

A hónap sebészete Műtőrobotok és Teleoperáció

Haidegger Tamás, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

A robotika számos helyen és sokféle formában van jelen a gyógyászatban. Az apró elektromos késektől a teremnyi robotkarokig különböző fejlesztésekkel találkozhatunk. Különösen érdekesek a több karból álló, többcélú sebészrobot rendszerek.

A technika dinamikusan fejlődik, folyamatosan születnek az új eredmények, és várható, hogy hamarosan komoly áttörést hoznak a kutatások az alkalmazások terén is. A jelen cikk célja, hogy röviden összefoglalja és rendszerezze a különböző eszközöket, bemutassa a használatukkal járó előnyöket és hátrányokat, valamint vázolja a jelenlegi kutatási irányokat.

ROBOTIZÁLT ESZKÖZÖK

A robotizált orvosi segédeszközök témakörét alapvetően öt nagy részre tagolhatjuk. Először is vannak szerviz robotok, elsősorban idősebb vagy magatehetetlen emberek ellátására, életkörülményeik javítására. A rehabilitációs robotok olyan mechanikus szerkezetek, amelyek közvetlenül alkalmazhatók neuro-motoros funkciók klinikai rehabilitációjára. A diagnosztikai robotok elsősorban adatgyűjtésre és mérésre specializálódtak, míg a protézisek közül leginkább a végtagokat helyettesítik robotikai szerkezetekkel. Végül a sebészrobotok (műtőrobotok) komplett manipulátor rendszerek, amelyek bonyolult sebési beavatkozások végrehajtására és támogatására képesek.

A sebészrobotokat (surgical robots) működésük alapján három kategóriába sorolhatjuk. Vannak a fél-automata rendszerek, a közvetlenül irányított rendszerek és a teleoperációval működtetettek. Különböző robotokat terveztek és építettek már mindhárom kategóriában, hogy megoldják a neurológiai, ortopédiai, urológiai, arcsebészeti, szemészeti, valamint szív és érrendszeri műtéti beavatkozások jelentette kihívásokat. Különösen elterjedt a robotok használata a laparoszkópiás vizsgálatoknál, ahol endoszkópiás módszerekkel vizsgálják a beteget. Egyes esetekben nemcsak egy, hanem két vagy akár három robotkart használnak, mivel ezekkel bizonyos összetett feladatok sokkal könnyebben végezhetők el. Az egyes manipulátorokon különböző end-effektorok (végszerszámok) lehetnek, vagy akár szenzorok is. Az ilyen rendszereket multi-manipulátoroknak hívják.

Az első kategóriába tartozó fél-automata robotok működése hasonló ipari társaikéhoz: előzetes felvételek (CT, MRI) alapján megtervezett útvonalon mozogva hajtják végre feladatukat. Ha megvan a mozgásterv és az útvonal, meg kell határozni a valóságos robot relatív helyzetét a beteg

anatómiai referenciapontjaihoz képest, azaz illeszteni kell a tervet a valóságos körülményekhez. Ezt nevezik regisztrációnak. Ezek után a robot minden további emberi beavatkozás nélkül képes végrehajtani az operációt.

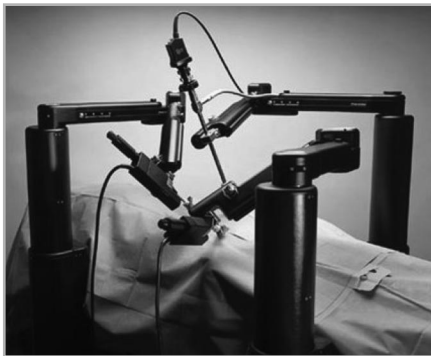
Megfelelő felépítés esetén a sebészrobotokat közvetlenül a sebész is irányíthatja. Ilyenkor a gépek – speciális eszközökkel végükön – az orvos karjainak meghosszabbításaként funkcionálnak. Mikromanipulációs műtéteknél, microvasculáris, urológiai és a szemet érintő operációknál sűrűn alkalmazzák.

A harmadik kategóriába tartoznak a teleoperációval vezérelt robotok, amelyek alapvetően három részből épülnek fel: egy vagy több manipulátorból (slave eszköz), egy irányító konzolból (master eszköz) és egy látórendszerből. Az orvos egy, a látórendszer által közvetített kép alapján végzi mozdulatait, és figyeli azok hatását. A vezérlőjelek a mestertől egy szabályozón keresztül jutnak el a manipulátorhoz, amely pontosan utánozza azokat. Egyes rendszerekben erővisszacsatolást alkalmaznak, hogy a kezelőnek legyen információja a robot végén lévő eszköz és a szövetek közötti erőhatásokról is.

