Cercetarea ştiinţifică în robotică

Cristian Dima — mailto:cdima+@cs.cmu.edu,
Mihai Budiu — mailto:mihaib+@cs.cmu.edu

mai 2000

Subiect: Institutul de Robotică al Universităţii Carnegie Mellon

Cunoştinţe necesare: nici una

Cuvinte cheie: roboţi, percepţie, cogniţie, acţiune

Cuprins

1 Despre roboţi

Imaginea pe care majoritatea dintre noi o au despre roboţi vine în principal din filme ca "Războiul Stelelor" şi "Star Trek" şi în secundar din imagini ale plictisitoarelor linii de asamblare ale automobilelor japoneze. Contrastul dintre aceste două imagini a produs o anumită dezamăgire a publicului în ceea ce priveşte robotica: în definitiv, după atîţia ani de progres tehnologic, nu avem încă roboţi cărora sa le putem vorbi şi care să poată fi de ajutor în îndeletnicirile casnice. Nici nu poate fi vorba de roboţi care sa lupte în război, să piloteze naveta spaţială sau alte ocupaţii frecvente în romanele ştiinţifico-fantastice. Există deci tendinţa de a cădea în cealaltă extremă, de a presupune că nu există decît roboţi plicticoşi, buni doar pentru asamblarea plăcilor electronice şi a automobilelor.

Realitatea contrazice însă ambele imagini. E adevărat că nu avem încă roboţi cărora să le putem vorbi, avem însă roboţi care au participat cu mult succes la operaţii chirurgicale extrem de complicate; nu avem încă soldaţi-roboţi, armata americană este în schimb unul dintre cei mai mari investitori în tehnologie robotică, şi deşi rezultatele sunt departe de "Terminator-i", există roboţi care pot contribui în mod eficace la salvarea de vieţi omeneşti (cum ar fi celebrul robot care a fost trimis să inspecteze Cernobîl).

E naiv să ne aşteptăm ca robotica să pornească de la zero şi să ajungă într-un timp relativ scurt (cam cinci decenii de la primele prototipuri funcţionale) la performanţe comparabile cu cele omeneşti. Deşi încă departe de visele pionierilor din domeniu, robotica ne aduce în fiecare zi un pic mai aproape de ele, iar acest progres este în continuă acceleraţie.

Cel puţin cercetătorii din robotică au planuri foarte ambiţioase şi pline de optimism. În acest articol vom încerca să vă comunicăm unele din motivele optimismului lor.

2 Institutul de Robotică al Universităţii Carnegie Mellon

Dacă există discipline spectaculoase în ştiinţa calculatoarelor, atunci cu siguranţă robotica este pe locul întîi. Desigur, se poate argumenta că roboţii sunt de fapt o disciplină separată; importanţa calculatoarelor în componenţa lor este însă din ce în ce mai mare, după cum sperăm să arătăm cu acest articol, aşa că ne vom permite să catalogăm robotica drept o sub-disciplină a informaticii. Cel mai potrivit este deci să povestim despre robotică prin exemple concrete.

Vom folosi deci drept exemplificări proiecte realizate în cadrul Institutului de Robotică al Universităţii Carnegie Mellon din Statele Unite. Pentru început, cîteva fapte despre această instituţie:

Institutul de Robotică al CMU este cel mai mare institut de învăţămînt superior de specialitate din lume. Personalul constă în 57 de profesori, 67 de studenţi la doctorat, 14 post-doctoranzi, şi 83 de cercetători. Institutul oferă diplome de master şi doctorat în robotică; fondurile de cercetare se ridică la peste 30 de milioane de dolari anual. Aceste cifre sunt cu adevărat impresionante, mai ales dacă socotim că resursele sunt dedicate roboticii: puţine alte universităţi au departamente de calculatoare care sunt atît de mari, ori aceasta este doar o sub-diviziune a Şcolii de Calculatoare de la CMU.

Aceste resurse impresionante se reflectă printr-un uriaş număr de proiecte (peste o sută) din toate domeniile roboticii; pagina de web (indicată în secţiunea "Alte surse de informaţie") are legături spre multe din aceste proiecte (dar nu toate). În mod necesar, vom putea ilustra acest text cu doar cîteva dintre ele, poate nu întotdeauna cele mai reprezentative.

Menirea acestui text este să ilustreze teoria că robotica este un domeniu extrem de complex, care rezultă din îmbinarea foarte multor domenii disjuncte. Cercetarea în robotică se desfăşoară în fiecare din aceste direcţii simultan. Unele dintre proiecte se desprind şi devin autonome: de exemplu vom vedea mai multe proiecte al căror scop originar era de a înzestra robotul cu percepţie prin prelucrarea imaginilor, însă mai tîrziu au devenit subiecte de cercetare în sine. Chiar dacă în forma prezentată ele aduc mai mult cu prelucrarea de imagine, sau cu viziunea automată (computer vision) decît cu construcţia de roboţi, cercetarea este desfăşurată în Institutul de Robotică.

3 Cercetarea în robotică

Cred că este instructiv să trecem în revistă domeniile de interes central pentru cercetarea în robotică. Dar înainte de a vedea ce se cercetează, să vedem întîi ce *nu* se cercetează.

În general cercetarea academică în robotică (adică cea făcută în universităţi) nu se ocupă de probleme de "nivel scăzut", cum ar fi: motoare, probleme electrice, construirea de hardware. În trecut universităţile trebuiau să dezvolte nu numai "creierul" robotului, ci şi toate celelalte "organe" ale lui. Dar în clipa de faţă companiile industriale produc piese de o calitate care nu poate fi atinsă în producţie de serie mică la un cost rezonabil.

Ca atare, cercetarea fundamentală în robotică se desfăşoară în zona teoriei şi algoritmilor. Cercetătorii din robotică se află la intersecţia următoarelor domenii: inteligenţa artificială, statistică, algoritmi, geometrie, geometrie diferenţială, algebră, teoria sistemelor. Unele proiecte "evadează" în ramuri exotice, cum ar fi neuro-biologie, psihologie, medicină, fizică şi mecanică, etc., în funcţie de aplicaţiile roboţilor cu pricina.

Cercetarea în domeniul electro-mecanic este în general limitată în descoperirea unor tehnologii noi (de exemplu roboţi care folosesc cîmpul magnetic, dispozitive micro-electro-mecanice — roboţi de cîţiva microni, mijloace extreme de locomoţie — roboţi-păianjen, roboţi extratereştri pentru gravitaţie redusă, etc.).

4 Robotica: cercetare multi-disciplinară

Construcţia unui robot cere cunoştinţe din domenii foarte diferite. Pentru a îndeplini chiar o misiune foarte simplă, este nevoie de sisteme complicate, care acoperă multe discipline.

În mare, robotica poate fi divizată în trei domenii: *percepţie*, *cogniţie* şi *acţiune*. Această diviziune e naturală: un robot trebuie în general să "simtă", pentru a primi informaţii despre mediul înconjurător. Informaţiile în sine însă nu folosesc la nimic: robotul trebuie sa "înţeleagă" ce se petrece, să construiască planuri, să evalueze situaţii, etc. Aceasta este partea de cogniţie. Un robot ar fi inutil dacă nu ar putea să *facă* ceva: să se deplaseze, să transforme în mod intenţionat mediul înconjurător, să exploreze, într-un cuvînt, să acţioneze.

