

**Răzvan Tudor TĂNASIE**

**Platforma grafică  
pentru aplicații virtuale  
inginerești**



**EDITURA UNIVERSITARIA  
Craiova, 2013**

Referenți științifici: Prof. univ. dr. Mircea IVĂNESCU  
Conf. univ. dr. Dorian DOGARU  
Conf. univ. dr. Daniela DANCIU

Copyright © 2013 Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria

---

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**

**TĂNASIE, RĂZVAN TUDOR**

**Platforma grafică pentru aplicații virtuale inginerești /**

Răzvan Tudor Tănăsie. - Craiova : Universitaria, 2013

Bibliogr.

ISBN 978-606-14-0631-9

004.4:62

Această lucrare a fost realizată în cadrul proiectului strategic POSDRU/89/1.5/S/61968, Proiect ID61968(2009), co-finanțat din Fondul Social European în cadrul Programului Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

# **INTRODUCERE**

Lucrarea de față se intitulează "Tehnici software avansate pentru conducerea prin vedere artificială a roboților". Domeniul fundamental al lucrării este știința ingineriei, iar domeniul este sisteme automate.

Robotica este un domeniu de știință în curs de formare, cu un pronunțat caracter multidisciplinar. Izvoarele sale se găsesc în domeniile de: teoria mecanismelor, transmisii mecanice, dinamica mașinilor, tehnologie, dispozitive, electronică industrială, calculatoare, automată, inteligență artificială, biomecatronică, economie, inginerie industrială, management, ergonomie, psihosociologia muncii.

Robotica se ocupa de cercetari fundamentale și fundamental orientate privind automatizarea operațiilor de manipulare a obiectelor în mediu industrial obișnuit, în medii inaccesibile sau greu accesibile operatorilor umani, în medicina și îngrijirea / recuperarea bolnavilor, în activități de servicii și casnice, în activități militare.

Structurile robotice hyper-redundante, identificate și prin sintagmele roboți tentaculari sau roboți continui, reprezintă o clasă de roboți de mare interes și în egală măsură de mare complexitate. Modelarea matematică a acestui tip de robot are în vedere atât abordarea cinematică cât și pe aceea dinamică. Modelele cinematice directe se bazează pe conceptul de segment curb și concatenarea acestor segmente pentru a forma un multisegment continuu.

Modelele cinematice inverse determină în principal variația comportamentului în timp a multisegmentului continuu. Modelele dinamice pentru acest tip de robot sunt de o deosebită complexitate datorită gradului mare de neliniaritate și se bazează pe sisteme de ecuații cu integrale și derivate parțiale. Complexitatea mare de la nivelul modelării matematice determină și complexitatea de la nivelul controlului unor astfel de structuri.

Din acest motiv au fost căutate diverse soluții de conducere a acestei clase de roboți, ca alternative la metodele clasice. Una dintre acestea este conducerea prin vedere artificială. Termenul de vedere artificială acoperă un domeniu de cercetare vast, cuprinzând numeroase tehnici, aplicații și discipline, dar este sumarizat în mod obișnuit ca "știința de a face un calculator să vadă...".

Cu toate acestea, scopul este adesea acela de a permite calculatorului să înțeleagă ce vede, și aici știința îmbracă aspecte de inteligență artificială. Înțelegerea artificială, sau interpretarea, a unei scene este derivată din percepția umană și încercarea de a mima funcționalitatea sistemului vizual uman. Este natural să se încerce emularea modului în care oamenii percep sau interpretează lumea și această tehnică a fost instrumentată de-a lungul cercetărilor în domeniu vederii artificiale, cu dezvoltări cum ar fi reconstrucția stereoscopică.

Una din tehnicile fundamentale este cea a vederii bazată pe modele. Planul imaginii unei camere este similar retinei ochiului uman și imaginilor proiectate pe ea sunt proiecții 2D ale lumii 3D. Această pierdere de informație nu reprezintă un obstacol

pentru creierul uman care interpretează imaginile perfect, actualizând constant modelul său pentru lumea reală.

