

LA ROBÒTICA MÈDICA

Josep Amat

*Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial. Universitat Politècnica de Catalunya
Membre de l'IEC*

La tecnologia ha incidit fortament en la medicina en els darrers anys tant pel que fa referència a la utilització de nous materials i nous equipaments com al desenvolupament de nous procediments.

En els darrers cinquanta anys, la tecnologia ha tingut un procés creixent d'aportacions, entre les quals destaquen el marcapassos implantable (1958), el cor artificial extern (1966), el primer cor artificial implantable (1969, tot i que el pacient va sobreviure únicament seixanta-quatre hores), la tomografia computada de raigs X (1970) i la seva implantació en els hospitals a partir de 1974, la ressonància magnètica a partir del 1989 i la robotització en determinades intervencions quirúrgiques, que, de fet, es va començar a produir a partir de l'última dècada.

La robotització i les tecnologies associades a la robòtica en el camp de la medicina incideixen en sis aspectes diferents: el diagnòstic, el tractament, la cirurgia, la rehabilitació, les pròtesis i el camp assistencial.

La tecnologia en el camp del diagnòstic

Una primera aportació important de la tecnologia en el diagnòstic extern la constituïa la introducció dels raigs X de forma generalitzada a partir de 1915, però no va ser fins als anys setanta que la tecnologia informàtica va permetre reduir el temps de radiació a milisegons i poder aplicar la visualització d'imatges digitalitzades, i mitjançant el tractament digital poder realçar el contrast i fer visibles detalls que amb les imatges convencionals no seria possible observar.

L'observació de l'anatomia interna a partir de les imatges radiològiques quedava encara limitada a l'anàlisi d'imatges planes, fins que en la dècada dels vuitanta es van introduir les tècniques de la tomografia. A partir de l'obtenció de múltiples imatges planes, l'ordinador reconstrueix tridimensionalment l'anatomia interna. Les imatges obtingudes es poden basar tant en l'emissió de raigs X, en la ressonància magnètica, com en l'emissió de fotons, o en l'emissió de positrons; en aquest cas permet localitzar les zones de metabolisme més actiu del cervell, la qual cosa consti-

tueix una eina molt important per al diagnòstic de patologies com la de Parkinson.

A més, mitjançant la tecnologia de la robòtica s'han millorat els instruments d'endoscòpia que permeten l'observació interna directa; ja que l'endoscòpia duodenal presenta notables molèsties per al pacient i també possibles riscos. En els inicis, les tècniques de la robòtica es van orientar a desenvolupar elements endoscòpics dotats de propulsió pròpia mitjançant moviments peristàltics, que permetessin una més gran capacitat de penetració amb elements més reduïts.

Actualment, aquesta capacitat de diagnòstic per observació interna incruenta s'ha vist millorada amb el desenvolupament de càpsules ingeribles d'uns 2 cm de grandària (figura 1) dotades d'una càmera de TV radio-comunicada amb l'exterior. Així, a més de poder observar l'anatomia intestinal, per telecomandament es pot dirigir l'orientació de l'angle de visió i el zoom, i controlar el sistema d'il·luminació de què disposa la càpsula.

D'altra banda, les tècniques de reconstrucció 3D a partir d'imatges obtingudes per tomografia, que permeten distingir i identificar els diferents teixits anatòmics, també proporcionen models molt acurats de la zona explorada externament. D'aquesta manera es poden realitzar endoscòpies virtuals mitjançant les tècniques de navegació sobre models 3D, que permeten traslladar el punt d'observació a qualsevol punt del model i, per tant, emular les exploracions internes. Amb l'endoscòpia virtual s'eviten molèsties i possibles riscos per al pacient.

Els equips d'ecografia per ultrasons són molt utilitzats gràcies al seu cost reduït i perquè no presenten cap efecte negatiu per la salut. La millora en la qualitat de la imatge i la portabilitat n'han generalitzat la utilització, que permet, per exemple, un seguiment més freqüent del progrés de l'embaràs, amb la capacitat de diagnòstic que això representa (figura 2).