În anumite cazuri putem elimina cogniţia, obţinînd fie ceea ce se numeşte *teleoperare* (operare de la distanţă), în care caz nu există decizie la nivelul robotului, fie celebrii roboţi lucrători la o linie de asamblare.

Sa studiem deci fiecare domeniu în parte.

4.1 Percepţie

Percepţia include practic tot ceea ce ţine de senzorii prin care robotul poate primi informaţii despre mediul în care operează. Diversitatea senzorilor este practic nelimitată: un robot poate înregistra imagini, măsura distanţe, acceleraţii, cîmpuri magnetice, orientări, poziţii geografice, viteze, etc. Vom încerca să alcătuim o listă (inevitabil incompletă) a senzorilor utilizaţi pentru percepţie în robotică.

Camere de filmat: informaţia vizuală este în general obţinută cu ajutorul camerelor de filmat în diferite spectre: vizibil, infraroşu, ultraviolet, etc. Cu ajutorul camerelor de filmat (digitale sau analogice) se obţin în final imagini digitale care sunt apoi prelucrate pentru a extrage informaţia de care este nevoie. Acest proces de prelucrare este în general extrem de laborios: conversia de la o lume tridimensională la o imagine bidimensională implică pierderea de informaţie. În plus, imaginile obţinute au de obicei o rezoluţie foarte scăzută precum şi o gamă relativ redusă de culori. De exemplu, în cazul unei imagini alb-negru obţinută cu un convertor analog-digital de 8 biţi (practic standard) rezultă numai 256 de tonuri de gri; filmul fotografic — mult mai puţin sensibil decît ochiul omenesc — poate reproduce în jur de 8000 de tonuri.

Anumite informaţii sunt foarte greu de extras din imagini: pentru a recupera de exemplu informaţie tridimensională este nevoie fie de camere stereoscopice fie de algoritmi care folosesc imagini succesive pentru a recupera informaţia pierdută prin proiecţia de la 3D la 2D.

Camerele de luat vederi sunt însă foarte ieftine în comparaţie cu alţi senzori. Pentru comparaţie să vedem alte două sisteme: un sistem de telemetrie prin laser este incomparabil mai precis, mai uşor de folosit şi mai puţin sensibil la iluminaţie. Un sistem stereoscopic (cu două, trei sau mai multe camere de filmat) trebuie calibrat, funcţionează numai în anumite condiţii (nu poate de exemplu măsura distanţa către obiecte care au o culoare uniformă) şi poate fi făcut inutilizabil de umbre. Un sistem laser costa între 10 şi 50 de mii de dolari; un sistem stereoscopic performant aproximativ 1500–2000 de dolari.

Laseri: sistemele laser sunt folosite în două moduri: pentru măsurători directe de distanţă şi ca surse de *lumină structurată* (structured light). În primul caz, o raza laser scanează o scena şi permite măsurarea precisă a distanţelor (şi a direcţiilor) faţă de punctul din care raza este emisă. În al doilea, prin procese optice sau/şi mecanice, raza laser este transformată într-un "plan" laser, care baleiază întreaga scenă de interes, iar o cameră video cu poziţie fixă înregistrează intersecţia dintre acest plan laser şi scena măsurată. Mulţimea tuturor punctelor de pe conturul 3D alcătuieşte un model tri-dimensional, ce poate fi ulterior folosit fie pentru localizare, pentru detectarea de obstacole, pentru a crea puncte de reper, şi pentru alte foloase.

Laserele însă au şi probleme, cele mai mult inerente principiilor de funcţionare. În cazul laserelor care măsoară distanţe, pentru a obţine informaţie despre o întreagă scenă, raza trebuie baleiată pe o arie mare; cum însă rezoluţia unghiulară cerută în cele mai multe dintre aplicaţii este relativ mare (cîteva zecimi de grad atît în plan orizontal cît şi vertical) şi creşte proporţional cu distanţa obiectelor scanate, este foarte dificil (din punct de vedere mecanic) de construit un sistem care va scana cu rezoluţie mare şi în acelaşi timp foarte repede.

Un laser pentru măsurat distanţa este caracterizat prin numărul de grade de libertate (0, 1 sau 2), prin numărul de puncte măsurate într-o singură trecere şi prin numărul de astfel de treceri ce pot realizate într-o secundă. Limitarea laserilor nu este în măsurarea distanţei (de obicei mult mai precisă decît necesar pentru majoritatea aplicaţiilor) ci din procesul (pînă acum mecanic) de poziţionare a razei laser şi din rata de transfer a informaţiei.

Am spus "pînă acum mecanic" pentru că relativ recent au apărut laseri fără părţi mobile, în care direcţia razei este controlată electronic, prin reflexie pe cristale lichide. Deşi în prezent astfel de sisteme există doar în laboratoare, ele promit performanţe interesante: permit scanarea cu viteze mult mai mari şi au o uzură redusă.

Pentru a încheia această discuţie despre laseri trebuie să menţionăm încă o problemă: laserii au dificultăţi cu ceaţa, ploaia, ninsoarea, şi mai ales cu soarele puternic. În cazul primelor trei, raza laser este reflectată de particulele de apă. În cazul soarelui, un laser cu putere mai mare nu ar avea de suferit din cauza iluminaţiei naturale, însă într-un mediu populat, laserul poate dăuna retinei trecătorilor[1].

Sonare, radar: sonarele (acronim pentru "SOund NAvigation and Ranging") şi radarele (acronim pentru "RAdio Detection And Ranging") funcţionează pe baza aceloraşi principii: un semnal (sonor, respectiv electromagnetic) este emis de robot; semnalul este reflectat de suprafeţe, se întoarce la emiţător, care măsoară timpul între emisie şi recepţie. Cum viteza undei respective este cunoscută, se poate evalua distanţa pînă la suprafaţa reflectătoare. Sonarele au marele (şi probabil singurul) avantaj de a costa foarte puţin în comparaţie cu alţi senzori. În acelaşi timp, au o precizie extrem de mică, şi sunt sensibile la mediul în care sunt folosite. Anumite materiale reflectă undele sonore foarte bine (caz în care există şi pericolul reflexiilor multiple), altele foarte prost (caz în care anumite semnale emise pot fi pierdute). Datorită lungimii de undă mult mai mici, radarele nu sunt în general afectate de aceste probleme. Însă costul unei unităţi radar este mare, are limitări în rezoluţie şi în precizie.

Alţi senzori: există numeroase alte metode pentru a măsura realitatea înconjurătoare, unele cu aplicabilitate generală, altele foarte specializate. Pentru localizarea roboţilor cu roţi sau şenile sunt adeseori folosite aşa-numitele codificatoare (encoders) care numără rotaţiile axelor roţilor. Din raza roţii se poate evalua distanţa parcursă, folosind acelaşi principiu ca la kilometrajul automobilelor. În orice caz, datorită inerentelor alunecări şi derapaje, rezultatele unui asemenea senzor sunt doar orientative.

