

Robot kirurgias



KITARO YOSHIMITSU

Teise põlvkonna robot.

teisest küljest pöörati suurt tähelepanu Jaapani ühiskonna vajadustele.

Kirurgi robot-assistent

Nii nagu Euroopas ja USAs, vananevad inimesed ka Jaapanis. Sellega kaasneb paratamatult suurem vajadus meditsiinilise personali järele polikliinikutes ja haiglates. Näiteks annab tööjõunappus ennast tunda operatsioonisaalides, kus kirurgil tuleb sageli täita rolle, mis ei vasta tema kvalifikatsioonile. Vajadus abipersonali järele sundis USA firmat Robotic Surgical Tech, Inc käivitama esimesena kirurgi robot-assistendi projekti. Robot Penelope, mida firma pakub, suudab tuvastada piiratud sõnavaraga kõnekäsklusi, omab instrumentide eristamiseks visuaaltuvastust ning suudab planeerida manipulaatori liikumist kirurgiliste instrumentide ulatamisel ja vastuvõtmisel. Penelope puudus on piiratud võime kohanduda inimpartneri liigutustele ja käitumisele, mis tingib pika ja tülika häälestusprotsessi.

Alternatiivse idee pakkus välja HAMI tippkeskuse südamekirurg Fujio Miyawaki. Ta seadis kvalitatiivselt uue eesmärgi – anda Penelope-taolisele robotile lisaks võime õppida ja kohandada inim-

partnerist kirurgi käitumuslikele iseärasustele just nii, nagu seda teeb kogenud opiõde. Etteruttavalt olgu öeldud, et tegemist ei ole utoopilise ülesandega, sest praegu on töörihm loonud juba neljanda põlvkonna robot-assistendi, mis erineb oma kolmest eelkäijast võime poolest iseseisvalt õppida ja tegevuse käigus ümber häälestuda. Samuti viib robot endoskoopilise operatsiooni instrumentid kanüüli avani täpsemalt ja kiiremini kui inimene.

Robot-operatsiooniõde

Miks on robot-assistendi loomine nii keeruline? Vilunud opiõde ulatab kirurgile instrumendi just vajalikul hetkel. Kui instrumendi otsimisele kulub aega või ulatatakse vale instrument, lisab see pinget niigi kriitilise ülesande täitmisel. Tähelepanu hajub ja sunnitud viivitus paneb kirurgi kaotatud aja tagasivõitmiseks kiirustama.

Operatsiooniõde peab seega olema tähelepanelik kõige suhtes, mis toimub kirurgi tööpiirkonnas, ja nägema ette iga liigutust. Eksimuse vältimiseks peab õde olema äärmiselt distsiplineeritud ja teadma kogu kirurgilist protseduuri mitte halvemini kui kirurg ise. Nii on ideaalne assistent suuteline ulatama mis tahes instrumendi suulise korralduse ja ajastama ulatamise täpselt selleks hetkeks, mil kirurg sirutab käe. Sellega peaks toime tulema ka ideaalne robot-assistent. Veelgi enam – teoreetiliselt peaks robot ületama oma kolleege sellega, et ei väsi ja kriitilises olukorras ei teki tal häirivaid emotsioone.

Liigutuste analüüs ja roboti jõudlusnõuete selgitamine

Sisuliselt nõuab Fujio Miyawaki seatud eesmärk, et kirurgi robot-assistent läbib Turingi testi, kuigi pisut modifitseeritud kujul: verbaalne interaktsioon on siin asendunud kinemaatilise interaktsiooniga. Teisi sõnu: arst ei tohi saada aru, et ta töötab koos masinaga, kui ta just ei vaata kõrvale. Esmane nõue selle eesmärgi saavutamisel on roboti funktsionaalselt korrektno käitumine ja piisav jõudlus. Et selgitada kirurgi ja opiõde koostööd, korraldati Miyawaki laboris hulk mõõtmisi, kus kasutati kolmemõõtmelist videojälgimissüsteemi ning pilditöötlustarkvara Frame-DIAS II. Viimane võimaldab automaatselt jälgida valgust peegeldavaid markereid kätel ja kehal ning määrata nende koordinaate täpsusega kuni pool millimeetrit.