La tecnologia aplicada al tractament

Les tècniques de tractament també s'han vist molt beneficiades gràcies al desenvolupament tecnològic. Un exemple n'és la radioteràpia. La robotització del posi-



FIGURA 1. Càpsules ingeribles dotades de càmera de TV.

cionament de l'emissor respecte a la posició del pacient permet planificar l'angle i l'abast d'incidència. Així, es poden programar informàticament plans de treball basats en trajectòries centrades en un punt de focalització determinat. L'optimització de la focalització del tractament minimitza els nivells de radiació sobre els teixits de l'entorn.

La robòtica quirúrgica

La robòtica ha iniciat la seva introducció en la cirurgia en els darrers anys, per complementar les capacitats dels cirurgians en els aspectes en els quals la robòtica clarament pot superar les limitacions pròpies d'un treball manual. Les aptituds que un cirurgià aplica a una pràctica quirúrgica i les que podria assolir la robòtica es resumeixen a la taula 1.

TAULA 1
Capacitats comparatives

Aspectes	Cirurgia	Robòtica	Millor opció
Intel·ligència	Molt alta	Molt baixa	C
Intuïció	Molt alta	Molt baixa	C
Capacitat d'aprenentatge	Molt alta	Mitjana	C
Capacitat de càlcul	Baixa	Molt alta	R
Memòria	Mitjana	Molt alta	R
Precisió	Baixa	Molt alta	R
Velocitat de treball	Mitjana	Molt alta	R
Infatigabilitat	Mitjana	Molt alta	R
Fiabilitat	Alta	Alta	—
Cost	Molt alt	Alt	—

De l'anàlisi de la taula comparativa entre els diferents nivells de capacitats que es requereixen per a la pràctica quirúrgica es desprèn que les millors capacitats humanes no coincideixen amb els millors nivells en les capacitats actuals de la robòtica. En canvi, les millors capacitats de la robòtica es corresponen més amb les principals limitacions de l'ope-



FIGURA 2. Equip d'ecografia portàtil.

rador humà. Així doncs, cal considerar la robòtica com un element tecnològic d'ajut en determinades tasques quirúrgiques amb unes prestacions que no és possible aconseguir manualment, com és el cas de la precisió i la infatigabilitat.

No obstant això, la robòtica, que ha assolit un grau molt elevat d'utilització en molts processos industrials, s'ha introduït molt més lentament en el camp de la cirurgia. Aquest fet és degut que en la majoria de les aplicacions industrials l'entorn està completament definit geomètricament i, per tant, és possible la programació geomètrica prèvia de les trajectòries que configuren la tasca robotitzada, que pot ser repetida amb precisió indefinidament. En canvi, en l'entorn mèdic, tot i poder obtenir un model geomètric de l'anatomia de cada pacient previ a la intervenció, tal com permet la tomografia computada, també cal poder definir les coordenades a l'espai de la seva posició en el moment de la intervenció. És per això que les primeres intervencions robotitzades que es van portar a terme van ser de cirurgia cranioencefàlica. A part de requerir més precisió que la de les mans del cirurgià, és possible la immobilització del crani i obtenir-ne les coordenades.

Per a la utilització d'un robot com a eina de suport en cirurgia cal poder definir prèviament unes trajectòries que

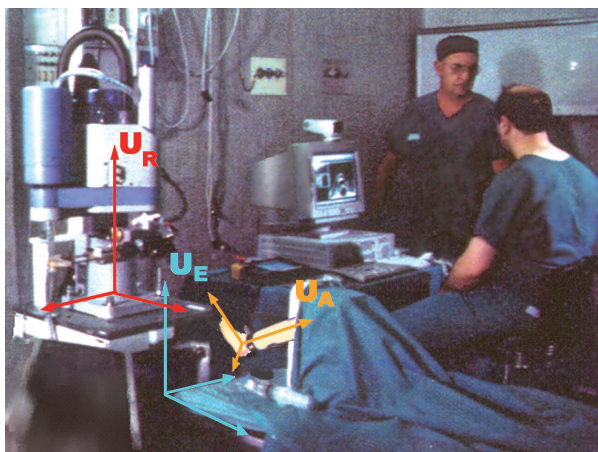


FIGURA 3. Eixos de referència dels diferents elements de l'entorn quirúrgic.