Abilitatea de a judeca adâncimea la care se află obiectele ce apar pe retină dă indicii esențiale despre structura acestei lumi. Cu toate acestea, chiar și atunci când aceste informații stereoscopice nu sunt disponibile, creierul uman poate totuși să interpreteze scena și să estimeze corect poziția și orientarea obiectelor. Acest fapt este datorat bazei imense de cunoștințe pe care creierul o acumulează despre lumea reală 3D, legile acesteia, formele și structurile obiectelor și cum se proiectează ele pe retină.

Procesarea imaginilor digitale permite evidențierea caracteristicilor de interes din imagini în timp ce se atenuează detaliile irelevante pentru o aplicație dată, și apoi, extragerea informațiilor utile despre scenă din imaginea îmbunătățită. Această introducere este un ghid practic despre provocările și hardware-ul și algoritmi folosiți pentru rezolvarea acestora. Imaginile sunt produse de o varietate de dispozitive fizice, incluzând camere video, dispozitive cu raze X, microscopie electronică, radare, dispozitive cu ultrasunete, și sunt folosite pentru o varietate de scopuri, incluzând distracție, medicină, afaceri, industrie, armată, civil, securitate, științific.

Scopul, în fiecare din aceste cazuri, este ca un observator, uman sau mașină, să extragă informații despre scena din imagine. De multe ori imaginea neprelucrată nu este direct utilizabilă pentru acest scop, și trebuie să fie procesată într-un anumit fel. Această procesare se numește îmbunătățirea calității imaginii; procesarea de către un observator pentru a extrage informații este numită analiza imaginii. Îmbunătățirea calității și analiza sunt distinse de rezultatele lor, imagini vs. Informații din scenă, și de către provocările întâmpinate și de către metodele folosite.

O tehnică de folosire a vederii artificiale în conducerea roboților este visual servoing-ul. O modalitate de a utiliza informațiile vizuale în aplicațiile robotice presupune o succesiune de operații: achiziția imaginii, prelucrarea imaginii, extragerea de informații utile din imagine și comanda robotului în funcție de obiectivul propus și de informațiile obținute anterior – pe scurt, privește și apoi acționează.

Alternativ, pentru a crește performanța unui sistem robotic, se poate folosi o reacție inversă – o buclă de reglare – bazată pe informații vizuale, manieră care este identificată prin termenul visual servoing. Scopul unui sistem de visual servoing este de a controla mișcarea unui robot și de a-l conduce pe acesta prin spațiul de lucru până la țintă, folosind informații obținute din imaginile digitale ce sunt achiziționate de la o cameră sau un sistem de camere digitale.

Sistemele care realizează servocontrolul vizual (visual servoing) se pot clasifica în două categorii:

- sisteme bazate pe informația vizuală extrasă din imagini (IBVS image-based visual servoing): semnalul de eroare este măsurat direct în imagine și ulterior folosit pentru a influența semnalul de control furnizat acțiunii;
- sisteme bazate pe informația legată de poziție (PBVS position-based visual servoing): aici se utilizează tehnici de vedere artificială și grafică pe calculator

pentru a reconstrui mediul 3D în care evoluează robotul, iar mărimea de control a acțiunii se calculează pe baza informației astfel obținute.

Unul din avantajele principale ale controlului bazat pe imagine este acela al acurateții poziționării sistemului care este și mai puțin sensibilă la calibrarea camerei. Multe task-uri pot fi descrise în termenii mișcării caracteristicilor imaginii, de exemplu, alinierea elementelor vizuale din cadrul unei scene. Aceasta a fost descrisă ca o abordare generalizată a visual servoing-ului asupra caracteristicilor imaginii cu traiectorii specificate în spațiul caracteristicilor – determinând traiectorii independente de geometria țintei.