Saadud andmete põhjal uuriti spetsiifilistele liigutustele vastavaid markerite trajektoore. Trajektooreid

Tänapäeval räägitakse üha julgemini robotite kasvavast rollist meditsiinis.

Robotid võimaldavad kirurgilisi protseduure teha täpsemalt ja kiiremini, leevendavad vajadust kvalifitseeritud tööjõu järele ning abistavad rutiinsetel, kuid vältimatutel abitöödel. Tuntuim näide on robotsüsteem „da Vinci”, mis aitab kirurgi südameoperatsioonidel.

Neurokirurgia, ortopeediliste, urologia- ja teiste spetsiifiliste rakendustega on seotud hulk rahvusvahelisi robotiprojekte. Lisaks assisteerivatele robotitele jõuavad haiglatesse ja polikliinikutesse peagi ka vahetult protseduure tegevad robotid, näiteks mikrorobot, mis liigub veresoontes ning kannab ülitäpseid ravimidoose elundite juurde. Mobiilsed robotid toimetavad patsientidele kindlatel kellaaegadel ravimeid, transpordivad haiglakompleksides meditsiinivarustust või koristavad protseduuriruume ja koridore.

Järgnevalt lähemalt ühest esimesest kirurgi robot-assistendist, selle sünniloost ja edasisest käekäigust, milles oma osa on mänginud ka Eesti arvuti-teadlased.

Algus Jaapanis

Idee luua kirurgi robot-assistent tärkas Tokyo Denki ülikoolis 2003. aastal. Nimelt käivitati seal Jaapani 21. sajandi tippkeskuste riiklikku programmi silmas pidades professor Katsuhisa Furuta juhtimisel inimesele kohanduva mehhatroonika tippkeskus HAM (*Human Adaptive Mechatronics*). Lisaks tehnikateadlastele haarati tippkeskuse projektidesse arste, geeni-tehnolooge, matemaatikuid ja teiste erialade inimesi. Uurimistemaatika tulenes ühest küljest tippkeskuse teadlaste senisest kompetentsist,

KIRURGI ROBOT-ASSISTENT

Idee luua kirurgi robot-assistent tärkas Tokyo Denki ülikoolis 2003. aastal, selle idee elluviimiseks käivitati seal professor Katsuhisa Furuta juhtimisel inimesele kohanduva mehhatroonika tippkeskus. Projekti eesmärgiks on anda robotile võime õppida ja kohanduda inimpartnerist kirurgi käitumuslikele iseärasustele just nii, nagu seda teeb kogunud opiõde.

2005. aastal kandus osa teadustööst üle Tallinna Tehnikaülikooli arvutiteaduse instituuti ja küberneetika instituudi juhtimissüsteemide osakonda, Eesti-poolse töörühma ülesandeks sai lahendada roboti kontekstitudlike teadmiste modelleerimise ja roboti juhtimisega seotud probleemid.

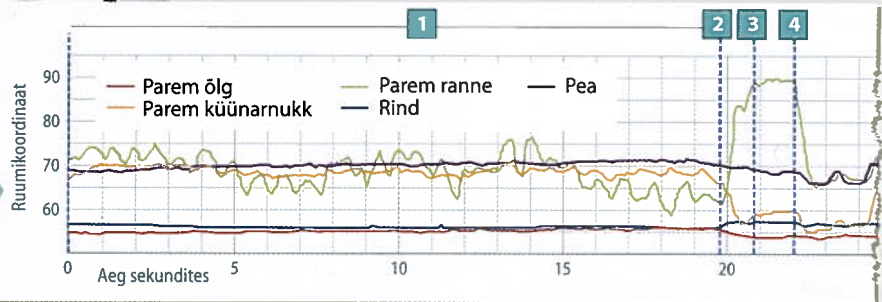
Liigutuste mõõtmine ja analüüs



Et selgitada kirurgi ja opiõde koostööd, korraldati HAM keskuse laboris hulk mõõtmisi, kus kasutati kolmemõõtmelist videojälgimissüsteemi ning pilditöötlustarkvara Frame-DIAS II. Viimane võimaldab automaatselt jälgida valgust peegeldavaid markereid kätel ja kehal ning määrata nende koordinaate täpsusega kuni pool millimeetrit.