han de ser referenciades en els eixos de coordenades U_R del robot (figura 3). A més, la tasca a realitzar sobre un determinat element anatòmic requereix definir el conjunt de trajectòries sobre el seu model geomètric, obtingut a través de la tomografia, i referenciat sobre uns eixos de U_A definits sobre uns elements prou característics de la seva anatomia.

Tenint en compte que el pacient no ocupa una posició precisa predeterminedada sobre la taula d'operacions, cal poder obtenir la posició a l'espai tridimensional d'aquest element anatòmic amb referència a les coordenades U_E de l'entorn de la sala d'operacions. Per això s'han d'utilitzar instruments de mesura que permetin obtenir les coordenades de l'espai d'un nombre mínim de punts rellevants definits sobre aquest element anatòmic, i assegurar-ne aleshores la immobilitat.

La possibilitat de poder realitzar una tasca utilitzant el robot va, doncs, més enllà de poder disposar del model geomètric de l'element anatòmic obtingut per tomografia, tal com es mostra en la figura 4. Per poder conèixer les posicions dels punts d'interès on ha d'operar el robot, cal poder referenciar aquest model a uns determinats sistemes de coordenades, per compensar possibles moviments relatius entre si. En aquest cas, els eixos associats al pacient, U_A , poden variar al llarg de l'operació, i s'han de poder referir als eixos del robot U_R i de l'entorn U_E , cosa que exigeix un potent sistema informàtic (figura 5).

Però això tan sols és possible si aquest element geomètric és indeformable i es pot immobilitzar, cosa que no es pot aconseguir en totes les modalitats d'operacions quirúrgiques.

Des del punt de vista de la utilització de la robòtica es poden diferenciar quatre tipus d'intervencions quirúrgiques:

- cirurgia ortopèdica
- cirurgia toràcica i abdominal
- cirurgia mínimament invasiva
- microcirurgia.

La *cirurgia ortopèdica* és la que s'aplica sobre elements ossis, és a dir, indeformables. Malgrat que és possible disposar del model geomètric invariable durant tota la intervenció, requereix poder fixar rígidament l'element, la qual cosa limita molt les seves possibilitats d'aplicació.

Tanmateix, és possible en algunes operacions, com ara les que es realitzen a l'espina dorsal o al maluc. En canvi, la immobilització de les extremitats, el fèmur o la tibia, és més difícil a causa de la massa muscular.

Actualment ja hi ha alguns robots específics capaços de realitzar aquest tipus de cirurgies. El primer a ser utilitzat de forma ja operativa als hospitals va ser el Robodoc, i posteriorment el Caspar (figura 6).

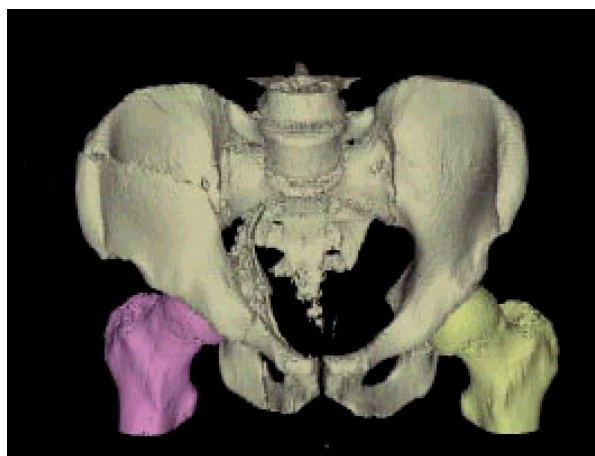


FIGURA 4. Model geomètric obtingut a partir de la tomografia.

