Sorin DUMITRU
Mircea IVĂNESCU
Dorian COJOCARU

SOLUŢII DE ACŢIONARE ŞI CONDUCERE PENTRU ROBOŢI HIPER-REDUNDANŢI

Sorin DUMITRU
Mircea IVĂNESCU
Dorian COJOCARU

SOLUŢII DE ACŢIONARE ŞI CONDUCERE PENTRU ROBOŢI HIPER-REDUNDANŢI

Editura UNIVERSITARIA
Craiova, 2014

Editura PROUNIVERSITARIA
Bucureşti, 2014

Referenţi ştiinţifici:
Prof. dr. ing. Mircea NIŢULESCU
Prof. dr. ing. Viorel STOIAN

Copyright © 2014 Editura Universitaria
Copyright © 2014 Editura Pro Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria
şi Editurii Pro Universitaria

Nicio parte din acest volum nu poate fi copiată fără acordul scris al editorului.

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
DUMITRU, SORIN
Soluţii de acţionare şi conducere pentru roboţi hiper-redundanţi / Sorin Dumitru, Mircea Ivănescu, Dorian Cojocaru. – Craiova : Universitaria ; Bucureşti : Pro Universitaria, 2014
Bibliogr.
ISBN 978-606-14-0889-4
ISBN 978-606-26-0171-3

I. Ivănescu, Mircea
II. Cojocaru, Dorian

62

Lucrarea a fost realizată şi tipărită în cadrul proiectului „Soluție pentru acționarea distribuită decuplată a robotului hiper-redundant HIPROB I”, finanţat prin competiţia internă de granturi, 18C/27.01.2014, Universitatea din Craiova.

CAPITOLUL 1
ARHITECTURI TENTACULARE

1.1 Arhitecturi tentaculare/hiper-redundante. Stadiu la zi

Un manipulator tentacular ideal reprezintă un braţ robotic neconvenţional cu o mobilitate foarte mare. Posedă capacitatea de a realiza forme sofisticate şi de a atinge orice poziţie şi orientare în spaţiul tridimensional. Manipulatorul tentacular este un manipulator hiper-redundant sau un manipulator cu foarte multe grade de libertate.

Roboţii tradiţionali au la bază structuri rigide ce limitează abilităţile acestora de a interacţiona cu mediul lor. De exemplu, manipulatoarele robotice convenţionale prezintă legături rigide şi pot manipula obiecte numai prin folosirea elementului terminal special. Aceşti roboţi întâlnesc adesea dificultăţi în operarea în medii nestructurate şi foarte aglomerate, cu restricţii.

Pentru manipularea în spaţii cu restricţii severe, în literatura de specialitate au fost dezvoltate structuri particulare de roboţi cu mare mobilitate, ce permit acestora să opereze cu performanţe satisfăcătoare.

Majoritatea acestor roboţi sunt de inspiraţie biologică şi au ca referinţă structuri binecunoscute în lumea animală, cum ar fi tentaculul caracatiţei, trompa de elefant, şarpele etc.

S-a observat faptul că există o varietate de animale şi plante ce prezintă mişcări complexe având structuri uşoare, lipsite de componente rigide. Hidrostaturile musculare (de exemplu braţul de caracatiţă şi trompa de elefant) sunt aproape în întregime compuse din muşchi şi ţesuturi de legatură şi celulele plantelor putându-şi de asemenea modifica forma atunci când sunt presate de osmoză. Cercetătorii s-au inspirat din biologie pentru construcţia şi proiectarea roboţilor soft. Cu o structură uşoară şi grade de libertate redundante, aceşti roboţi pot fi utilizaţi pentru a îndeplini sarcini complexe în medii dezordonate şi/sau nestructurate. În continuare vor fi prezentate capacităţi ale roboţilor soft, vor fi descrise câteva exemple din natura ce oferă inspiraţie biologică şi, de asemenea, va fi realizată o scurtă trecere în revistă a lucrărilor ştiintifice elaborate în domeniu şi o evidenţiere a provocărilor privind design-ul, modelarea, fabricarea şi controlul roboţilor soft.