Numeroase proiecte folosesc renumitul *GPS*, (acronim pentru Global Positioning System), un sistem de localizare prin satelit disponibil oriunde pe glob şi care oferă precizii uluitoare: chiar şi în cazul aplicaţiilor civile[2] se pot atinge precizii de numai cîţiva centimetri! Un sistem de sateliţi emite tot timpul semnale electronice; semnalele de la mai mulţi sateliţi pot fi combinate pentru a afla poziţia relativă faţă de sateliţi; din asta se poate calcula poziţia pe suprafaţa pămîntului. Deşi limitate doar la aplicaţii în aer liber şi cu un cost ridicat, precizia şi simplitatea sistemelor GPS a le-a impus în multe aplicaţii ale roboţilor.

Alţi senzori utilizaţi frecvent sunt *inclinometrele* şi *accelerometrele*. Preţurile lor sunt relativ scăzute (crescînd o dată cu precizia) iar aplicaţiile numeroase.

Înainte de a încheia aceasta enumerare trebuie menţionat că acestea nu sunt decît cîteva dintre opţiunile disponibile. Alegerea senzorilor potriviţi depinde de mediul în care robotul va funcţiona, de resursele financiare şi, nu în ultimul rînd, de experienţa constructorului. Un robot care funcţionează în interiorul clădirilor nu trebuie sa ia atît de mult în calcul problemele impuse de iluminaţia naturală. Un tractor robotizat nu are nevoie să detecteze obstacole de cîţiva centimetri. Regula generală este că dificultatea dezvoltării unui robot este invers proporţională cu numărul de restricţii impus asupra mediului de funcţionare. Diferenţa între un robot care merge excelent în laborator, unde "dificultăţile" sunt cu grijă eliminate

[1] Îmi amintesc de un semn dintr-un laborator de fizică: "Nu priviţi în raza laser cu ochiul rămas".

[2] Pînă de curînd sateliţii GPS bruiau în mod intenţionat semnalul pentru aplicaţiile civile; acest bruiaj o fost încetat anul acesta.

prin configuraţia experimentului şi un robot capabil sa ducă la bun sfîrşit o misiune într-un mediu natural este extrem de mare.

Un exemplu: Realitate Virtualizată^{TM}. Una dintre aplicaţiile cele mai interesante dezvoltate la Institutul de Robotică CMU este laboratorul de "Realitate Virtualizată" (a nu se confunda cu *realitatea virtuală*). Laboratorul constă într-o încăpere în care 49 de camere de filmat digitale sunt plasate pe pereţi şi tavan, astfel încît orice punct din spaţiu este vizibil cîtorva camere, indiferent de obiectele din încăpere. Toate camerele de filmat sunt atent calibrate (ceea ce înseamnă că se pot stabili corespondenţe între imaginile oricăror două camere: pentru orice punct vizibil în cel puţin două obiective se pot obţine coordonate în spaţiul tri-dimensional) şi sincronizate, astfel încît toate să înregistreze imagini în acelaşi timp. Folosind principiile stereoscopiei se pot obţine modele tridimensionale pentru orice eveniment petrecut în această cameră.

Sistemul prelucrează apoi informaţia înregistrată şi construieşte un model (descris în limbajul VRML) tri-dimensional pentru fiecare moment din secvenţa înregistrată. Cu metode împrumutate din grafica pe calculator se poate extrage informaţie despre forma, culoarea şi textura suprafeţelor vizibile.

Din momentul în care un astfel de model tridimensional este disponibil şi cunoaştem culoarea fiecărui punct, putem genera o imagine artificială a aceste scene, văzută din orice punct de vedere (chiar din puncte în care iniţial nu avem camere de filmat). Acest lucru poate fi realizat pentru fiecare moment din secvenţa înregistrată: ca urmare, se poate alege chiar o traiectorie pentru camera de filmat, şi putem obţine o secvenţă video care simulează ceea ce ar fi văzut o cameră de luat vederi în mişcare de-a lungul traiectoriei respective.

Deşi calitatea imaginilor obţinute nu este perfectă, iar procesarea nu se poate face în timp real, una dintre aplicaţiile deja negociate cu sponsori interesaţi constă în a înregistra meciuri de basket din NBA (National Basketball Association); spectatorul apoi poate controla în trei dimensiuni poziţia camerei "virtuale", care-i furnizează informaţia video. De exemplu, spectatorul ar putea viziona meciul din punctul de vedere al unui arbitru, din punctul lui Shaquille O'Neal sau chiar din punctul de vedere al mingiei.

Un exemplu: modelare 3D după filme video. Un proiect deosebit de fascinant din domeniul percepţiei este cel numit "modelare cu camera video" (modelling by videotape).
`http://www.ius.cs.cmu.edu/IUS/mbvc0/www/modeling.html`

Problema care se dă este următoarea: mă plimb cu camera de filmat în jurul unui obiect. Pot să reconstitui doar din aceaste imagini:

- forma obiectului filmat?
- traiectoria camerei de luat vederi?

Asumpţia de bază este că obiectul filmat este rigid (nu se deformează în timpul filmării). Cercetări de ultimă oră au extins această metodă pentru scene care conţin mai multe obiecte rigide în mişcare relativă unele faţă de altele.

Rezultatele sunt deosebit de spectaculoase (pagina de web conţine mici filme demonstrative): de exemplu, mişcări de mică amplitudine în jurul unei scene din bucătărie (ca şi cum cel care filmează se clatină) permit reconstituirea deplină a formei acesteia şi vizualizarea din orice unghi. Figura 2 explică procedura pe scurt.