Markerid kirurgi kehal ja kätel võimaldavad jälgida ja tuvastada tema liigutusi. Jälgimissüsteemis kasutatav ajaline lahutusvõime on 60 kaadrit sekundis.

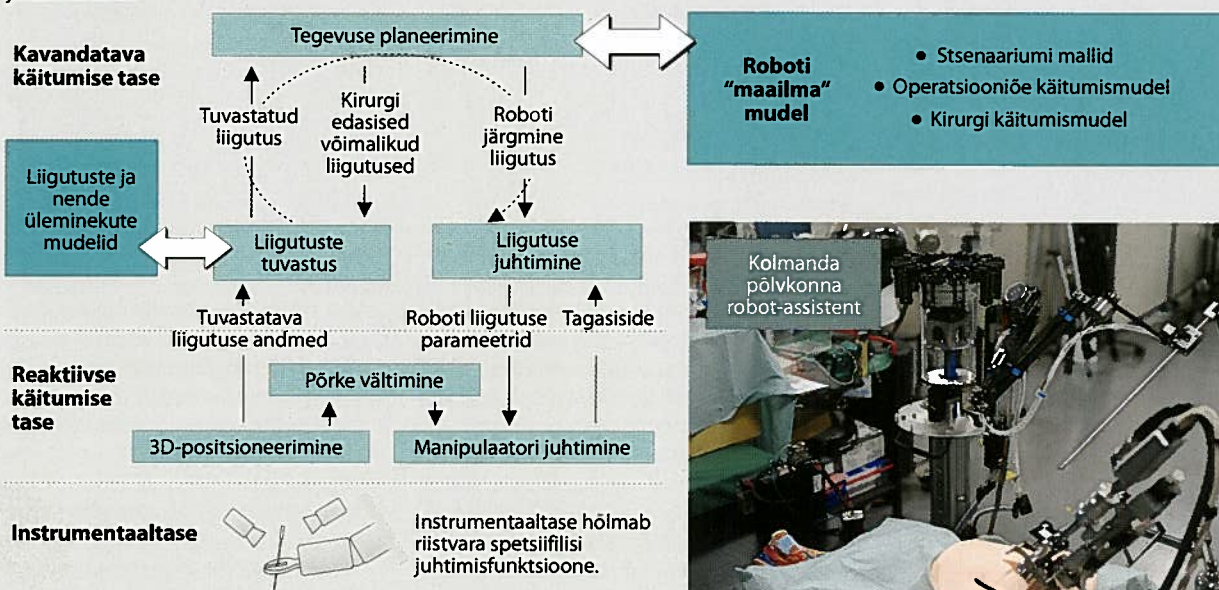
1. Töö instrumendiga
2. Instrumendi eemaldamine kõhuõõnest
3. Instrumendi asetamine lauale
4. Imuri võtmine



Eri kehaosadele kinnitatud markerite liikumistrajektorid ning nende segmenteerimine üksikuteks liigutusteks (Kentaro Ohnuma järgi).

Robot-assistendi juhtimisarhitektuur

Et robot reageeriks võimalikult õigesti mitmesugustes olukordades, nõuab see suure arvu liigutuste ja liigutuste kombinatsioonide tuvastust. Roboti teadmisi temasse puutuvast maailmast esitavad kontekste siduvad üldistatud mudelid ning hulk kontekstispetsiifilisi mudeleid, mis kokku määravad roboti teadmiste horisondi. Vastavalt mudelite hierarhiale saab robotis eristada kolme juhtimistaset.



Fotod: Kitaro Yoshimitsu

dünaamika analüüs võimaldab tükeldada pikemad liigutusteseeriad üksikliigutusteks ning eristada liigutustevahelistele üleminekutele iseloomulikud tunnused.