Roboţii pot fi clasificaţi ca fiind hard sau soft în funcţie de materialele ce stau la baza confecţionării acestora, după cum se poate observa în fig. 1.1. Un robot soft este în mod inerent conformabil şi prezintă o forţă mare în operaţiile normale. În anul 2008, Deepak Trivedi ş.a. [186] au publicat lucrarea “Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research” în care aceştia prezintă un stadiu la zi privind cercetarea manipulatoarelor continue inspirate din biologie, prezentând totodată şi o clasificare a acestora. În ultimii 15 ani,

cercetătorii au dezvoltat astfel de roboţi ce prezintă abilităţi noi relative la roboţii tradiţionali. Roboţii tradiţionali cei mai des utilizaţi sunt roboţii cinematici neredundanţi. Aceşti roboţi sunt de obicei utilizaţi în medii bine definite, în care, în mod repetat, execută o mişcare prescrisă cu o precizie foarte bună. Aceşti roboţi sunt construiţi pentru a fi rigizi, astfel încât vibraţia şi deformarea structurii să nu le reducă acurateţea mişcării. În general, roboţii tradiţionali prezintă articulaţii flexibile multiple, conectate prin legături rigide. Fiecare articulaţie este flexibilă într-o direcţie rotativă sau translaţională pentru a oferi un grad de libertate al mişcării robotului. Mişcarea combinată a tuturor gradelor de libertate acoperă întregul spaţiu de lucru sau locul geometric al punctelor, astfel încât poziţia indicată să poată fi obţinută cu uşurinţă. Roboţii tradiţionali (hard) sunt hiper-redundanţi atunci când numărul articulaţiilor este foarte mare. Roboţii construiţi din materiale „grele”, cum ar fi aliaje cu memoria formei (SMAS), pot fi de asemenea proiectaţi pentru a avea deformări continue şi un număr infinit de grade de libertate. Roboţii hiper-redundanţi au potentialul de a lucra în medii nestructurate şi de a oferi o dexteritate mare.

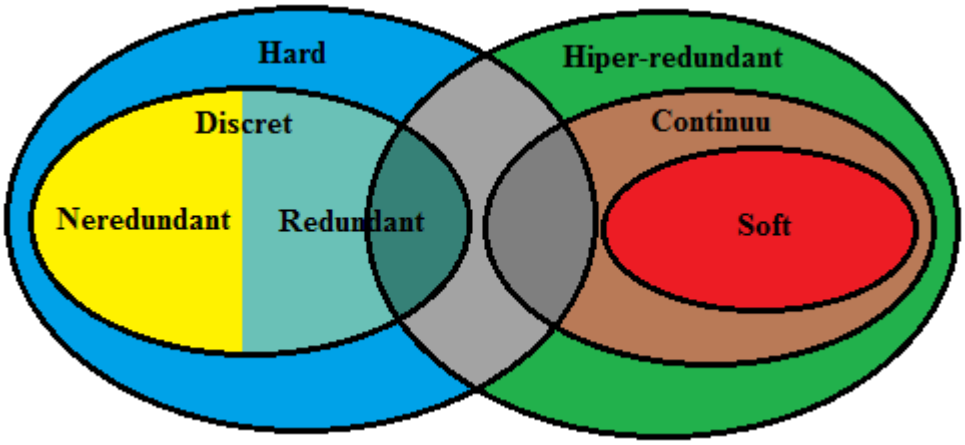

Fig. 1.1. Clasificarea roboţilor bazată pe materiale şi grade de libertate. Suprafaţa haşurată reprezintă mulţimea goală