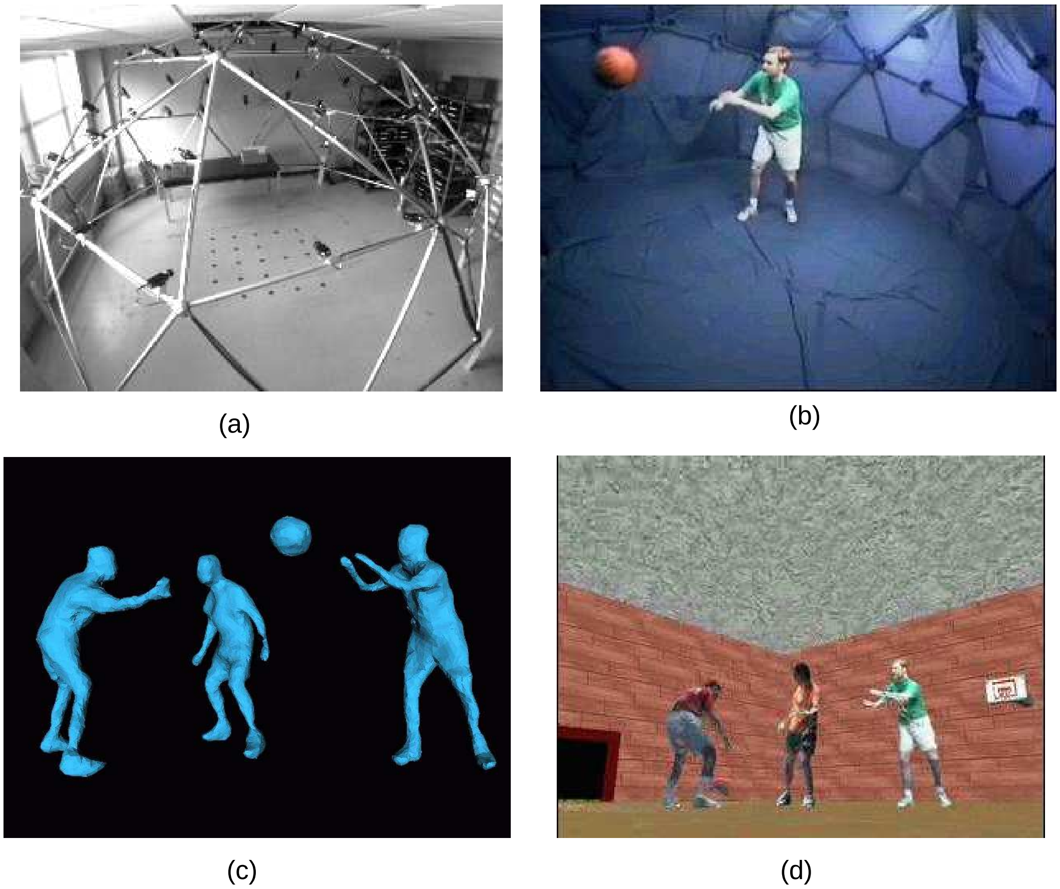


Figura 1: Realitatea Virtualizată permite explorarea unei scene reale din puncte din care nu a fost niciodată văzută. Sistemul începe prin filmarea unei scene reale (b) din toate unghiurile posibile (imaginea (a) prezintă un dom pe care sunt montate 49 de camere de filmat). Din imaginile filmate este reconstituit un model tridimensional al scenei. Modele ale unor scene diferite pot fi puse laolaltă, ca în figura (c), în care apar trei jucători de basket care nu au fost niciodată la un loc. Prin maparea texturii, adăugarea de noi obiecte şi redarea imaginii putem vedea scenele iniţiale din orice punct de vedere (d).

Tehnica are o eficacitate excelentă: în pagina de web există o demonstraţie a unui teren filmat din avion de la mare înălţime; nici cu ochiul nu poţi spune prea clar ce se întîmplă jos. Calculatorul însă este capabil să construiască o hartă completă de elevaţii a terenului. Aplicaţiile comerciale şi militare ale tehnologiei sunt evidente.

4.2 Cogniţie

Roboţii au nevoie de o putere substanţială de calcul pentru a procesa informaţiile venite de la senzori, extrăgînd trăsăturile esenţiale. Dar odată aflate informaţiile esenţiale, mai rămîne de pus la punct setul de acţiuni care trebuie îndeplinite pentru a duce la bun sfîrşit sarcinile robotului. Aici intră în joc “creierul” robotului.

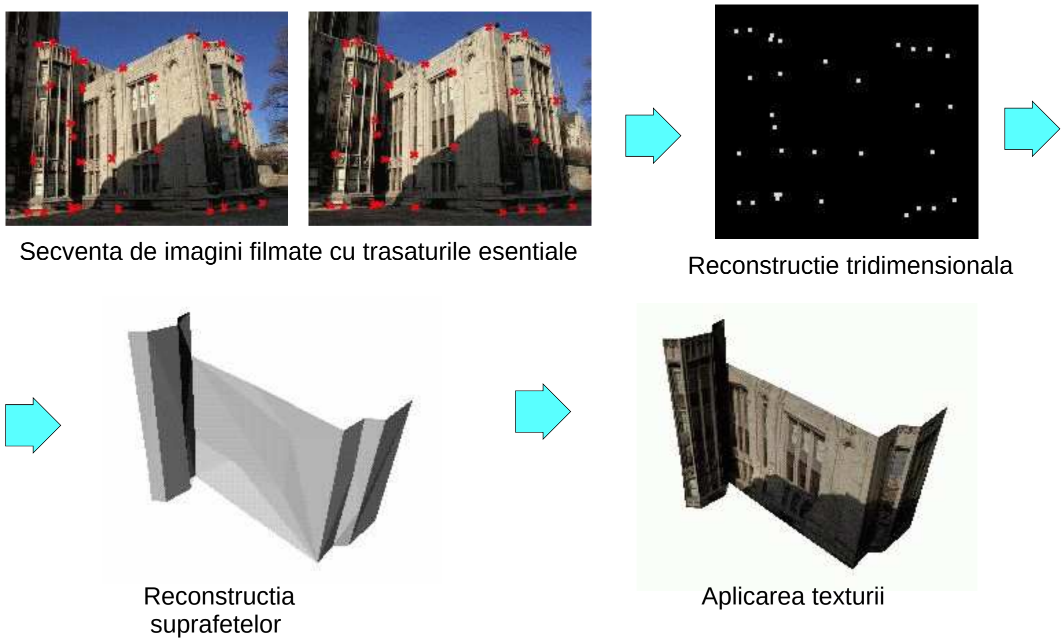


Figura 2: Reconstituirea porneşte de la un film al obiectului, făcut din mişcare. Tehnici standard de procesare de imagine identifică puncte cheie (features) ale imaginii. Tehnici aplicate pentru calculul fluxului de imagine (optical flow) permit identificarea punctelor corespunzătoare din imagini diferite (o problemă netrivială, dacă ne gîndim că unele puncte pot dispărea ascunse în spatele unor suprafeţe). Din mişcarea punctelor se poate reconstitui plasamentul lor în spaţiul tridimensional, precum şi traiectoria camerei de filmat. Odată ce geometria punctelor cheie este stabilită, feţele obiectului sunt reconstituite şi apoi textura (desenul) original este transformat în raport cu ecuaţia mişcării şi suprapus peste cadru. Tehnologiile de plasare a texturii sunt folosite de toate jocurile tridimensionale, dar problema reconstrucţiei formei este mult mai dificilă.

Prin asemuire cu funcţiunea principală a creierului uman, numim această activitate a robotului "cogniţie". Putem distinge trei mari tipuri de activitate "cognitivă": *învăţare*, *planificare* şi *control*.

4.2.1 Învăţare

Învăţarea poate avea aspecte extrem de variate, de la memorare pur mecanică pînă la acţiuni "inteligente".

- Un robot industrial care vopseşte maşini, este de obicei "educat" de un om, care-i mişcă braţul pentru a-l învăţa cum trebuie să opereze.
- Dar dacă senzorii au un domeniu foarte limitat, şi nu poţi şti totul despre lumea în care te afli? Algoritmii de căutare vin în ajutor robotului, indicîndu-i cum să exploreze lumea din jur pentru a extrage maximum de cunoştinţe cu minimum de risipă.
- Dacă senzorii pe care îi ai sunt nesiguri, cum poţi învăţa ceva despre lumea din jur? Modelele Markov "ascunse" (hidden Markov models) sunt folosite exact în astfel de circumstanţe.