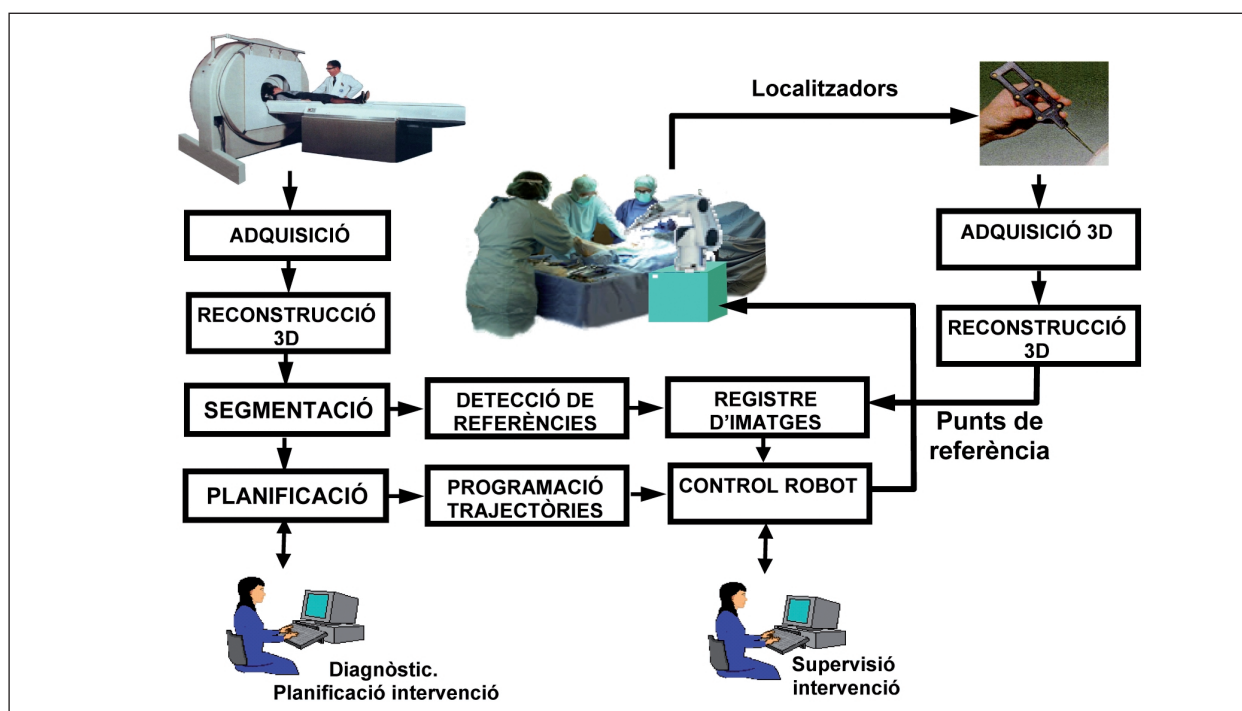


FIGURA 5. Procés de posada en correspondència dels eixos de referència i robotització d'una intervenció quirúrgica.



FIGURA 6. Robot Caspar.

La cirurgia toràcica i abdominal presenta majors dificultats d'aplicació a causa dels seus òrgans deformables. Això dificulta l'adaptació del model geomètric obtingut prèviament, respecte de la forma assolida en la taula d'operacions, a més de la immobilització.

No obstant això, es poden utilitzar tècniques de detecció i seguiment d'algun element anatòmic rellevant que permeti adaptar de forma contínua el model geomètric prèviament obtingut amb la geometria real de l'element en cada moment, la qual cosa permet referenciar de forma dinàmica els diferents eixos de coordenades i realitzar així l'operació adaptada a la geometria.

Mitjançant aquestes tècniques s'ha aconseguit, per exemple, sincronitzar les coordenades de treball d'un robot amb els moviments del batec del cor.

