

Sami Vuoristo

# Kirurginen robotiikka

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Insinöörityö  
31.5.2012

Tekijä Otsikko	Sami Vuoristo Kirurginen robotiikka
Sivumäärä Aika	35 sivua 31.5.2012
Tutkinto	insinööri AMK
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	terveydenhuollon tekniikka
Ohjaaja	lehtori Jukka Kuikanvirta
<p>Tässä insinööriyössä on selvitetty ja tutkittu kirurgiseen robotiikkaan liittyviä käsitteitä, robottien rakenteita, toimintaperiaatteita ja käyttösovelluksia. Työssä on myös tutkittu eri robottijärjestelmiä, joita maailmalla on käytössä. Lisäksi on pohdittu uusia käyttökohteita. Työ on ns. <i>review</i> eli katsaus jo olemassa olevaan, julkaistuu materiaaliin. Tällaista tarkastelutapaa kutsutaan meta-analyysiksi ja metatutkimukseksi.</p> <p>Työn alkuosassa on keskitytty yleiseen robotiikkaan, robottien luokkiin, toimintaan, rakenteisiin ja käyttötarkoituksiin, jotta saataisiin jonkinlainen yleiskäsitys roboteista ja robotiikasta. Myös robotiikan ja robottien historiaan on paneuduttu ja käyty läpi teollisuusrobotin rakennetta yksityiskohtaisemmin.</p> <p>Työssä on keskitytty eri kirurgisiin robottijärjestelmiin ja sovelluksiin. Lisäksi on tutkittu, mitä kaikkea on leikattu ja voidaan leikata. Työssä on pohdittu robottien autonomiaa, eli onko robotti manipulaattori, puoliautonominen vai täysin autonominen. Kirurgisten robottien hyötyjä, ongelmia ja haittoja on myös käsitelty. Samalla on sivuttu kirurgian ja kirurgisen robotiikan historiaa.</p> <p>Lopuksi on käsitelty kirurgista simulaatiota ja haptiikkaa. Kirurgista simulaatiota on käsitelty lähinnä kirurgien koulutuksen näkökulmasta. Simulaatiolla voidaan helposti ja potilaita vaarantamatta kouluttaa uusia kirurgeja niin tavanomaiseen kirurgiaan kuin kirurgiseen robotiikkaankin. Uusia sovelluksia voidaan helposti suunnitella simulaation avulla. Haptiikka on melko uutta kirurgisessa robotiikassa. Se on tieteen ala, joka tutkii tuntopalautteen ja voimapalautteen antamista. Tätä käytetään kirurgisessa robotiikassa luomaan todellisuuden tunnetta kirurgille, joka suorittaa leikkausta.</p>	
Avainsanat	kirurginen robotiikka, kirurginen simulaatio, haptiikka

Author Title	Sami Vuoristo Surgical Robotics
Number of Pages Date	35 pages 31 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Medical Engineering
Instructor	Lecturer Jukka Kuikanvirta
<p>The main objective of this thesis was to find out about and study surgical robotics: concepts and structures, principles of operations and applications. Another goal was to study robotic systems that are used around the world and think new applications. This thesis is a review to already existing and published material. This kind of research is called meta analysis or meta study.</p> <p>The start of study focuses on robotics in general: how robots are classified, how they functions, their structures and applications. This aims to give some kind of an idea what robotics and robots are. Also the history of robots and robotics is clarified and industrial robot structures are explained in more detail.</p> <p>The chapter surgical robotics focuses on different surgical robotic systems and applications: operations that have been made and could be made. Robot autonomy is also considered: is the robot a manipulator, is it half autonomous or is it fully autonomous. Advantages, problems and disadvantages of these devices are also considered and surgical and surgical robotics history is clarified some extent.</p> <p>The rest of the study consist of surgical simulation and haptics. The surgical simulation focuses on the education of surgeons. With simulation it is easy to educate new surgeons in convention surgery as well in robotic surgery without risking the patients. Also new operations can easily be designed with simulation. Haptics is quite new in surgical robotics. It is a field of science that studies tactile feedback and force feedback. This is used in surgical robotics to create a more realistic feeling while operating.</p>	
Keywords	surgical robotics, surgical simulation, haptics