A LEGFONTOSABB MŰTŐROBOT RENDSZEREK

A műtőrobotok első generációja ipari manipulátorokból fejlődött ki. Először az 1980-as évek végén alakítottak át egy NOKIA Puma 560-ast, hogy egy orvosi csipesz segítségével képes legyen szövetmintákat venni. A korai rendszereknek még számos hiányossága volt. A merev kialakítású orvosi eszközök korlátozták a robot manipulálhatóságát, mivel fixen meghatározták a mozgás tengelyét. A kezdeti két dimenziós látórendszerek nem biztosítottak mélységérzetet az orvosoknak, és nagyon nehézkes volt a kamera mozgása is.

1991-ben jelent meg a Computer Motion által tervezett Zeus orvosi robotrendszer (1.ábra), amely komoly áttörést jelentett. A master-slave alapon működő kettő plusz egy karú robot segítségével realitássá vált a valódi minimális beavatkozással járó sebészet (Minimal Invasive Surgery). Ez azt jelenti, hogy az orvosok a bőrfelszín teljes megnyitása nélkül, mindössze három ponton ejtett bemetszéseken történő behatolással tudnak műteni, miközben endoszkópon keresztül figyelik az eseményeket. A robotot fejlett látórendszerrel és precíziós irányítással látták el, így pontosan követni tudja a műtőorvos minden mozdulatát. Sőt, még bizonyos fokú tremor szűrést is építettek bele, valamint lehetőséget ad a mozdulatok átskálázására, azaz a robot



1. ábra
Zeus, az első háromkarú robotrendszer, amelyet valódi beavatkozásoknál is alkalmaztak

sokkal finomabb mozdulatokat tud végrehajtani, mint amilyenekre az ember képes. Speciális kesztyűk és egyéb eszközök segítségével tudják beolvasni az orvos mozdulatait, amelyeket azután a két, egyenként hat szabadságfokú (Degree of Freedom) kar tökéletesen végrehajt, az eredményt pedig a négy szabadságfokú karra szerelt endoszkóp által közvetített képen követhetik nyomon.

Hatalmas fejlődést jelentett a Zeus a laparoszkópiában, és jól tudták használni nagy pontosságot igénylő szív- és érrendszeri beavatkozásoknál. 2001-ben abbahagyták gyártását, helyette új, modernebb rendszerek fejlesztésébe fogtak. Mai napig több száz Zeus dolgozik kórházakban és kutatóközpontokban.



2. ábra
A da Vinci komplett teleoperációval működtethető robotrendszer

Nem sokkal a Zeus után, 1992-ben mutatta be az Intuitive Surgical cég a da Vinci névre keresztelt robotrendszert (2. ábra), amely sok tekintetben még a Zeus-on is túltesz. A kamera itt már közvetlenül az orvos irányítása alatt áll, aki egyszerű parancsszavakkal tudja változtatni a nagyítását vagy az irányzékot. A vezérlőpult egész irányító központtá fejlődött, és nemcsak két kamerás sztereo látórendszert építettek bele, hanem számos ergonomiai funkcióval is ellátták. A sebész három ujjára tépőzáras gyűrűket erősít, és így a robot a rászerezett eszközzel három dimenzióban képes követni az ujjak mozgását. A master eszköz kialakítása olyan, mintha az orvos egy szikét vagy egy ollót fogna, így

főként a begyakorolt mozdulatokat kell végeznie. A da Vinci is alapvetően két darab, hat szabadságfokú manipulátorból áll, de ellátták egy plusz csuklóval is, amely hatékonyan tudja imitálni az emberi kézfej mozgását. A kamerát egy különálló, négy szabadságfokú robotkarra szerelték fel. Az orvos kezének remegés-szűrését valós időben végzi a szerkezet, és be lehet állítani, hogy a mozdulatokat akár ötöd részre skálázza át. Ez volt az első olyan orvosi robot, amely megkapta az amerikai FDA (Food and Drug Administration) minősítését is, így számos ország mellett az Egyesült Államokban is alkalmazásba állhatott.

