziere variabilă; c) cu predictor Smith; d) cu predictor adaptive 4T



Unghiul  $\theta$  măsurat de encoder în cazul introducerii structurii cu predictor Smith –frecvența de generare a semnalului de comanda este de 0.1Hz