Mõõtmistelt mudelitele

Et robot reageeriks võimalikult õigesti mitmesuguste olukordades, nõuab see väga suure arvu liigutuste ja liigutuste kombinatsioonide tuvastust. Kasutab ju kirurg eri operatsioonide korral erinevaid võtteid ja isegi samas olukorras käitub ta iga kord pisut isemoodi, rääkimata erinevustest kahe või enama inimese käitumises. Roboti tööd lihtsustaks oluliselt käitumise laiema konteksti tundmine. Teades tegevuse tausta ja üldist plaani, oskaks robot oodata vaid teatud liigutuste järgnevusi ja mõista paremini nende otstarvet. Viimane tõstab omakorda roboti reaktsiooni kiirust ja planeerimise täpsust. Taustteadmiste põhiosa moodustaksid antud juhul kirurgilise protseduuri stsenaarium ja instrumendid, mida seal kasutatakse. Nimetatud idee pakkus Fujio Miyawaki tööruhmale välja käesoleva loo autor oma külas-käigul HAMi tippkeskusesse 2004. aastal. Ideest haarati kinni ning osa projektiga seotud teadustööst kandus 2005. aastal üle Tallinna Tehnikaülikooli arvutiteaduse instituuti ja küberneetika instituudi juhtimissüsteemide osakonda. Eesti-poolse tööruhma ülesandeks sai lahendada roboti kontekstitudlike teadmiste modelleerimise ja roboti juhtimisega seotud probleemid.

Uuringutes selgus peagi, et kontekstispetsiifiliste mudelite teravikuks sidumisel on üksikliigutuste detailid otstarbekas kõrvale jätta. Roboti teadmisi temasse puutuvast maailmast esitavad seega kontekste siduvad üldistatud mudelid ning hulk kontekstispetsiifilisi mudeleid, mis kokku määravad roboti teadmiste horisondi.

Üldise astme järgi jagunevad mudelid kolme rühma. Madalaima abstraktsioonitasemega rühma moodustavad liigutuste trajektoore kirjeldavad kvantitatiivsed mudelid, olgu siis diferentsiaalvõrrandite kujul või konkreetseid trajektoore esitavad numbrilised jadad. Järgmise taseme moodustavad mudelid, mis kirjeldavad üksikliigutuste võimalikke järjestusi ja liigutuste üleminekutingimusi. Niisuguste mudelite näiteks on mitmesuguste kvantitatiivsete laiendustega automaadid, närvivõrgud jne.

Koos abstraktsioonitasemega kasvab mudelites kirjeldatava käitumise määramatuse. Kõige abstraktsimate mudelite kihi moodustavadi roboti

tegevuse kõiki kontekste ja kontekstide ümberlülitamistingimusi kirjeldavad mudelid. Viimased tagavad roboti nn situatsioonitundlikkuse suure plaanis. Kontekstimudelid esitatakse kitsenduste süsteemidena matemaatilisi loogikaid või algebravõrrandeid kasutades.

Mudelipõhine juhtimine

Vastavalt mudelite hierarhiale saab eristada robotis ka kolme juhtimistaset. Instrumentaaltase hõlmab riisvara spetsiifilisi juhtimisfunktsioone. Juhtimiskontuur sisaldab ühelt poolt 3D-videojälgimissüsteemi roboti jaoks oluliste objektide positsioneerimiseks ja teiselt poolt manipulaatori liigutamise funktsioone, et instrumendid jõuaksid soovitud kirusega täpselt sinna, kuhu vaja. Manipulaatori trajektoori kirjeldavad madalaima abstraktsioonitaseme mudelid.

Reaktiivse juhtimise tase (ingl *reactive control*) vastab inimese reflektorisele käitumisele. Kui näiteks instrumendi ulatamisel satub kirurgi käsi liikuvale manipulaatorile liiga lähedale, peab reaktiivne juhtimine garanteerima manipulaatori ohutu peatumise või trajektoori muutuse. Reaktiivne juhtimine on sündmuspõhine ning ilmneb olukordades, mis nõuavad kiiret reaktsiooni. Roboti „instinktiivsed“ reaktsioonid on reeglina ette määratud ja need käivitab mõni sündmus keskkonnas. Reaktiivse käitumise põhimõte on: „Ära mõtle, tegutse!“ Mudelid, mille järgi toimub siin juhtimine, on suhteliselt ette määratud.