La cirurgia mínimament invasiva ha estat desenvolupada per a operar a través d'incisions mínimes fetes al pacient mitjançant unes petites pinces i unes eines específiques, per a reduir el trauma produït per tota intervenció, i els temps de recuperació. Aquest tipus de cirurgia exigeix un cert aprenentatge en la utilització d'aquestes eines específiques ateses les limitacions que implica treballar a través d'un punt fix, els orificis d'entrada, i la inversió del sentit dels moviments, i amb la necessitat de seguir-los a través d'un monitor de TV. Les limitacions del treball realitzat manualment impliquen la utilització d'una tecnologia molt més propera a la robòtica, ara bé, també suposen operar amb les mateixes limitacions de moviments pròpies d'un robot, especialment en accessibilitat.

Les primeres aplicacions de la robòtica en cirurgia mínimament invasiva van ser orientades a la cirurgia lapa-

roscòpica, ara bé, no a la realització de l'operació pròpiament, sinó com a suport i comandament de la càmera de TV. Es tracta d'una operació que requereix més atenció que habilitat; a més, les deficiències de manipulació, derivades del cansament, produeixen moltes molèsties i dificultats addicionals al cirurgià.

Malgrat que s'ha iniciat la robotització del comandament dels estris de treball de diverses operacions en cirurgia laparoscòpica, aquesta es produeix mitjançant teleoperació, és a dir, que és el cirurgià qui mou les pinces, ara bé, no de forma directa sinó a partir d'uns comandaments que permeten als braços-robots moure les pinces com si les moguéssim directament el cirurgià.

Hi ha diversos robots desenvolupats específicament per a la realització d'operacions en cirurgia laparoscòpica; els més destacats són el Zeus (1997) i el Da Vinci (2000), ambdós dotats de tres actuadors, per a controlar les pinces teleoperades i la càmera de TV (figura 7), que ja permeten realitzar habitualment determinades operacions tant de cirurgia laparoscòpica o histeroscòpica com per teleoperació.

La microcirurgia, per les seves característiques dimensionals i de precisió, no permet realitzar les operacions manualment; per aquest motiu ha calgut introduir-hi les tècniques robòtiques. Aquestes operacions robotitzades han permès, per exemple, millorar l'eficiència quirúrgica en cirurgia cranioencefàlica, gràcies a la precisió superior a la dels mètodes manuals.

En cirurgia oftàlmica, i utilitzant com a eina de treball el làser, s'ha aconseguit obtenir prestacions molt elevades, tant en la correcció de diòptries de la còrnia com en operacions de retina.

La tecnologia aplicada a la rehabilitació

La tecnologia aporta també equips que permeten millorar moltes tasques en rehabilitació. Els caminadors, els *treadmills*, en són un exemple. Es tracta d'un equip de cost molt raonable ja que ha estat comercialitzat per a facilitar a



FIGURA 7. Estació de treball.

tothom la realització d'exercici físic de forma més còmoda i fins i tot en el propi domicili. És una ajuda molt apreciable en el procés de rehabilitació per a les extremitats inferiors, especialment en casos d'hemiplegia.

Igualment, la robòtica es pot aplicar en tasques de rehabilitació. El robot es pot programar per a permetre trajectòries determinades exercint forces també programables.

La capacitat del robot de poder programar, fins i tot gestualment, memoritzar i posteriorment realitzar tot tipus de moviments amb trajectòries, velocitats i forces programades, pot constituir, doncs, un terapeuta robotitzat infatigable adaptat a cada usuari, preparat per a realitzar qualsevol tasca de rehabilitació. A diferència dels caminadors, el seu elevat cost en limita l'ús.