# Sisällys

## Tiivistelmä

## Abstract

## Sisällys

<b>1 Johdanto</b>	1
<b>2 Yleistä robotiikkaa</b>	2
2.1 Yleistä roboteista	2
2.2 Robotiikan historiaa	4
2.3 Teollisuus robotin rakenne ja toiminta	4
<b>3 Kirurginen robotiikka</b>	8
3.1 Kirurgisen robotiikan etuja ja haittoja	9
3.2 Kirurgian historiaa	10
3.3 Kirurgisen robotiikan historiaa	11
3.4 Kirurgisen robotiikan käyttökohteita	12
3.4.1 Yleiskirurgia	12
3.4.2 Sydänkirurgia	12
3.4.3 Sydänsairaudet ja elektrofysiologia	12
3.4.4 Vatsan alueen kirurgia	13
3.4.5 Gynekologia	13
3.4.6 Neurokirurgia	13
3.4.7 Ortopedia	13
3.4.8 Pediatria	13
3.4.9 Radiologia	14
3.4.10 Urologia	14

3.5	Kirurgisia robottijärjestelmiä	15
3.5.1	Kirurginen Puma 560 -robottijärjestelmä	15
3.5.2	Kirurginen PROBOT-robottijärjestelmä	15
3.5.3	Kirurginen ROBODOC-robottijärjestelmä	15
3.5.4	Kirurginen Da Vinci -robottijärjestelmä	16
3.5.5	Kirurginen ZEUS-robottijärjestelmä	19
3.5.6	Kirurginen DLR MIRO -robottijärjestelmä	20
3.5.7	Kirurginen NeuroMate-robottijärjestelmä	22
3.5.8	Kirurginen NeuroArm-robottijärjestelmä	23
3.5.9	Kirurginen Amadeus-robottijärjestelmä	24
<b>4</b>	<b>Kirurginen simulaatio</b>	<b>25</b>
4.1	Yleistä kirurgisesta simulaatiosta	25
4.2	Simulaattorit ja oppiminen	25
4.3	RoSS-kirurginen simulaattori	27
4.4	Kirurginen Da Vinci -simulaattori	28
<b>5</b>	<b>Haptiikka</b>	<b>29</b>
5.1	Yleistä haptiikasta	29
5.2	Tuntopalautteen havaitseminen	30
5.3	Tuntopalautteen tuottaminen	30
5.4	Tuntopalaute käyttöliittymissä	31
5.5	Tuntopalautteen suunnittelu	32
5.6	Haptiikka kirurgisessa robotiikassa	32
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>33</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>35</b>

## 1 Johdanto

Robotiikka on kehitetty auttamaan ihmistä mitä erilaisimmissa sovelluksissa ja tehtävissä. Tässä insinööriyössä keskitytään lääketieteellisiin robotteihin, tarkemmin kirurgiseen robotiikkaan. Työ on ns. *review* eli katsaus jo olemassa olevaan, julkaistuun materiaaliin. Tällaista tarkastelutapaa kutsutaan meta-analyysiksi ja metatutkimukseksi. Tavoitteena on luoda käsitys nykyisin käytössä olevista kirurgisen robotiikan keskeisistä järjestelmistä ja käyttösovelluksista, erityyppisten leikkausrobottien toimintaperiaatteista ja lisäksi pohtia uusia käyttökohteita.

Tietokoneiden huiman kehityksen ja robottiteknologian kasvun myötä ihmisen kehoa voidaan nyt korjata yhä tarkemmin ja kivuttomammin. Kirurgit pääsevät entistä tarkemmin ja vaativimpiin kohteisiin, joihin ennen tarvittiin suuria leikkauksia ja isoja leikkausviiltoja. Aluksi käydään läpi yleistä robotiikkaa, robottien luokitusta, toimintaperiaatteita, yleisempiä rakenteita ja robottien historiaa. Seuraavaksi käsitellään kirurgian ja kirurgisten robottien historiaa.

Lopuksi keskitytään kirurgiseen simulaatioon, joka tarkoittaa kirurgien koulutusta tietokonepohjaisilla simulaattoreilla ja haptiikkaan, joka on uusi ala kirurgisessa robotiikassa. Haptiikkaa käytetään jo joissain kirurgisen robotiikan järjestelmissä.