Kavandatava juhtimise tase (ingl *deliberative control*) hõlmab nii roboti enda kui keskkonna pikemaajalist käitumist, mis nõuab planeerimist muutuva kitsenduste tingimustes. Juhtimiseviis on: „Enne mõtle, siis tegutse!“ Just siin mängib olulist rolli roboti võime kohaneda ja õppida nii inimeste tegevuse passiivsest jälgimisest kui ka oma jooksvast kogemusest konkreetse inimpartneriga.

Kohandumine ja õppimine

Nii reaktiivse kui ka kavandatava juhtimise tase eeldavad, et robot on võimeline kohanema ja õppima. Nagu eespool kirjeldatud, peab robot omandatud teadmiste salvestamiseks ja üldistamiseks kasutama mitmeid mudeleid ja abstraktsiooniskeeme. Just selles valdkonnas on andnud roboti arendusse oma panuse TTÜ arvutiteaduse instituudis välja töötatud interaktsioonide ehk vastasmõjude õppimise meetod. Õpitud interaktsiooni mudeli põhjal saab robot jäljendada selle osapoolte rolle. Teiseks saab enne

käitumismudeli kasutuselevõttu tõelise operatsiooni tingimustes matemaatiliselt tõestada käitumismalli sobivust ja ohutust arvatavates opitingimustes.

Märkimist väärib ka TTÜ küberneetika instituudi juhtimissüsteemide osakonnas välja töötatud liigutuste tuvastuse hübriidne meetod. See kasutab paralleelselt mitut tuvastusalgoritmi – närvivõrke, sh Kohoneni võrke, ja statistilist mudelit. Lõpliku otsuse vastuvõtmiseks liigutuse tuvastusel korraldab arbiiter–automaat meetodite vahel hääletuse. Kõige tõepärasema otsuse valib ta välja hääletustulemuste ja meetodite usaldusväarsuse põhjal. Meetod annab liigutuste tuvastusel tulemuselt üle 90 protsendi õigeid tulemusi, mis ei ole küll veel ideaalne täpsus, kuid edasine häälestamine lubab loota oluliselt paremaid tulemusi.

Kuidas edasi?

Liigutuste visuaalne tuvastamine ja mõõtmine ei ole vajalik ainult robot-assistendi loomisel. Mitmetel erialadel mõjutab käeliste oskuste lihvimine ja liigutuste ökonoomsus otseselt jõudlust ja kvaliteeti. Head kirurgi iseloomustatakse tihti sõnadega „kindla käega“ või tublilt töömeest sõnadega „kuldsete kätega“. Spordis, kus iga sentimeeter ja sekundisajandik võib otsustada medali saamise, on liigutuste mõõtmine ja viimistlemine sportlase põhitegevus. Kirjeldatud teadustöö mõeldavad raketid on näiteks professionaalsete käitumisprofiilide õppimine ja tuvastus, käeliste oskuste mõõtmine ja hindamine ning sihtrühmaks kirurgid, minöörid, sportlased, masinate operaatorid ja paljude teiste erialade esindajad.

Tervise taastamisel räägitakse tarkadest proteesidest, mis suudavad õppida ja kohanduda vastavalt haige iseärasustele. Miks mitte luua ka robot-treenerid, mis tuntud sportlaste etalonliigutuste järgi treenivad lihaseid ja reflekse kriitilistes või maksimaalset täpsust nõudvates olukordades, õpetavad näiteks maailmakuulsu USA golfimängija Tiger Woodsi õiget lööki. ●

AUTORIST

JÜRI VAIN (1956) on õppinud Kärkla keskkoolis ja Tallinna Polütehnilises Instituudis, mille lõpetas 1979. Tehnikakandidaat aastast 1987. 1992. aastast küberneetika instituudi juhtimissüsteemide osakonna juhataja. TTÜ üldinformaatika professor aastast 1998. TTÜ arvutiteaduse instituudi direktor aastast 2002. Teinud teadustööd Tampere, Eindhoveni ja Taani tehnikauülikoolis ning Oslo ülikoolis. Alates 2004 Euroopa robotikavõrgustiku EURON juhtkomitee liige ning 2006. aastast Euroopa Liidu 6. raamprogrammi projekti ROBOSWARM teaduskoordinaator.