Les pròtesis

El desenvolupament de la robòtica, tant pel que fa en micromecànica com en capacitat i miniaturització de la unitat

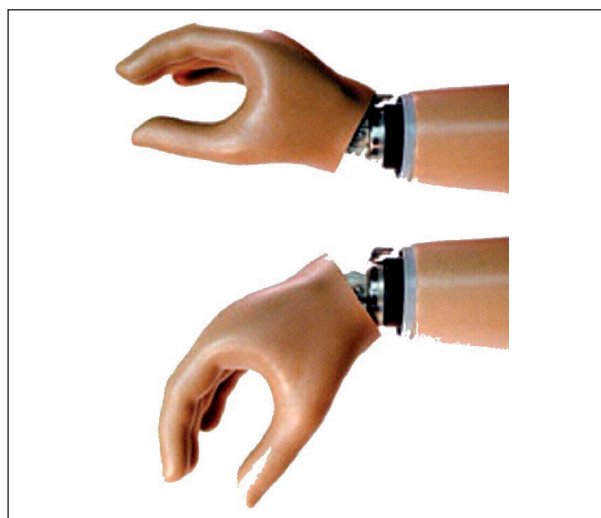


FIGURA 8. Pròtesi de braç amb una articulació passiva.

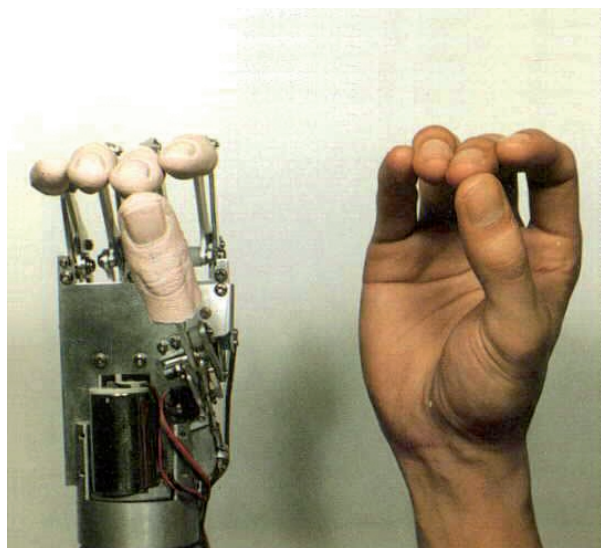


FIGURA 9. Aspecte intern i extern d'una pròtesi de mà motoritzada.

de control, és lògic que també s'orientés al desenvolupament d'arquitectures electromecàniques substitutives de braços i mans i de cames prostètiques, per a suplir la pèrdua d'alguna extremitat.

Inicialment, les primeres pròtesis articulades desenvolupades per a suplir la pèrdua de les extremitats superiors eren de tipus passiu, és a dir, els moviments de les articulacions no eren motoritzats, per tal d'estalviar el pes dels actuadors i, especialment, de les bateries, així com els problemes de control. Aquest tipus de pròtesis passives (figura 8) malgrat les seves limitacions, s'han demostrat de gran eficàcia per a molts usuaris, que, amb la seva habilitat, aconseguen una bona relació entre operativitat i simplicitat.

Ja a la dècada dels vuitanta, es van aconseguir bons nivells de prestacions de les pròtesis motoritzades utilitzant com a senyals de control la identificació dels senyals mioelèctrics que conserven els amputats traumàticament.

En la figura 9 es pot veure la mà del braç prostètic que va ser desenvolupat a la Universitat de Waseda el 1979. La mà era activada a partir de la voluntat de l'usuari, a partir de la interpretació dels senyals mioelèctrics obtinguts per uns elèctrodes situats en la zona propera a l'amputació.

A més, s'han desenvolupat pròtesis robotitzades de les extremitats inferiors, però a diferència de les superiors no ha estat possible el comandament a partir dels senyals mioelèctrics. En aquest cas, un microcontrolador controla els diferents actuadors utilitzant els sensors de força i presència de què està dotat, i permet controlar els actuadors que realitzen els moviments de la marxa que sol·licita l'usuari, tot seguint els moviments de l'altra extremitat, i mantenint l'equilibri de l'usuari. Aquest tipus de controladors permeten realitzar els moviments de caminar amb prou seguretat tant sobre superfícies planes, com per a pujar o baixar graons (figura 10).