Természetesen sok egyéb rendszer is kifejlesztésre került, a sebészrobotoktól a navigációt segítő orvosi robotokig.

A SEBÉSZROBOTOK EREDMÉNYEI

A sebészrobotok alkalmazása általában véve csökkenti a beavatkozások súlyosságát, kevesebb szövetkárosodást okoz, csökken a műtőben töltött idő és gyorsabb a betegek felépülése is. Ezek az előnyök egyre népszerűbbé teszik a műtőrobotokat, és ma már számos kórházban megtalálhatjuk őket. Nagy beruházási költségük miatt elsősorban Észak-Amerikában és Nyugat-Európában terjedtek el. Magyarországon jelenleg nincs alkalmazásban sebészrobot. Ugyanakkor a BME Gépészmérnöki karán négy intézmény közreműködésével ipari robotokból komplett gyógytornáztató rendszert építettek (RehaRob), amelynek nagy nemzetközi visszhangja volt.

Bizonyos beavatkozásoknál elengedhetetlen ilyen szerkezetek használata, mert olyan precizitású műveleteket kell végrehajtani, amikre szabad kézzel csak a legkiválóbb orvosok képesek. Nagy előrelépést jelentenek a robotok az agysebészetben, a szívkoszorú ereket érintő műtéteknél valamint a csípő és térd protézisek beültetésénél. Ezeknél a beavatkozásoknál azt használják ki, hogy a manipulátor tized milliméter pontossággal képes követni az orvos által megadott, illetve megvalósított mozdulatokat, és a zavart jelentő remegések és rángások kiküszöbölésével sima és megbízható mozgású munkatárs. Az ember és a robot legfontosabb szempontokból történő összehasonlítását az 1. táblázat tartalmazza.

A műtőrobotok másik hatalmas előnye a pontosság mellett a távvezérelhetőség. Mivel az operációt végző orvosnak nem kell közvetlen rálátással lennie a betegre, elhelyezkedhet egy másik szobában, de akár más kontinensen is. Különösen fontos lehet ez olyan helyzetekben, ahol a technológiát könnyebb biztosítani, mint a szakképzett orvost, ahol esetleg sugárzásveszély vagy más kockázati tényező áll fenn. 2001 szeptemberében sikeresen valósították meg egy távműtétet az Atlanti-óceánon keresztül. A New Yorkban felállított vezérlő és optikai szálon történő internet alapú kapcsolat segítségével az orvosok sikeresen hajtottak végre egy egyórás műtétet a Strasbourgan fekvő betegen. Később kísérleti jelleggel a Nemzetközi űrállomáson végeztek imitált operációt, amelyet a Földről irányítottak.

Jellemző	Ember		Robot	
Koordináció	Limitált szem-kéz összehangolás	-	Nagy pontosságú	+
Ügyesség	Az érzékelési tartományban igen nagy	+	Szenzoroktól függ, lehet nagy	+
Információ-integrálhatóság	Magas szinten nagyon jó	+	Magas szinten az MI határozza meg	-
Adaptivitás	Alacsony szinten túlterhelhető	-	Alacsony szinten jó	+
Teljesítményállandóság	Nagyfokú	+	A felépítéstől függ, de elég alacsony	-
Skálázhatóság	Idővel nagyon romlik	-	Tartós	+
Sterilizálhatóság	Biológiailag korlátozott	-	A felépítéstől függ	+
Pontosság	Megfelelő	+	Megfelelő	+
Helyigény	Biológiailag korlátozott	-	Nagyfokú	+
Érzékenység	Általánosan adott	+	Jelenleg még igen nagy	-
Univerzalitás	Nagyfokú (sugárzás, fertőzések)	-	Nem számottevő	+
	Általánosan használható	+	Nagyon specifikus	-

1. táblázat
Az ember és a robot képességeinek összehasonlítása Speich és Rosen nyomán

Alapvető követelmény az orvosi rendszerek biztonságossá tétele. Ez megnyilvánul a tervezésben, a konstrukciós kialakításnál, az irányításban és a használat során bevezetett intézkedésekben egyaránt. Azokban az esetekben, ahol a robotok automatikusan végzik a beavatkozást (csontvágás, varrás) szükséges, hogy az orvos bármikor megállíthassa a műtétet, átvéve az irányítást a robottól, ha úgy látja jónak. A beavatkozás során a műtőorvos csak a kamerák és egyéb szenzorok által közvetített képet látja, így fontos, hogy legyen egy asszisztens közvetlenül a beteg mellett, aki figyelemmel kíséri a tényleges beavatkozást, és bármilyen anomáliáról azonnal értesíti a kezelőt.