Roboţii soft şi cei hard folosesc mecanisme diferite pentru a putea avea o dexteritate mobilă (vezi fig. 1.2.a). Roboţii soft prezintă o deformaţie distribuită, având, din punct de vedere teoretic, un număr infinit de grade de libertate. Acest lucru conduce la un spaţiu de lucru cu o configuraţie hiper-redundantă, unde robotul poate atinge fiecare punct în spaţiul tridimensional, putând folosi un număr infinit de forme şi configuraţii. Acest tip de roboţi prezintă un avantaj adiţional faţă de roboţii tradiţionali hiper-redundanţi, şi anume faptul că generează o rezistenţă minoră la forţele de compresiune şi astfel se pot conforma la apariţia obstacolelor (pot îndeplini astfel sarcini fragile şi fine fără a deteriora). Folosind un efort de deformare mare, se pot strecura prin deschideri mai mici decât mărimea lor iniţială. Acest lucru îi face ideali pentru aplicaţii cum ar fi roboţii personali ce

interacţionează cu oameni fără a răni, roboţi ce asigură service-ul sau pictează, ce au nevoie de o dexteritate foarte mare pentru a ajunge în spaţiile limită, roboţi medicinali (în mod special pentru utilizarea lor în chirurgie), roboţi de apărare şi salvare ce operează în medii nestructurate.

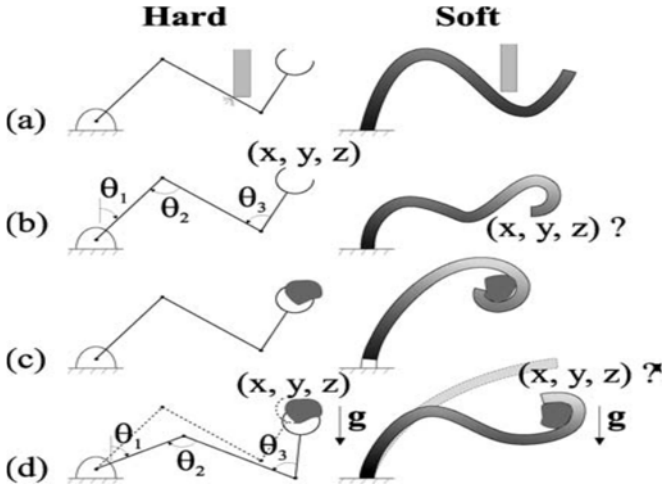

Fig. 1.2. Caracteristicile roboţilor hiper-redundanţi : a. dexteritate; b. senzor de poziţie; c. manipulare; d. încărcare

Roboţii soft diferă de cei "hard", hiper-redundanţi (roboţii cu structură ca a şarpelui şi cu forma continuă). S. Hirose [95] a revăzut aplicaţiile, cinematica şi proiectarea roboţilor care au structură asemănatoare cu a şarpelui.

Robinson şi Davies [162] au prezentat un mic rezumat al roboţilor cu forma continuă, făcând diferenţa faţă de cei discreţi (neredundanţi) şi cei cu structura hiper-redundantă. Aceştia au clasificat roboţii cu forma continuă în roboţi intrinseci, extrinseci sau hibrizi, în funcţie de metoda şi locaţia executorului mecanic.

Simaan ş.a. [169] a prezentat un rezumat al dispozitivelor ce se îndoaie precum un şarpe, folosite pentru chirurgia minimală invazivă (MIS) a gâtului.

Gradele de libertate finite şi controlabile ale unui robot soft sunt date de către dispozitivul de acţionare al acestuia. Roboţii cu legături rigide au un dispozitiv de acţionare, de obicei acesta fiind un motor electric, pentru fiecare articulaţie. Deformarea ce rezultă din activarea unui sistem de acţionare este definită de mecanismul de acţionare, de efortul şi de mărimea actuatorului, forma şi locaţia acestuia în structura robotică. Acest tip de roboţi se încadrează într-o clasă de sisteme şi sunt numiti "subacţionaţi" deoarece, spre deosebire de roboţii tradiţionali (hard), nu există un executor pentru fiecare grad de libertate. Alte grade de libertate ar putea fi influenţate de către sistemele de acţionare, dar majoritatea gradelor de libertate nu sunt controlabile.