- Dar dacă nu ştii nimic despre propriile acţiuni: ce poţi face şi ce efecte rezultă? Folosind tehnologia numită "reinforcement learning" poţi învăţa să te comporţi surprinzător de eficace chiar în medii incerte. De exemplu, antrenarea reţelelor neurale face parte din această categorie.
- Cum trebuie să te comporţi dacă nici măcar nu ai control perfect asupra corpului tău? Motoarele au imperfecţiuni, suprafeţele alunecă, şi precizia este limitată. Tehnica proceselor de decizie Markov este aplicată cu succes în astfel de circumstanţe.
- În fine, cum poţi reprezenta în mod compact cantitatea uriaşă de date care vin tot timpul din mediu? Ce faci cu contradicţiile (cauzate de pildă de imperfecţiunea senzorilor, sau de un mediu în schimbare)? Tehnici din învăţarea automată (machine learning) sunt folosite pentru a rezolva astfel de probleme.

4.2.2 Planificare

Putem argumenta că funcţia principală a unui robot este *planificarea*. Ideal noi îi specificăm robotului doar un scop care trebuie atins, iar robotul are la dispoziţie o mulţime de mişcări elementare. Robotul trebuie să pună cap la cap o serie de astfel de mişcări care conduc la realizarea scopului.

Planificarea se poate face la nivele diferite, şi poate fi extrem de sofisticată dacă avem de-a face cu un mediu în schimbare şi în care avem constrîngeri dinamice importante:

- Cel mai simplu tip de planificare (scheduling) trebuie doar să decidă ordinea în care o suită de operaţii trebuie efectuate pentru a atinge un anumit scop.
- Pe de altă parte, adesea operaţiile făcute nu sunt independente, şi nu orice ordine este posibilă: de exemplu dacă pui un obiect greu pe un scaun, nu mai poţi împinge apoi scaunul. Găsirea planurilor pentru a transforma o configuraţie a mediului într-alta este o problemă dificilă (planning).
- Şi mai complicat este cînd ai de-a face cu un spaţiu continuu, şi nu doar cu un număr finit de configuraţii posibile. Asta se întîmplă cînd vrei să planifici de pildă mişcarea. De exemplu, figura 3 arată un plan conceput pentru un robot care poate doar să împingă un obiect.
- Dacă iei la socoteală şi faptul că robotul are inerţie, viteză, masă, acceleraţie, poate are articulaţii inerte (să zicem că un braţ s-a stricat), problema deplasării într-un mediu cu obstacole de forme variate este şi mai complicată.
- Dificultatea planificării mişcării (motion planning) creşte de asemenea foarte rapid cu numărul de grade de libertate al robotului: un robot în formă de şarpe, cu multe multe articulaţii, poate ajunge în foarte multe feluri dintr-un loc într-altul.

Un exemplu: Minerva şi muzeele. Pe culoarele universităţii Carnegie Mellon poţi adesea vedea nişte roboţei care se plimbă de ici colo şi caută lume în clădire; unii din aceşti roboţi pot fi comandaţi de la distanţă, prin Internet: `http://jubilee.learning.cs.cmu.edu:8080/`.

Un grup de cercetare a vrut să împingă această idee mai departe, şi a construit un robot care face pe ghidul în muzeu. Robotul Minerva 4 a funcţionat în Muzeul de Istorie Naturală Smithsonian din Washington DC în vara anului 1988 `http://www.cs.cmu.edu/~minerva`.

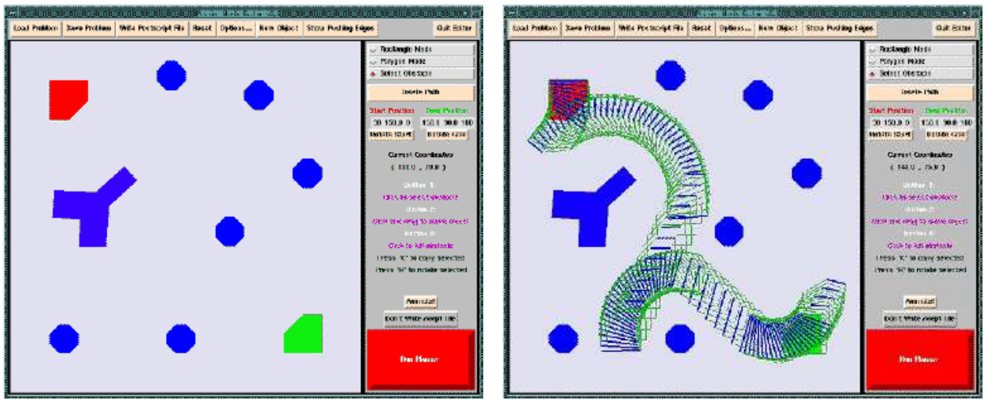


Figura 3: Imaginea unui planificator pentru mişcarea unor obiecte prin împingere într-o lume bidimensională. Robotul şi obiectele au trei grade de libertate (translaţii pe două axe şi rotaţie), iar robotul este limitat la a împinge obiectul de pe o muchie (nu poate împinge un colţ). Suprafaţa are un coeficient de frecare cunoscut. Imaginea din stînga arată plasamentul iniţial şi final al obiectului (cu roşu şi respectiv verde) şi planul conceput pentru a duce obiectul într-o poziţie specificată.

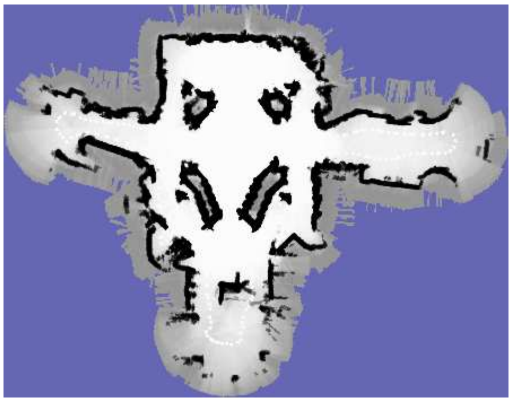
Figura 4: Robotul Minerva a funcţionat în vara anului 1998 ca ghid în Muzeul de Istorie Naturală "Smithsonian" din Washington DC.

Problemele principale investigate cu această ocazie au fost navigaţia într-un spaţiu necunoscut şi evitarea obstacolelor (inclusiv a persoanelor).

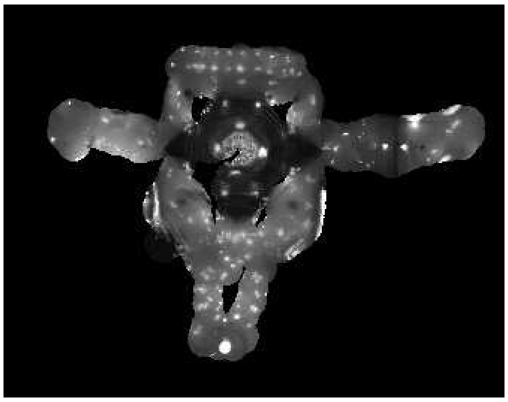
Iată pe scurt unele din problemele ivite şi algoritmii folosiţi pentru a le rezolva:

Învăţare: Minerva trebuie să înveţe harta locului în care se află. Pentru acest scop este echipată cu senzori laser, care pot măsura precis distanţa pînă la obiectele înconjurătoare. Prima poză din figura 5 arată harta muzeului învăţată prin explorare după ora închiderii (pentru ca nu cumva publicul să fie luat drept exponate).