Este citat de asemenea exemplul robotului care prinde o minge. Prin observarea elementelor vizuale cum ar fi mingea, brațul pivotant, task-ul de interceptare poate fi specificat, chiar dacă relația dintre cameră și braț nu este cunoscută apriori. Literatura de specialitate utilizează un generator de caracteristici ale spațiului traiectoriei pentru a interpola valorile parametrilor datorită ratei reduse de actualizare a sistemului utilizat.

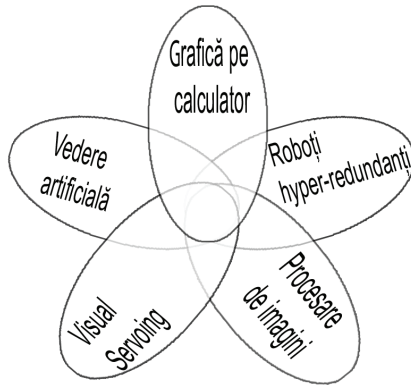
Aplicațiile de visual servoing virtual (cum ar fi un sistem grafic pentru aplicații de visual servoing virtual) se dovedesc un pas foarte util în realizarea unui sistem de conducere a roboților bazat pe visual servoing.

Dintre avantajele multiple ale unui astfel de simulator, trebuie amintite: costurile extrem de reduse pentru a putea lucra cu diverse configurații de roboți hyper-redundanți; posibilități nelimitate de test a diferitelor legi de conducere fără riscuri de a deteriora roboții; folosirea în procesul de calibrare stereo a sistemului real de visual servoing; urmărirea evoluțiilor modelelor de cinematică inversă sau de dinamică dezvoltate folosind metode bazate pe diferențe unghiulare; și nu în ultimul rând, avantaje educaționale.

Aceste aplicații grafice reprezintă unelte pentru îmbunătățirea calității procesului educațional în procesul de predare a conducerii roboților. Pentru tinerii studenți un simulator grafic este mai atractiv, mai ușor de urmărit și un stimulent pentru o învățare mai rapidă și mai corectă a comportamentului roboților în diverse aplicații de conducere. De asemenea, aceste aplicații pot fi folosite și în cadrul instruirii la distanță, fiind vorba de sisteme software ce pot fi ușor portate pe un alt calculator.

Prin tematica abordată, lucrarea de față se află la intersecția a cinci mari domenii (Figura 1):

- Roboți hyper-redundanți,
- Vedere artificială,
- Procesare de imagini,
- Visual Servoing,
- Grafică pe calculator.



**Figura 1.** Domeniul lucrării.

Lucrarea este structurată pe șase capitole:

- Capitolul 1 – Roboți hyper-redundanți;
- Capitolul 2 - Visual servoing;
- Capitolul 3 - Mediu de dezvoltare pentru aplicații de conducere pentru roboți hyper-redundanți – aplicații de cinematică;
- Capitolul 4 - Mediu de dezvoltare pentru aplicații de conducere pentru roboți hyper-redundanți – aplicații de dinamică;
- Capitolul 5 - TEROB6 – Sistemul de vedere artificială;
- Capitolul 6 - TEROB6 – Sistemul de conducere prin visual servoing.

Capitolul 1 prezintă stadiul actual în domeniul roboților hyper-redundanți. Se prezintă o clasificare a manipuletoarelor și se insistă asupra roboților continui și a avantajelor oferite de aceștia. Pentru aceștia se prezintă un model cinematic, prezentându-se modul de calcul al Jacobian-ului. Odată prezentat modelul cinematic, se descrie un model dinamic pentru această clasă de roboți și se identifică parametrii pentru acest model.

În capitolul 2 este realizată o prezentare a ceea ce înseamnă visual servoing și aplicații în acest domeniu. Sunt prezentate arhitecturile de visual servoing și caracteristicile fiecăreia din acestea, precum și Jacobian-ul imaginii. Apoi sunt prezentate mai multe aplicații de visual servoing, insistându-se pe aspectele de procesare de imagini.