Tabelul 1.1. Caracteristici ale diferitelor tipuri de roboţi traditionali (hard) (primele trei coloane) şi roboţi soft

	Rigid	Hiper-redundant discontinuu	Continuu compact	Soft
Proprietăţi				
Grade de libertate	Număr redus	Număr mare	Infinit	Infinit
Actuatori	Număr redus, separaţi	Număr mare, separati	Continuu	Continuu
Deformabilitatea materialului	Nu	Nu	Scăzută	Foarte ridicată
Materiale	Metal, plastic	Metal, plastic	Aliaje cu memoria formei	Cauciuc, polimer electroactiv
Caracteristici				
Acurateţe	Foarte mare	Mare	Mare	Scăzută
Capacitatea de încărcare	Mare	Scăzută	Scăzută	Cea mai scăzută
Siguranţa	Periculos	Periculos	Periculos	Sigur
Dexteritate	Nivel scăzut	Nivel înalt	Nivel înalt	Nivel înalt
Mediu de lucru	Numai structurat	Structurat şi nestructurat	Structurat şi nestructurat	Structurat şi nestructurat
Obiecte ce pot fi manipulate	Mărimi fixe	Mărimi variate	Mărimi variate	Mărimi variate
Manipulare în mediu cu obstacole	Nu	Bună	Acceptabilă	Foarte bună
Design				
Controlabilitate	Uşor	Mediu	Dificil	Dificil
Planificarea traiectoriei	Uşor	Greu	Dificil	Dificil
Determinarea poziţiei	Uşor	Greu	Dificil	Dificil
Modele de inspiraţie biologică	Membrele mamiferelor	Şerpi, Peşti		Hidrostraturi musculare

Controlarea şi identificarea formei unui robot soft reprezintă o mare provocare. Structura acestora este continuă, deci măsurători exacte ale formei şi poziţiei dorite se pot realiza cu dificultate. Roboţii tradiţionali (hard) măsoară poziţia fiecărei articulaţii printr-o codificare cu o mare rezoluţie, după cum se poate observa în Fig. 1.2.b. Presupunând un robot tradiţional (hard), poziţiile articulaţiei

pot fi procesate prin cinematica directă pentru a determina cu acurateţe forma şi poziţia finală a robotului. În mod asemănător, cinematica inversă poate fi folosită pentru a determina poziţiile articulaţiei ce oferă poziţia finală dorită. Poziţiile articulaţiei măsurate prin codificatori sunt comparate cu poziţiile dorite calculate prin cinematica inversă şi deci sistemele de acţionare conduc erorile către zero. Această servo-acţiune este destul de rapidă şi forţează articulaţiile să urmărească în mod precis poziţiile dorite.

Roboţii cu forma continuă interacţionează cu mediul în mod diferit faţă de cei tradiţionali (hard). Mediul aplică încărcări structurii atât prin încărcare distribuită (gravitaţia), cât şi prin contact. În cazul unui robot cu legături rigide, fig. 1.2.c arată faptul că încărcarea cauzează modificarea poziţiei articulaţiilor uşoare (soft), în timp ce legăturile rigide rămân drepte. Codificatorii măsoară modificarea poziţiei şi controlerul poate fie să compenseze încărcarea, fie să înţeleagă că robotul a luat contact cu împrejurimile. În oricare caz, atât forma cât şi poziţia finală pot fi determinate cu precizie. Gravitatea şi contactul cauzează o deformare continuă la un robot cu forma continuă, deformare ce ar putea să nu fie observabilă sau controlabilă de către senzorii limitaţi şi, respectiv actuatori.

Contactul şi conformarea cu mediul înconjurător joacă un rol important în mobilitatea roboţilor soft. De exemplu, braţele roboţilor cu formă continuă folosesc manipularea completă a braţului pentru a apuca şi manevra obiecte de mărimi diferite ca în fig.1.2.d. Braţul se înfăşoară în jurul obiectului şi printr-o apucare precisă şi o frecare ridicată îi este permis braţului să ridice obiectul. Braţele roboţilor tradiţionali (hard) apucă şi manipulează obiecte cu un capăt executant specializat ce este proiectat special pentru un obiect cu o anumită mărime şi formă. Roboţii soft se pot deplasa prin utilizarea diferitelor tipuri de mers, având o parte considerabilă ce intră în contact cu solul în orice moment. Roboţii tradiţionali (hard) folosesc picioare separate, şenile şi roţi pentru a intra în contact cu solul şi pentru a permite realizarea deplasării.