Repere: Minerva trebuie apoi să-şi construiască nişte repere fiabile, pe care să le poată folosi tot timpul. Din cauză că în timpul zilei robotul va fi înconjurat de curioşi, singura metodă fiabilă este să urmărească...tavanul. A doua poză din figura 5 arată harta tavanului aşa cum este construită de Minerva, plasată peste cea a muzeului.



Harta construita prin explorare



Harta de lumini a tavanului

Vedere instantanee a tavanului

Figura 5: Pentru navigaţie în timpul zilei Minerva îşi construieşte o hartă a tavanului muzeului, singurul lucru pe care ştie că-l poate privi fără a fi obstrucţionată. Dacă credeţi că e un lucru simplu să te orientezi după tavan, încercaţi să spuneţi în care parte a clădirii vă aflaţi cînd vedeţi a treia poză din această figură.

Senzori: În timpul orelor de vizită, Minerva se uită tot timpul cu o cameră de filmat în tavan. Ce vede puteţi privi în partea a treia a figurii 5.

Localizare: Problema cea mai complicată este ca robotul să-şi dea seama unde se află în clădire folosind informaţii incomplete (senzorii se vor împiedica de persoanele din jur, şi vor vedea doar o fracţiune din tavan). Figura 6 arată doi paşi din evoluţia unui algoritm care estimează probabilitatea robotului de a se afla într-un anumit loc.

Planificare: În fine, odată ce a aflat unde este plasat, robotul trebuie să-şi planifice mişcările prin muzeu pentru a face turul şi a explica exponatele. Această problemă nu este de loc simplă,

Figura 6: Algoritmul de localizare al lui Minerva construieşte o distribuţie de probabilitate a amplasamentului robotului. Punctele unde e cel mai probabil ca robotul să se afle sunt marcate cu verde în figură. Pe măsură ce robotul se deplasează şi vede noi porţiuni de tavan, incertitudinea scade (de exemplu, se ajunge într-o secundă de la imaginea din stînga la cea din dreapta). După cinci secunde robotul ştie precis unde se află.

pentru că mediul este în continuă schimbare, şi mişcările lui sunt împiedicate de audienţa curioasă.

4.2.3 Control

În fine, una dintre problemele binecunoscute este cea a algoritmilor de control (control theory). Aşa cum nu putem conduce o maşină cu 100 km/h pînă în parcare, pentru că nu putem opri instantaneu, nici roboţii nu pot face mişcări arbitrare.

Teoria controlului dezvoltă algoritmi care să permită roboţilor sa se deplaseze în mod stabil; algoritmii de control cunosc doar unii din parametrii sistemului; pe ceilalţi îi pot observa din chiar comportarea robotului. Algoritmii observă permanent deviaţia de la traiectoria ideală stabilită de planificator şi generează comenzi de corecţie.

Dar aşa cum o învîrtire bruscă de volan poate răsturna maşina, sau poate duce la o oscilaţie periculoasă, simpla încercare de a corecta imediat traiectoria se poate solda cu catastrofe; algoritmii de control iau în calcul aceste lucruri cînd coordonează mişcarea.

4.3 Acţiune

În fine, ajungem la ultima mare parte a roboticii, acţiunea. Roboţii pot folosi cele mai diverse mijloace de locomoţie; de la roboţi umanoizi, cu picioare (care de altfel sunt foarte greu de construit) pînă la şerpi şi ţopăitori, avem de-a face cu o gamă extrem de largă de dispozitive. Iată aici unele dintre ele:

Roti şi şenile: despre acestea nu e mare lucru de spus; sunt cele mai comune mijloace de locomoţie.

Miliboţii: sunt probabil unul din cele mai mici (în sens propriu) proiecte robotice. Miliboţii sunt roboţi de numai 5–10 centimetri, care acţionează în echipe, în principal în misiuni de recunoaştere. Dimensiunea redusă a miliboţilor constituie una dintre cerinţele principale pentru acest proiect; cu cît un robot este mai mic, cu atît este mai greu de detectat. Puteţi vedea cîţiva miliboţi în figura 7.

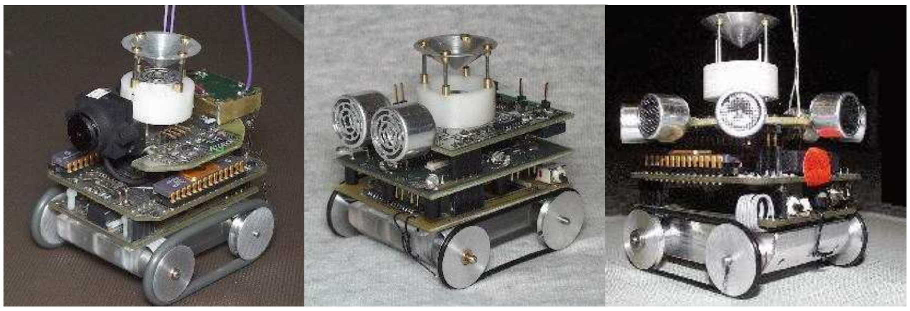


Figura 7: Construiţi modular, miliboţii au un modul de locomoţie, unul de procesare şi, desigur, baterii. În rest, ei pot transporta module de viziune — echipate cu o mini-cameră de luat vederi — de sunet — un microfon mobil — sonare şi echipamente de comunicaţii radio. Ei schimbă informaţii între ei, colaborează, şi în viitorul apropiat vor putea să-şi schimbe unul altuia bateriile.

În cadrul proiectului se lucrează în prezent la un mecanism de cuplare care va permite miliboţilor sa se cupleze între ei, formînd fie o “roată”, fie un pod, fie alte configuraţii care vor spori mobilitatea sistemului. Cea mai mare problemă în astfel de proiecte este dificultatea stocării unei cantităţi suficiente de energie în puţinul spaţiu disponibil.

Şerpii sunt cîteodată forma ideală pentru roboţi care trebuie să ajungă în locuri greu accesibile; de exemplu, un robot care verifică un motor de maşină şi care se tîrăşte printre diferitele piese poate fi singura soluţie de implementare.

Module: un proiect de cercetare studiază construcţia unor “module universale” plug-and-play, care pot fi asamblate într-un robot în aproape orice fel. Modulele auto-detectează configuraţia electrică, mecanică, şi generează automat planuri pentru mişcarea robotului format, în funcţie de numărul de grade de libertate disponibile.

Roboţi spaţiali: NASA este unul dintre sponsorii principali ai Institutului de Robotică de la CMU; unele din proiectele de cercetare explorează construcţia roboţilor care ar putea funcţiona pe staţia spaţială, în lipsa gravitaţiei, şi care se pot deplasa pe structuri metalice de forma unor schele.

Gyro, hopping: roboţi exotici care constau dintr-o singură roată (echilibrată cu un giroscop) sau roboţi care ţopăie sunt alternative extreme explorate de cercetători (figura 8).