Capitolul 3 prezintă mediul grafic de dezvoltare pentru aplicații de conducere pentru roboți hyper-redundanți și aplicațiile proiectate și dezvoltate în cadrul acestuia pentru problemele de cinematică directă și inversă. Este prezentat motorul grafic realizat pentru această aplicație și tehnicile folosite în cadrul acestuia. Sunt prezentați algoritmi proiectați și implementați, atât în domeniul grafic (randare și animație), cât și în cadrul modelelor cinematice. Este proiectat și implementat un evaluator de expresii și un derivator de expresii pentru modelul cinematic 3D. În finalul fiecărui subcapitol sunt prezentate testele experimentale realizate și sunt trase concluzii.

Capitolul 4 prezintă mediul grafic de dezvoltare pentru aplicații de conducere pentru roboți hyper-redundanți și aplicațiile proiectate și dezvoltate în cadrul acestuia pentru problemele de dinamică. Este prezentat modelul dinamic folosit pentru un manipulator atât cu încărcare, cât și fără încărcare și algoritmul de conducere aferent. Sunt prezentate funcțiile adiționale aduse la motorul grafic pentru a simula aceste modele. În final sunt prezentate testele experimentale realizate cu acest simulator și în MATLAB și sunt trase concluzii.

Capitolul 5 prezintă sistemul de vedere artificială folosit. Sunt prezentate noțiunile de vedere artificială folosite. Este descris sistemul de vedere artificială ce a fost construit. De asemenea sunt descriși doi algoritmi de calibrare ce au fost proiectați și implementați, unul folosind obiecte special construite pentru acest proces și un al doilea care face uz de mediul grafic de dezvoltare prezentat în capitolele anterioare. În final sunt prezentate rezultatele obținute la scenariile de test realizate pentru a demonstra validitatea și eficacitatea algoritmilor proiectați și implementați.

În capitolul 6 este prezentat sistemul de conducere prin visual servoing realizat și sunt prezentate funcțiile de procesare de imagini proiectate, adaptate și implementate. Sunt prezentate aspectele teoretice necesare, modul de control al camerelor, aplicația de achiziție și procesare de imagini și algoritmul de conducere prin visual servoing.

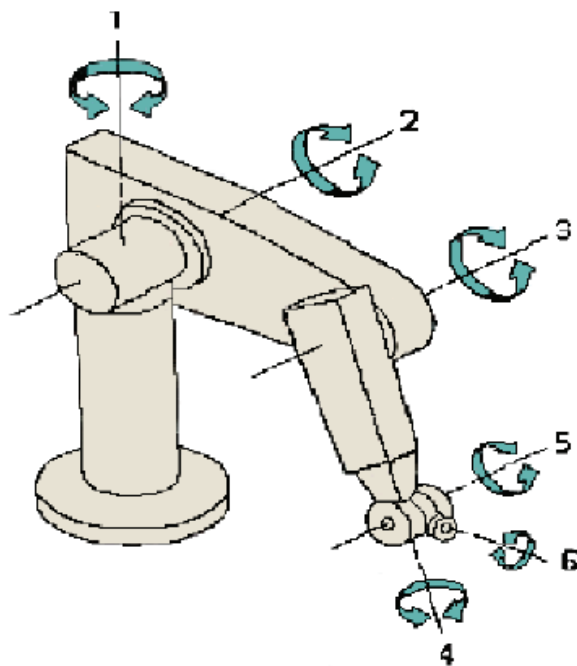
În final o serie de concluzii sunt trase raportat la motorul grafic și la modelele matematice dezvoltate. Sunt prezentați pe scurt algoritmi proiectați și implementați pentru modelele de cinematică directă, inversă și dinamică, motorul grafic creat și tehnicile folosite pentru randare și animație, modelele matematice dezvoltate, algoritmi de calibrare realizați, metodele de achiziție și prelucrare de imagini, și, bineînțeles, algoritmul de conducere prin visual servoing.