## 2 Yleistä robotiikkaa

### 2.1 Yleistä roboteista

Roboteista muodostunut mielikuva on usein peräisin tieteiselokuvista. Robotiikkaan liittyvien tekniikoiden kehittyminen on ollut nopeaa, ja robotit ovat tulleet ihmisille paljon arkipäiväisimmiksi mm. palvelurobotiikan ansiosta. Valtaosa roboteista on toki vielä teollisuuden tarpeisiin tehtyjä. Teollisuuteen sijoitetut robotit ovat tärkeä osa sen toimintaa, ja ilman niitä monen yrityksen kilpailukyky ei olisi riittävä kovassa kansainvälisessä kilpailussa. Tärkein lenkki robottien käytössä on kuitenkin ihminen. Ihminen suunnittelee järjestelmät, kokoaa ne, ohjelmoi laitteet ja pitää ne kunnossa. Robotiikkaan liittyy paljon asioita, jotka tulevat esille eri tekniikan alojen kursseilla. Robotiikassa yhdistyy useiden eri alojen tietämys ja osaaminen. [1.]



Kuva 1. Hondan ASIMO-androidi robotti [2]

Robotti (tšekiksi *robota* 'pakkotyö') tarkoittaa usein mekaanista laitetta tai konetta, joka osaa jollain tavoin toimia fyysisessä maailmassa. Alkujaan *robotti*-sanalla tarkoitettiin etymologian mukaisesti mekaanista työläistä tai orjaa, ja tämä vaikuttaa sanan *robotti* merkitykseen yhä niin, että mikä tahansa automaatti ei ole robotti, vaan robotilla on oltava joitakin ihmisen kaltaisia piirteitä. Esimerkiksi teollisuusrobottina käytetty nivelrobotti matkii ihmisen käsivarren rakenteita.

Tiukasti käsitettynä kauko-ohjattuja laitteita ei pitäisi kutsua roboteiksi, vaan parempi nimitys on ns. manipulaattori. Koska robotti-sana on osoittautunut suosituksi, sanan merkitys on laajentunut niin, että robotiksi kutsuttu laite voi suorittaa monimutkaisia tehtäviä joko suoraan ihmisen käskyttämänä, osittain ihmisen käskyttämänä, ihmisen valvonnan alla tai täysin autonomisesti (tietokoneen käskyttämänä).

Varsinaisten teollisuusrobottien lisäksi on olemassa erilaisia erikoisrobotteja. Tietokoneiden ohjaamia ajoneuvoja ja työkoneita kutsutaan liikkuviksi roboteiksi (mobiilirobotit). Vihivaunut (Automatically guided vehicle, AGV) ovat olleet käytössä teollisuudessa ja varastoissa jo 1970-luvulta lähtien. Liikkuvien robottien sovellusalueita ovat: kuljetukset, rakentaminen, palontorjunta- ja pelastustehtävät, kaivokset, maa- ja metsätalous, vartiointi, siivous, satelliittien kokoonpano- ja huoltotehtävät ja sodan käynti. Nykyään näiden navigoinnin apuna käytetään myös GPS-järjestelmää (Global Positioning System).

Perinteisesti robotiikka on sovellettu tuotantolinjoilla, mutta yhä enemmän robotiikka on myös valtaamassa palvelutehtäviä, jolloin puhutaan palvelurobotiikasta. Esimerkkeinä tällaisista ovat robottipölynimurit, lentokoneiden pesurobotit, vanhusten hoitoon tarkoitetut robotit, lypsykonerobotit jne. Omana erittäin vaativana robotiikan alana ovat ns. ihmisrobotiikka eli *humanoid robotics* (kuva 1).

Teollisuusrobottien yleisimmät rakenteet ovat

- suorakulmainen robotti
- sylinterirobotti
- napakoordinaatisto robotti
- *scara*-robotti
- kiertyvänivelinen robotti
- rinnakkaisrakenteinen robotti.

Robotit voidaan jaotella myös tehtävän mukaan seuraavasti:

- maalausrobotit (nopeita, tarkkuus ei ole tärkeää)
- prosessirobotit (nopeita, tarkkoja, mutta jäykkiä)
- kokoonpanorobotit (nopeita, suuri tarkkuus, alhainen kappaleenkäsittelykyky).