Interfeţe haptice: haptica este domeniul care se ocupă cu introducerea senzaţiilor tactile în interacţiunea cu calculatorul. Prin utilizarea unor dispozitive de intrare/ieşire speciale: joystick-uri, “mănuşi electronice” (data-gloves), etc., utilizatorii pot recepta senzaţii tactile.

Utilizatorul poate urmări pe ecran (într-o simulare grafică) rezultatele acţiunilor sale, şi poate simţi prin intermediul manetei coliziunile, vibraţiile, frecarea, etc. În figura 9 de

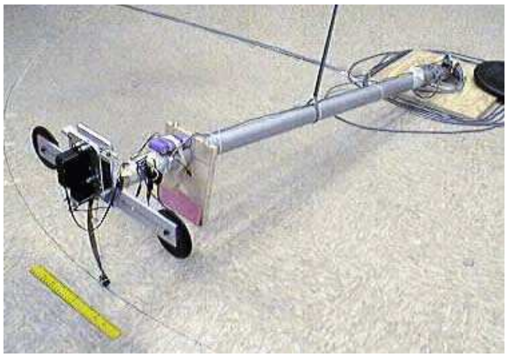
 

Figura 8: **Gyrover** este un robot care constă dintr-o singură roată ţinută în echilibru cu un giroscop. Gyrover poate să stea pe loc şi să se rotească pe verticală, să urce pante uşoare şi să meargă pe un teren accidentat la viteze mari. Mecanismul robotului este în întregime în interiorul roţii, protejat de impact. **Bow-leg** este un robot care ţopăie folosind un picior elastic; simplitatea robotului duce la algoritmi simpli de control; robotul este capabil să sară peste pietrele care-i împiedică mersul, şi poate calcula traiectorii în timp real, în funcţie de obstacolele întîlnite.

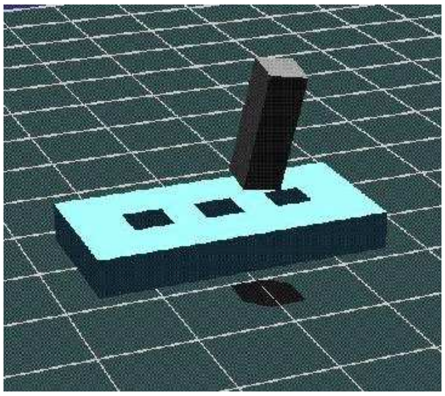
 

Figura 9: În Institutul de Robotică s-a dezvoltat un dispozitiv bazat pe levitaţie electromagnetică care poate exercita asupra unui "joystick" forţe şi cupluri generate artificial de calculator. Dispozitivul are 6 grade de libertate şi este susţinut practic fără frecare într-un cîmp magnetic foarte puternic. Cu ajutorul forţelor Lorentz şi variaţiei unor curenţi din bobinele ce înconjoară dispozitivul, un program poate simula o "lume" artificială în care maneta poate fi folosită pentru a mişca anumite obiecte în 3D. Forţele aplicate prin intermediul cîmpului magnetic asupra manetei simulează cu mare acurateţe senzaţiile pe care le-ar avea un utilizator dacă ar manipula obiectul respectiv direct în "lumea artificială".

exemplu, utilizatorul primeşte senzaţia frecării celor doua suprafeţe şi a vibraţiilor produse la introducerea obiectului în locaşul pătrat.

Interfeţele haptice sunt folosite în general pentru antrenarea în acţiunile în care coordonarea între mîini şi sistemul vizual este crucială: de exemplu chirurgie sau pentru manevre în imponderabilitate.

Elicopterul autonom: este unul dintre proiectele cele mai ambiţioase ale Institutului de Robotica, care constă în realizarea unui elicopter capabil de a zbura complet autonom, fără pilot sau telecomandă. Aplicaţiile unui astfel de elicopter sunt evidente: aproape orice misiune pe care un elicopter ar putea-o realiza dar care ar pune în pericol viaţa piloţilor (salvare, spionaj, inspectare vizuală a barajelor, liniilor de înaltă tensiune, etc.) ar putea fi executată de un elicopter autonom, care poate naviga şi executa misiunea sub controlul calculatorului.

Anual se desfăşoară o competiţie în care echipe din întreaga lume îşi compară elicopterele autonome, pe care CMU se mîndreşte a o fi cîştigat anul trecut. Elicopterul (de mărime redusă, produs iniţial pentru împrăştierea pesticidelor prin zbor telecomandat) poate decola, ateriza şi naviga complet autonom, iar în cadrul competiţiei a fost capabil de a executa zbor la punct fix în condiţii de vînt şi de a recupera un mic obiect metalic de pe sol cu ajutorul unei macarale magnetice. Demonstraţii cu adevărat impresionante şi detalii ale concursului sunt disponibile on-line la `http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/chopper/www/`

Ceea ce face acest proiect deosebit de dificil este că nu exista o stare de echilibru stabil: odată în zbor, dacă ceva nu funcţionează perfect, elicopterul nu se poate opri şi aştepta ajutor, ca în cazul roboţilor "clasici". Un eşec de genul acesta este echivalent cu pierderea întregului aparat, suficient de costisitor. Pentru a reduce probabilitatea unor astfel de catastrofe, s-a încercat duplicarea sistemelor critice. De exemplu, pentru a-şi menţine nivelul orizontal în timpul zborului, elicopterul foloseşte inclinometre (două giroscoape care măsoară înclinaţia), cît şi un sistem care extrage poziţia elicopterului din imagini video. Pentru aprecierea distanţelor parcurse elicopterul foloseşte atît un sistem GPS, cît şi un sistem vizual, care măsoară viteza pămîntului în imaginile luate, o cuplează cu altitudinea de zbor, şi extrage o aproximaţie a vitezei reale.

Se lucrează în continuare atît la îmbunătăţirea algoritmilor de control, cît şi la aplicaţii; în prezent există un sistem care foloseşte telemetrie laser şi stereoscopie pentru a alcătui din zbor o hartă 3D de foarte mare rezoluţie.

Braţe: poate cele mai bine cunoscute dispozitive de acţiune sunt braţele robotice. Toate acele braţe care execută cu o precizie uluitoare suduri, lipituri, montează motoare şi alte componente în fabricile de automobile sunt cele care au introdus termenul de "robotica" în industrie. Un braţ nu este nimic altceva decît un ansamblu de motoare şi articulaţii care pot fi controlate de către un calculator. Principalele caracteristici ale unui braţ sunt numărul de grade de libertate, forţele şi cuplurile maxime la fiecare încheietură a robotului şi precizia cu care poate fi localizată fiecare încheietură. În orice caz, puterea unui astfel de braţ vine din programul de planificare care nu este deloc trivial: calculele necesare pentru a alege o traiectorie optimă pentru diferitele operaţii au o complexitate foarte ridicată.

Mîini şi picioare artificiale: în final, să nu uităm că aproape toate uneltele şi facilităţile disponibile la ora actuală au fost concepute pentru a fi utilizate de către oameni. Pentru ca un robot sa poate înlocui oamenii în anumite situaţii el trebuie sa fie capabil sa mînuiască uneltele aşa cum sunt ele (de exemplu, roboţii trebuie să fie capabili să urce şi să coboare pe scări).