# CAPITOLUL 1 ROBOȚI HYPER-REDUNDANȚI

## 1.1. ROBOȚI HYPER-REDUNDANȚI – STADIUL ÎN DOMENIU

### 1.1.1. Introducere

În ultimele decade, cercetarea în domeniul manipuloarelor s-a focalizat îndeosebi asupra modelelor asemănătoare ca structură brațului uman, și care pot fi descrise ca manipuloare discrete. Proiectarea acestor manipuloare se bazează pe un număr redus de articulații acționate, conectate în serie prin intermediul unor elemente structurale rigide, după cum se poate observa în Figura 1.1



**Figura 1.1** Robot manipulator convențional constituit din elemente rigide

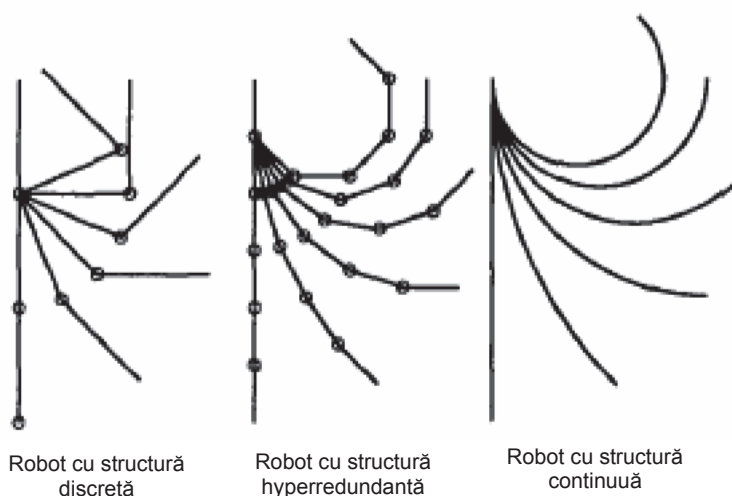
Această clasă de roboți manipulatori s-a dovedit a fi foarte eficientă și utilă în execuția unei varietăți foarte mari de sarcini, însă, de asemenea, prezintă și o serie de limitări. Acești roboți au adeseori între 5 și 7 grade de libertate, astfel că, de regulă, au nevoie de toate gradele de libertate disponibile doar pentru a poziționa terminalul efector în spațiul de operare. Această structură este foarte eficientă pentru



mediile deschise, însă pe măsură ce apar diverse constrângeri în spațiul de operare, nu este exclus ca robotul să nu mai poată aduce efectorul în poziția dorită. Această nerezolvată apare ca urmare a lipsei unui număr suficient de grade de libertate ale robotului, acesta nefiind capabil să îndeplinească simultan atât cerințele legate de constrângerile spațiului de operare, cât și cele legate de cerințele de poziționare ale terminalului efector.

Un alt inconvenient pe care manipulatoarele discrete îl prezintă se referă la necesitatea utilizării unor dispozitive specializate pentru manipularea unui obiect. Cel mai adesea, operația de manipulare a obiectelor este executată de către un gripper atașat robotului, care adus într-o poziție convenabilă este capabil să prindă obiectul.

Manipulatoarele directe pot câștiga o manevrabilitate și o flexibilitate îmbunătățite prin adăugarea mai multor grade de libertate. Această situație poate fi raportată la diversitatea exemplelor de manipulatoare existente în natură. După cum s-a enunțat anterior, manipulatoarele discrete se aseamănă foarte mult, ca și structură, cu brațul uman, însă dacă se analizează cu atenție și alte moduri de manipulare existente în natură, se poate ușor observa că există și alte structuri care pot realiza cu succes operații de manipulare. Dintre exemplele de astfel de bio-manipulatoare putem enumera modul de mișcare al șarpelui, al caracatiței, precum și multiplele funcționalități ale trompei elefantului. În cazul acestor exemple, mișcarea se produce de către anumite părți ale corpului (tentacule, în cazul caracatiței, tot corpul în cazul șarpelui, sau trompa în cazul elefantului), mișcări care permit manipularea efectivă și eficientă a obiectelor chiar dacă aceste părți ale corpului sunt foarte diferite, din punct de vedere structural, de brațul omului. Deși, din punct de vedere morfologic, diferă foarte mult, toate aceste exemple au în comun numărul mare de grade de libertate.