Az orvosi robotok alkalmazhatóságának vannak etikai korlátai. Jelenleg nem megoldott kérdés a jogi szabályozás. Noha a Zeus és a da Vinci robotok esetében az automatikus irányítás hiánya miatt nem merül fel ilyen kérdés, más, fél-automata orvosi robotoknál problémás lehet orvosi műhibák esetén a felelősség megállapítása. Nemcsak a jogalkotásba, hanem az oktatásba is integrálódniuk kell az új eszközöknek. Már a graduális képzés során fel kell készíteni a leendő orvosokat a robotizált eszközök megfelelő kezelésére. A közvéleményt külön meg kell győzni arról, hogy a gyógyászatban alkalmazott mechanikus rendszerek megbízhatóak, és nem jelentenek külön veszélyforrást.

KUTATÁSI IRÁNYOK

A minimális beavatkozással járó operációk (Minimal Invasive Surgery) széles körű elterjedése minőségi javulást hozhat a betegek kezelésében. A csökkentett szöveti károsodás és felépülési idő elviselhetőbbé teszi a műtétet, és költségcsökkenéssel is jár. Komoly előrelépés lenne, ha redundáns és hiperredundáns (hatnál több szabadsági fokú) robotok segítségével egyes műtétek elvégezhetőek lennének a természetes testnyílásokon keresztül is, és nem kellene megnyitni a beteg szervek körüli területeket.

Az orvosok részéről sokszor lenne igény egy harmadik robotkarrá is, amely betöltené az asszisztens szerepét: fél-rehajtaná a szöveteket, kitámasztaná az egyes szerveket, és egyéb módon támogatná a sikeres műtétet. A da Vinci következő generációja már három manipulátorból fog állni,

és ehhez járul még a kamerát, endoszkópot tartó kar. A bonyolultabb rendszerrel járó irányítási problémákat meg kell oldani, és kialakítani a megfelelő vezérlőkonzolt, amely praktikus és ergonómikus, biztosítja, hogy az orvos természetesen, különösebb komplikációk nélkül használhassa az eszközt.

Folynak kísérletek miniatürizált, hernyőszerű robotok alkalmazására, amelyek autonóm módon bejutnak a szervezetbe, elérik a kívánt területet, és ott effektoraik segítségével teleoperációval helyben végzik el a szükséges beavatkozást. Természetesen ehhez hasonló robotok szolgálhatnának megfigyelő, diagnosztikai egységként is, ahogy már vannak működő kamerás rendszerek.

Nagy előrelépés várható még a kezelőrendszerek vizuális megjelenítőinek terén is. Az újabb és újabb 3D látványt nyújtó technikák és virtuális valóság rendszerek előretörésével lehetőség nyílik olcsóbb, mégis kiváló minőségű vizualizációs rendszerek alkalmazására, amelyekkel az orvosok lényegesen jobb eredményeket érhetnek el. A binokuláris és autozoom-os látórendszerek által közvetített kristálytisza, nagyfelbontású képet nézhetik majd, amely tetszőlegesen nagyítható. Különböző szenzoros adatokból nyert (sensory fusion) 3D anatómiai atlaszok segíthetik a sebészeket a képeken való tájékozódásban, míg a kiterjesztett valóság rendszerekkel (augmented reality) lehetőségessé válhat a digitális információk valósággal kevert szolgáltatása, akár a műtétek közben is.

A látáson kívül a tapintásukat is igénybe tudják venni, mivel már működnek kísérleti haptikus interfészek. A haptikus interfészek lehetővé teszik az ember és a gép közötti tapintás alapú kommunikációt, mert amellet, hogy pozíció-érzékelés révén információt visznek be a számítógépbe, rezgések útján visszajelzést adnak. Mindez nagyon hatékonyra teszi a kapcsolódást, hiszen az ember finoman tudja szabályozni saját végtagjainak mozgását, és a megfelelő visszajelzés segítségével a több dimenziós finom mozgásokat lehet a vezérlést jelentő információ bevitelére használni. Sokszor kritikus, hogy a műtőorvos valós érzettel rendelkezzen az éppen preparált szövetről, érezze keménységét, ellenállását (force feedback). A sebészrobotok végbeavatkozóiba (end effector) épített erőmérő szenzorokkal évek óta folynak a kísérletek.