Fig. 1.3 prezintă modul în care braţul unui robot cu forma continuă se deformează sub diferite încărcări gravitaţionale şi acţionări combinate. Roboţii hard pot să ghideze braţul în orice formă dacă legăturile sunt suficient de rigide şi încărcarea este foarte mică. Actuatorii braţului unui robot cu forma continuă de obicei aplică un moment sau un cuplu la capătul braţului. Pentru deplasări mici, acest moment cauzează îndoirea braţului în sus într-o formă pătratică. Într-un mediu gravitaţional, greutatea proprie îndoaie braţul în jos într-o formă cubică. Momentul capătului poate fi ajustat să ridice capătul la orizontală, dar braţul va avea o formă non-zero asociată cu diferenţa dintre forma pătratică şi cea cubică [159]. În mod asemănător, dacă un senzor este însărcinat să măsoare momentul la baza braţului robotului cu formă continuă, nu pot fi făcute diferenţe între punctul de încărcare al capătului şi încărcarea distribuită. Totuşi, aceste încărcări produc forme diferite ale braţului.

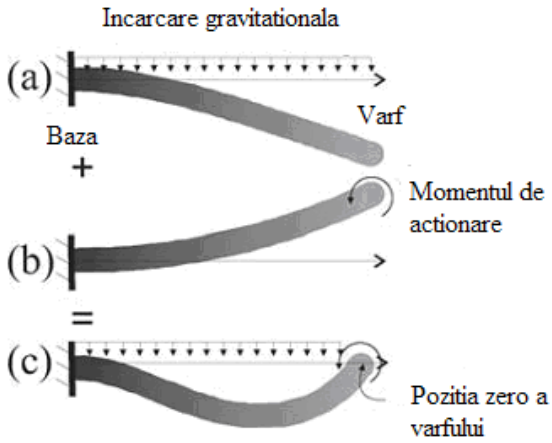

Fig. 1.3. a. Încărcarea gravitaţională la un manipulator robotic cu forma continuă provoacă deviere în jos; **b.** actuatorii îndoaie structura în sus; **c.** deplasarea netă are poziţia zero a actuatorului, dar forma non-zero

Inspiraţia din biologie

În natură există numeroase exemple de structuri mobile realizate din materiale uşoare (soft). Hidrostaturi musculare, cum ar fi trompa elefantului, limbile mamiferelor şi şopârlelor, precum şi braţul de caracatiţă, reprezintă structuri uşoare (soft) ce se pot îndoi, extinde şi răsuci. Fibra de armare în pereţii celulari ai plantelor uşoare (soft) permite celulelor să îşi modifice forma atunci când sunt sub presiune. Pentru dezvoltarea roboţilor cu formă continuă mimica acestor structuri complexe nu este nici necesară, nici practică. Înţelegerea fundamentală a morfologiei şi functionalităţii structurilor usoare (soft) în natură este în creştere şi poate conduce la concepte noi de proiectare în robotica cu formă continuă. Lumea naturală demostrează capacităţile potenţiale ale roboţilor soft.

Scheleţi hidrostatici şi hidrostaturi musculare

O clasă particulară de animale ca viermii şi anemonele de mare, nu au schelet cu articulaţii rigide care poate fi întâlnit, de exemplu, la vertebrate (mamifere, păsări şi reptile) şi antropode (insecte, crabi). În schimb, aceste animale cu corpuri uşoare (soft) depind de un schelet hidrostatic pentru suport [29] [30] [34] [81]. Scheleţii hidrostatici sunt cilindrici, cu cavităţi pline de fluid, înconjurate de către un perete muscular ce este consolidat cu fibre de ţesut de legătură. Fluidul este de obicei un lichid (în mod normal apa) şi astfel suferă modificări semnificative ale volumului. Deci, dacă fibrele musculare din perete se contractă pentru a micşora una dintre dimensiuni, o altă dimensiune trebuie să se mărească. Prin aranjarea musculaturii astfel încât toate dimensiunile să poată fi controlate activ, poate fi realizată o aranjare diversă a mişcărilor şi modificarea formei.