**Figura 1.2.** Diferențele structurale existente între roboții cu structură discretă, hyperredundantă, continuuă.

Cercetările efectuate în domeniul manipuloarelor cu un număr mare de grade de libertate, sau a celor care să prezinte o manevrabilitate foarte bună, au condus la apariția unor prototipuri foarte diversificate. Roboson a propus gruparea acestor tipuri de roboți în trei mari clase. Prima clasă, denumită „discretă”, cuprinde roboții cu structură convențională. Pe măsură ce numărul articulațiilor discrete crește, și o dată cu acesta și redundanța dar și manevrabilitatea manipulatorului, roboții care prezintă astfel de configurații sunt clasificați ca aparținând celei de-a doua clase, a roboților sinuoși, cu o formă de șarpe. Aceste manipuloare sunt formate din numeroase articulații conectate prin legături rigide foarte scurte, constituind o structură foarte mobilă a cărei formă aparentă se prezintă sub forma unei curbe netede, asemenea corpului unui șarpe. Ce-a de-a treia clasă de roboți este cea a roboților continui, care nu mai conțin articulații discrete sau legături rigide. Manipulatorul se ondulează continuu în lungul său prin intermediul deformației elastice iar mișcarea se produce prin generarea de curbe netede, asemănătoare corpurilor biologice precum și a tentaculelor anumitor specii din regnul animal. Trebuie subliniat faptul că există diferențe fundamentale între cele trei clase de roboți, după cum se poate observa și din figura 1.2. În continuare se va aborda problematica roboților continui.

### 1.1.2. Roboți continui

Considerând definiția propusă de Roboson, corpul roboților continui nu conține nici articulații și nici legături rigide, astfel că structura lor este complet diferită de cea a roboților convenționali. De asemenea, și mișcarea acestora este mult mai naturală mai apropiată de mișcările biologice existente în natură. Organe precum limba, tentaculele sau trompele elefanților prezintă o largă varietate de abilități prin intermediul cărora animalele pot interacționa și manipula mediul în care se află.

Astfel, pornind de la aceste modele, s-au realizat o serie de manipuloare care au fost utilizate în implementarea cu succes a unei largi varietăți de aplicații, majoritatea vizând prinderea și manipularea diverselor obiecte într-un mediu de operare foarte restrictiv, ce impune prezența unui număr mare de grade de libertate pentru brațul robotic. De asemenea, roboții continui prezintă o serie de proprietăți care fac din utilizarea lor soluția ideală pentru aplicații, unde au rolul de degete artificiale sau gripere avansate. Un exemplu în acest sens este mâna artificială realizată de D.M. Lane; degetele acestui robot sunt realizate din tentacule acționate cu fluid, care revin la forma inițială datorită rezistenței interne la arcuire a materialului din care sunt realizate, iar flexiunea degetului se realizează prin deformare elastică, neavând elemente mecanice în mișcare. Sistemul de măsurare a forței exercitate asupra suprafeței degetului este compus din mărci tensometrice, plasate într-un elastomer din silicon. Determinarea alunecărilor care apar pe suprafața degetului se realizează prin utilizarea unor benzi piezoelectrice care au rolul de a determina vibrațiile existente la suprafața degetului, plasate la 1 mm sub suprafața elastomerului.

Rezistența structurală internă la arcuire are rolul de a crește stabilitatea prinderii obiectului, dar și de a reduce efectul de distrugere locală a obiectelor mai fragile, în zona de contact cu gripperul. Lipsa părților mecanice mobile elimină problemele ridicate de existența forțelor de frecare precum și reducerea riscului contaminării mediului de operare cu substanțe poluante, precum uleiuri sau vaseline provenite de