La poca acceptabilitat d'aquest tipus de pròtesis, tot i el progrés tecnològic aconseguit en les dues últimes dècades, ve donada, d'una banda, pel seu elevat cost, però, de l'altra, pel pes dels acumuladors d'energia necessaris, d'autonomia reduïda i les prestacions encara limitades.

La robòtica ofereix suplir la pèrdua de capacitat motriu de persones discapacitades i també de les persones grans que, amb l'edat, veuen progressivament reduïda la seva motricitat i mobilitat. Les cadires de rodes motoritzades constitueixen, per ara, una forma molt important d'adquirir o de mantenir la mobilitat tant al domicili com en espais públics. Això es deu, d'una banda, a les millores tecnològiques experimentades per aquest tipus de cadires en els darrers anys, especialment a la reducció del seu pes i del seu cost i a la vegada a l'increment de la seva autonomia (figura 11). D'altra banda, l'increment en l'ús en els espais públics s'ha vist afavorida per la sensibilització quant a la supressió de les barreres arquitectòniques en les obres públiques, que fa que el nombre d'itineraris adaptats augmenti dia a dia.

L'ús de cadires de rodes motoritzades als espais públics també s'ha vist propiciada amb la introducció de la telefonia mòbil com a element de seguretat i d'ajut remot, i la

dels sistemes GPS que permeten guiar en entorns urbans. A més, amplia les possibilitats de lleure i de cultura de les persones amb severes discapacitats motrius i fins i tot amb paràlisi cerebral, ja que permet desenvolupar sistemes de

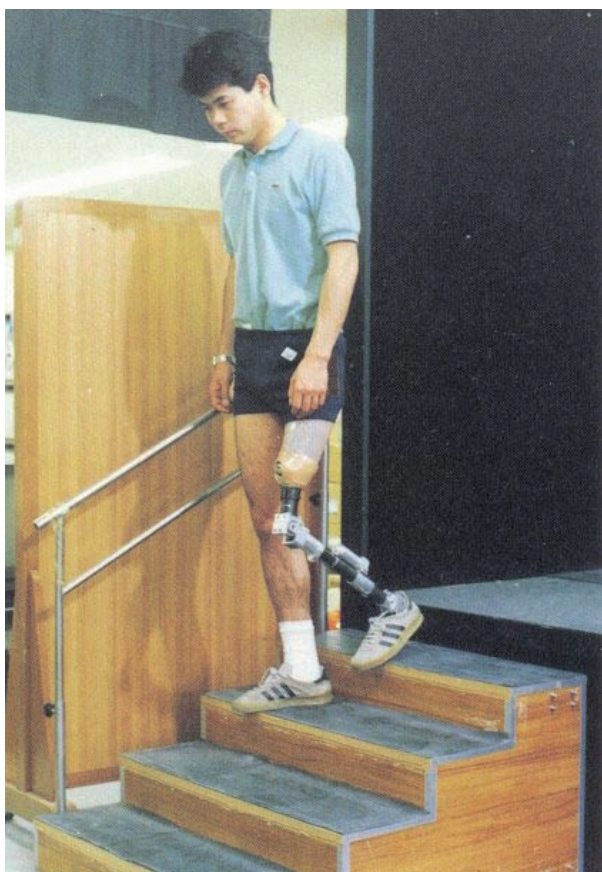


FIGURA 10. Pròtesi d'extremitat inferior.



FIGURA 11. Cadira motoritzada apta per a espais domèstics i urbans.

guiatge assistit o fins i tot automatitzat tot dotant la cadira d'un sistema de planificació de rutes i d'evasió d'obstacles per a poder circular amb seguretat per recintes restringits com ara d'exposicions o altres manifestacions culturals i lúdiques.

La necessitat de les persones discapacitades de disposar de certa autonomia, com en el cas dels tetraplègics, ha obligat a buscar solucions tecnològiques alternatives a l'assistència personal les vint-i-quatre hores del dia.