Deşi există foarte multe proiecte în lume care se concentrează asupra realizării roboţilor umanoizi, se pare ca firma japoneza Honda are un avans considerabil faţă de alţi competitori. Ei au construit deja un robot umanoid care arată aproape exact ca un cosmonaut într-un costum etanş. Deşi robotul este capabil să păşească şi să urce scări, există încă probleme imense: sistemul de viziune — extrem de ambiţios — va necesita încă ani buni de cercetare pentru a deveni capabil să extragă informaţii din mediul înconjurător cu viteza şi precizia necesară.

Într-un alt proiect, sponsorizat de NASA, s-a realizat un "bust" umanoid care va lucra în spaţiu, în exteriorul navetei spaţiale. Proiectul a construit deja o mînă artificială cu 19 grade de libertate: tot atîtea cît o mînă umană! Puneţi la socoteală faptul ca "mîna" poate exercita o forţă incredibilă şi că are suficient de multă precizie pentru a desface şuruburi mai mici de un centimetru fără unelte, şi veţi avea o idee despre minunăţia electro-mecanică de care vorbim.

Un exemplu: manipulare dinamică. Dacă vedem deplasarea dintr-un loc într-altul ca pe o succesiune de puncte, atunci găsirea unei traiectorii este o problemă de planificare. Dacă putem la socoteală şi faptul că o maşină nu poate coti la unghi drept, ci trebuie să ia curbe, şi faptul ca viteza nu-ţi permite să iei o curbă oricît de strînsă, avem de-a face (aşa cum am văzut) cu o problemă mai complicată, de control. Dacă însă vrem să manipulăm obiecte în mişcare rapidă (de exemplu obiecte aruncate), atunci avem de-a face cu o problemă şi mai complicată, a manipulării dinamice.

Puteţi vedea mai multe variaţiuni pe această temă în felurite proiecte; profesorul Matt Mason, un jongleur amator foarte priceput, îşi propune să construiască roboţi capabili să "jongleze". Unul dintre roboţii săi este înfăţişat în figura 10.

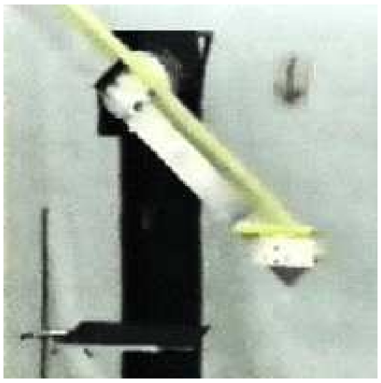


Figura 10: În acest exemplu, un robot cu un singur grad de libertate aruncă un cub în aer în aşa fel încît să se rotească în aer fie cu 90, fie cu 180, fie cu 360 de grade.

Aceasta este o problemă deosebit de dificilă de planificare într-un spaţiu continuu şi de teorie a controlului: robotul ştie doar ecuaţiile fizicii (acceleraţia gravitaţională, legile lui Newton, etc.) şi parametri proprii (viteza cu care-şi poate mişca braţul, inerţia, etc.). Robotul trebuie să planifice cum să arunce, împingă, susţină, încline, lovească, etc. un obiect pentru a-l aduce într-o poziţie dorită.

Exemplu: vehicule autonome. Unul dintre proiectele cele mai faimoase este Navlab: `http://www.ri.cmu.edu/labs/lab_28.html`. Scopul proiectului este de a dezvolta maşini autonome, care pot conduce pe autostradă fără intervenţie umană (problema condusului prin oraş depăşeşte adesea chiar şi capacitatea omului, aşa că este o temă de cercetare viitoare). O demonstraţie a reuşitei a fost turneul “no hands accross America”, în care un vehicul autonom a parcurs Statele Unite de la este la vest, 4000 de kilometri, cu intervenţie umană minimă (98,2% din timp vehiculul a condus singur), la o viteză de pînă la 140 km/h! Maşina schimba chiar şi banda de una singură.

Un proiect de genul Navlab îmbină laolaltă extrem de multe tehnologii diferite. Ideal este ca, deşi fiecare din tehnologii este imperfectă, combinaţia lor să fie mai robustă decît fiecare în parte. Vehiculele folosesc multe tipuri diferite de senzori: GPS pentru poziţie, radare pe unde ultrascurte şi lasere în infraroşu (pentru detecţia obstacolelor), camere de filmat stereoscopice cu trei şi cinci obiective (pentru urmărirea şoselei), algoritmi cu reţele neurale pentru urmărirea şoselei, algoritmi de control dinamic pentru calculul frînării, acceleraţiei, schimbării de direcţie, şi multe alte tehnologii.

Rezultatele proiectului sunt evaluate de firma Toyota pentru construirea unor sisteme automate de prevenire a ieşirii din şosea (în fiecare an 3000 de accidente în Statele Unite sunt produse de somnul la volan).

5 Alte surse de informaţie

Trebuie să oprim aici înşiruirea de informaţii, care ar putea continua pe întreg conţinutul revistei. Oferim cititorului interesat, ca punct de pornire, cîteva cîteva adrese pe web unde se pot găsi informaţii despre robotică:

`http://www.ri.cmu.edu`: Institutul de Robotică al universităţii Carnegie Mellon. Această pagină are legături la peste o sută de proiecte ale institutului, precum şi spre multe alte informaţii.

`http://www.frc.ri.cmu.edu/robotics-faq/`: Întrebări frecvente despre roboţi (Robotics FAQ). Documentul pare cam învechit (ultima modificare este aparent în 1996), dar nu am găsit unul mai recent pe Internet.

`http://www-robotics.cs.umass.edu/robotics.html`: Resurse Internet despre roboţi: o colecţie de legături spre informaţii utile despre robotică, începînd cu programe educaţionale, trecînd prin industrie şi terminînd cu jucării.

`http://www.cs.cmu.edu/~cil/vision.html`: Pagina “viziunii automate” (Computer Vision): o colecţie centralizată de informaţii despre percepţie, prelucrare de imagine şi viziune automată.

`http://www.soundvisioninc.com/publications.htm`: pentru mai multe detalii legate de procesul de funcţionare al camerelor de filmat şi digitizoarelor.

`http://www.nuhorizons.com/Home/tech/newgps.html-ssi`: pentru mai multe informaţii legate de sistemele GPS.

5.1 Despre autori

Cristian Dima tocmai a terminat primul an de doctorat în cadrul Institutului de Robotică al Universităţii Carnegie Mellon. Cercetarea lui este în domeniul “computer vision” , mai precis în cel al detecţiei obstacolelor folosind informaţii vizuale. Este membru al proiectului “Automated Sprying”, care de ocupa de robotizarea unui tractor ce poate îndeplini în mod autonom diferite operaţiuni agricole.

Mihai Budiu intră în această toamnă în al patrulea an de doctorat în cadrul Departamentului de Calculatoare al Universităţii Carnegie Mellon. Deşi cercetarea sa este orientată în alte direcţii, este profund fascinat de proiectele Institutului de Robotică, care-i dau adesea senzaţia că priveşte romane SF ieftine.