Elkerülhetetlen az automata funkciók és eszközök fokozatos beépítése a robotokba. Ahogy egyre bonyolultabbá válnak a szerkezetek, és egyre komplexebb feladatok elvégzésére lesznek képesek, felmerül az igény bizonyos jól algoritmizálható és automatizálható feladatok önálló végrehajtására. Míg a robotok mozgásának irányítása az orvos kezében van, megvalósítható a tremor szűrésén kívül például a légzés követése, vagy a szív dobbanásainak kompenzálása. Erre azért van nagy szükség, mert zavaró hatásként lassítják a műtétet, kockázati tényezőt jelentenek. Jelenleg még a szívet érintő operációk esetén leszorítókat és rögzítéseket kell alkalmazni, hogy egyáltalán oda tudjanak nyúlni a robottal.

Komoly jövője lehet még az orvosi robotok részeként fejlesztett egyéb eszközöknek is (konzolok, interfészek), amelyeket kiválóan tudnak használni medikusok képzésére, hiszen élethű szimulációk révén olcsón és hatékonyan imitálható bármilyen valós életbeli szituáció. Úttörők ezek a rendszerek, mert szinte valóságos szimulációval költség és kockázatmentesen biztosítanak lehetőséget a fiatal sebészeknek a gyakorlásra. Kanadában egyes egyetemeken már el is kezdték a haptikus interfésszel összekötött virtu-

ális valóság rendszerek alkalmazását, amelyekhez a szimulációs adatokat valós, robotok által végzett műtétekből nyerik.

Ezekkel az új lehetőségekkel felvértezve számos olyan beavatkozásra nyílik lehetőség, amelyek elvégzésére korábban nem volt mód a beteg tartós károsítása nélkül.

JÖVŐKÉP

Vitathatatlan, hogy a robotika és az orvostudomány háttérterületén kialakult gyógyászati robotok új távlatokat nyitnak mind a rehabilitációban, mind pedig a műtéti beavatkozások terén. Japán és az Egyesült Államok után ma már Európa is felismerte a robotika alkalmazásának újszerű lehetőségeit a gyógyászatban, és egyre több kutatóintézetben építenek új szerkezeteket, kísérleteznek új installációkkal. Az egyre kifinomultabb rendszerek megjelenésével számos beavatkozás válik lehetségessé, amelyekre végrehajtására korábban nem volt eszköz az orvosok kezében. Emberek százezreinek élete válhat könnyebbé az innovatív technológiáknak köszönhetően.

Megjegyzés: A képek, illusztrációk a szakirodalomban megadott forrásokból kerültek beemelésre, valamint az Intuitive Surgical oldaláról.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Etienne Dombre: Introduction to Surgical Robotics, Montpellier, 2005
- [2] Gary S. Rogers, Caroline G. L. Cao: Computer-Enhanced Instruments: The next Generation of Surgical Robots; Ballantyne, 2004
- [3] John E. Speich, Jacob Rosen: Medical Robotics; Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering, G. Wnek and G. Bowlin, eds., Marcel Dekker, New York, pp. 983-993, 2004
- [4] Russel H. Taylor, Dan Stoianovici: Medical Robotics in Computer-Integrated Surgery; IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 19, No.5, pp. 765-781, 2003
- [5] Achille L. Gaspardi, Nicola di Lorenzo: State of the Art of Robotics in General Surgery, Business Briefing: Global Surgery, 2003

A SZERZŐ BEMUTATÁSA



Haidegger Tamás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Villamosmérnöki és Informatikai Szakának hallgatója 2001 óta. Ezzel párhuzamosan másodéves a BME és a Semmelweis Egyetem közös Orvosbiológiai Mérnök Szakán. Kutatási területe redundáns robotok irányítási algoritmu-

sainak vizsgálata, különös tekintettel az űrbeli és az orvostechikai alkalmazásokra. 2002 óta aktív tagja a Magyar Villamosmérnök- és Informatikus-hallgatók Egyesületének, két évig az elnökség tagja. Számos alkalommal vett részt a Nemzetközi 24 órás Programozóverseny szervezésében, 2005-ben a főrendezői feladatokat látta el. 2004-06 között az ACM ICPC nemzetközi programozóverseny közép-európai döntőjének főrendezője.