La robòtica ha presentat certes expectatives com ara un braç assistencial a disposició de l'usuari per a poder realitzar algunes tasques elementals com donar el menjar o begudes, assistir en la neteja personal, passar les pàgines d'un llibre o acostar i manipular elements propis de l'entorn domèstic. Els primers esforços significatius en aquest camp arrenquen el 1988 a la Veterans Administration Medical Center. Es volia donar resposta a l'increment de casos de tetraplegia i d'amputacions de les víctimes de la guerra del Vietnam. Es va desenvolupar una plataforma mòbil dotada d'un braç robòtic, projecte MOVAR, que no va anar més enllà de la fase experimental. Posteriorment, han sorgit altres iniciatives significatives en aquesta mateixa direcció, com el projecte MANUS (1992), que consisteix en un braç muntat sobre una cadira de rodes que controla l'usuari (figura 12), que han donat lloc a productes comercials de moderada o minsa acceptació. El 1996 va ser desenvolupat el projecte més ambiciós, el MOVAID, finançat per la UE, que pretenia desenvolupar un robot autònom capaç d'ajudar l'usuari en certes tasques domèstiques.



FIGURA 12. El MANUS, braç robot muntat sobre la cadira.



FIGURA 13. Robot TOU, desenvolupat a la UPC basat en una estructura flexible.

Tots aquests projectes (figura 13) han aconseguit avenços molt significatius; malgrat tot, encara no es disposa d'un robot assistencial eficient, fiable i econòmic que respongui plenament a la demanda d'autonomia de les persones severament discapacitades.

Actualment hi ha molts centres de recerca que estudien aquesta problemàtica, tant pel que fa al desenvolupament d'ajuts per a persones grans, com per a retornar la mobilitat a les persones amb lesions medul·lars. En aquest cas, hi ha diversos projectes en curs orientats en dues direccions diferents. En primer lloc, l'estimulació elèctrica muscular per a poder controlar el moviment de les extremitats i, en segon lloc, l'estudi de la connexió elèctrica dels senyals que la medul·la transmet en el punt del seccionament traumàtic.

En el primer cas, el de l'estimulació elèctrica funcional, l'obstacle a superar és el de la dosificació de l'excitació que ha de permetre controlar els moviments de forma precisa en força i en velocitat. Tot i els avenços assolits, encara no s'han obtingut resultats prou satisfactoris per a poder controlar les extremitats inferiors com es faria amb una estructura robòtica, i poder realitzar amb eficiència i seguretat els moviments de caminar.

En el segon cas, el de la recuperació de la connectivitat medul·lar, tampoc s'ha passat de l'experimentació positiva

realitzada en rates. S'ha aconseguit obtenir el senyal elèctric de les terminacions medul·lars sobre xips sobre un suport ceràmic implantats en el punt de la lesió, i obtenir una interpretació correcta de les ordres donades per aprenentatge mitjançant xarxes neuronals.

Aquests treballs que s'estan portant a terme en el camp de les lesions medul·lars han despertat grans expectatives en aquests tipus de lesionats. No obstant això, hi ha certes divergències entre l'alternativa de retornar la mobilitat amb les seves pròpies extremitats, tot acceptant les limitacions funcionals que imposen les limitacions tecnològiques, o bé utilitzar les cadires de rodes motoritzades dotades de sistemes de navegació autònoma cada vegada més eficients i més ràpides i còmodes.

El repte dels sistemes tecnològics que es desenvolupen en el camp assistencial és el d'aconseguir tant l'eficiència i uns costos més assumibles, com també el de la seva aparença i funcionalitat, és a dir, la seva acceptabilitat. ■

Conferències

- Robomed, 1st European Conference on Medical Robotics. Barcelona, 1994.
- International Conference on the Engineering in Medicine and Biology.
- IEEE International Conference on Engineering in Medicine and Biology.
- IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.
- IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA).
- International Conference on the Rehabilitation Engineering (RESNA).

Publicacions

- Journal of Biomedical Engineering.*
- Disadvantaged, Rehabilitation Robotics Newsletter.*
- IEEE Transactions on Biomedical Engineering.*
- IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering.*