Transmiterea forţelor este deci oferită nu de către legăturile rigide, ci de presiunea din fluidul împrejmuit.

Acest principiu simplu serveşte ca bază a suportului şi mişcării într-un grup divers a animalelor cu corpuri uşoare (soft). Suportul scheletic hidrostatic poate fi de asemenea important la organisme care de obicei se bazează pe un schelet rigid. De exemplu, crabii se bazează pe un suport scheletic hidrostatic după ce şi-au lepădat exoschelet în timpul năpârlirii şi înainte ca noua formată cuticulă să se întărească [182] [183], şi de asemenea, presiunea hidrostatică de sub pielea rechinilor poate oferi un înţeles al transmiterii forţei către coadă [193].

Pe lângă spaţiile mari umplute cu fluid şi fibre musculare aranjate în orientări multiple, pereţii majorităţii scheleţilor hidrostatici sunt consolidaţi cu fibre de ţesut de legătură (cele mai cunoscute sunt proteinele de colagen) aranjate ca fascicule de fibre paralele continue ce înfăşoară animalul în ambele tipuri de aranjări elicoidale, şi anume dreptace sau stângace. Aceste aranjări de fibre de ţesut elicoidal de legătură oferă consolidarea pereţilor şi permit atât îndoirea lentă, cât şi modificarea în lungime [194] [195]. Unghiul fibrei, unghiul pe care fibra îl face cu axa mare, s-a arătat că ar controla şi limita modificările formei la o varietate de animale precum viermii [86] [35] şi la structurile hidraulice, cum ar fi tubul de hrănire la echinoderme (stea de mare, etc.) [139].

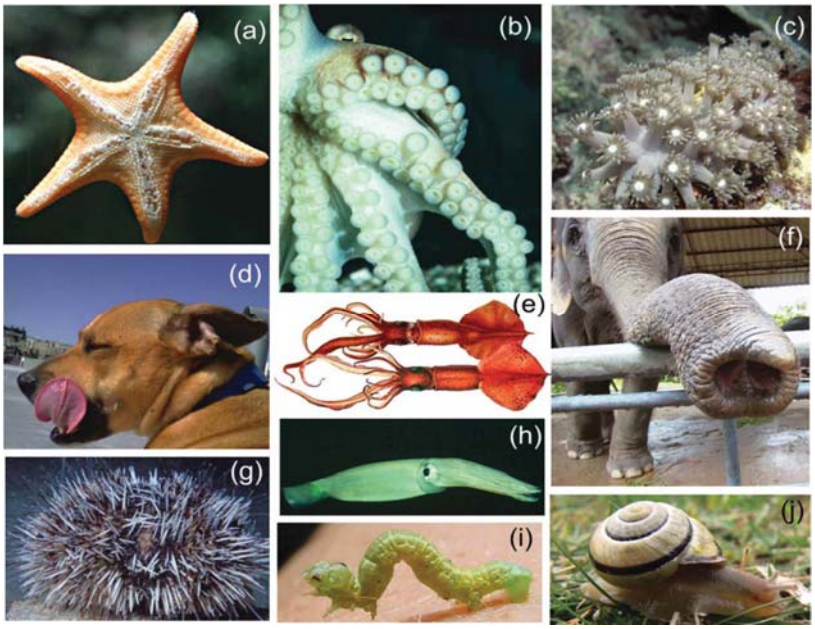

Fig. 1.4. Exemple de hidroscheleţi şi hidrostaturi musculare: **a.** Tubul de hrănire la steaua de mare; **b.** Braţele de caracatiţă; **c.** Coloana anemonei; **d.** Limba mamiferelor; **e.** Calmar; **f.** Echinoid; **g.** Illex illecebrosus; **h.** Illex illecebrosus; **i.** Viermele de cerneală; **j.** Picioarele de melc.