[1.]

## 2.2 Robottiikan historiaa

Ensimmäisen toimivan robotin rakensi Jacques de Vaucanson vuonna 1738. Hänen robottinsa pystyi soittamaan huilua. Hän rakensi myös mekaanisen ankan, joka kuvasten mukaan söi jyviä ja ulosti.

Jos kauko-ohjattavia laitteita pidetään robotteina, ensimmäisenä nykyaikaisena robottina pidetään Nikola Tellan vuonna 1898 esittelemää kauko-ohjattavaa venettä. Hän toivoi voivansa kehittää siitä ase (nykyinen torpedo) Yhdysvaltain laivastolle.

Varsinaisten tietokoneohjattujen robottien, nykyisten teollisuusrobottien, historia alkoi George Devonin ja Joseph F. Engelbergerin perustaessa yrityksen nimeltä Unimation 1956. Unimation toi ensimmäisenä markkinoille hydraulisen, teollisesti käyttökelpoisen tietokoneohjatun robotin 1970-luvun alussa. Strömberg (nykyään ABB) hankki tällaisen Helsingin Pitäjänmäen tehtaaseen 1974. Asea Ab (nykyään ABB) kehitti 1970-luvun lopulla ensimmäisen sähköservoilla toteutetun robotin IRB6. [1.]

Nokia OYj valmisti robotteja 1980-luvulla Unimationin lisenssillä ja kehitti myös muutamian oman robotin, kuten Nokia Ns-16. Suomen Robottiikkayhdistys ry on museoinut täysin kotimaisen Nokia-robotin Helsinkiin. Suomen suurin robottien valmistaja on Ulvilassa toimiva Cimcorp Oy, jonka portaalirobotitratkaisut kehitettiin 1970-luvun lopulla Valcon kuvaputkitehtaaseen. [2.]

## 2.3 Teollisuusrobotin rakenne ja toiminta

Teollisuusrobotti rakentuu kuudesta yhteen nivoutuneesta alijärjestelmästä:

### 1. Nivelistö

Toiminnallisesti robotin nivelistö jäljittelee ihmisen käsivartta olkapäästä ranteeseen. Nivelistö muodostuu joukosta varsia (ns. luut), jotka peräkkäin liittyvät toisiinsa nivelten välityksellä. Nivelistö antaa robotin käsivarrelle tarvittavan liikkuvuuden ja varret tarvittavan jäykkyyden. Nivelistössä käytetään ns. liukuniveliä, jotka sallivat kahden peräkkäisen varren suoraviivaisen liikkeen toistensa suhteen, sekä käytetään kiertoniveliä, jotka sallivat peräkkäisten varsien kierto liikkeen toistensa suhteen.

Robottinivelet sallivat yleensä liikkeen vain yhden akselin suuntaan (liukunivel) tai ympäri (kiertonivel), ja niitä sanotaan myös robotin vapausasteiksi. Luonto käyttää vain kiertoniveleitä, mutta ne saattavat olla kahden, jopa kolmen vapausasteen palloniveleitä. Ihminen pystyy esim. liikuttamaan olkavarttaan olkanivelestä kolmella eri tavalla. Robotin *kätevyys* kasvaa nivelten luvun ja niiden liikevarojen mukana. Koska avaruus on kolmiulotteinen, tarvitaan vähintään kolme vapausastetta, jotta robotin ranne voitaisiin paikoittaa eli asemoida haluttuun pisteeseen kolmiulotteisessa työtilassa. Jos vaaditaan, että robotin on pystyttävä kääntämään pitelemänsä kappale tai työkalu mihin tahansa asentoon, robotin ranteessa tarvitaan vähintään kolme vapausastetta lisää.

## 2. Runko

Rungon eli jalustan välityksellä nivelistö ankkuroidaan kiinteästi lattiaan tai koneeseen, jota robotti palvelee. Joissakin roboteissa jalustaa voidaan säätää tai siirtää riippuen käyttökohteesta. Rungon voi myös vaihtaa tai huoltaa.

## 3. Tarttuja

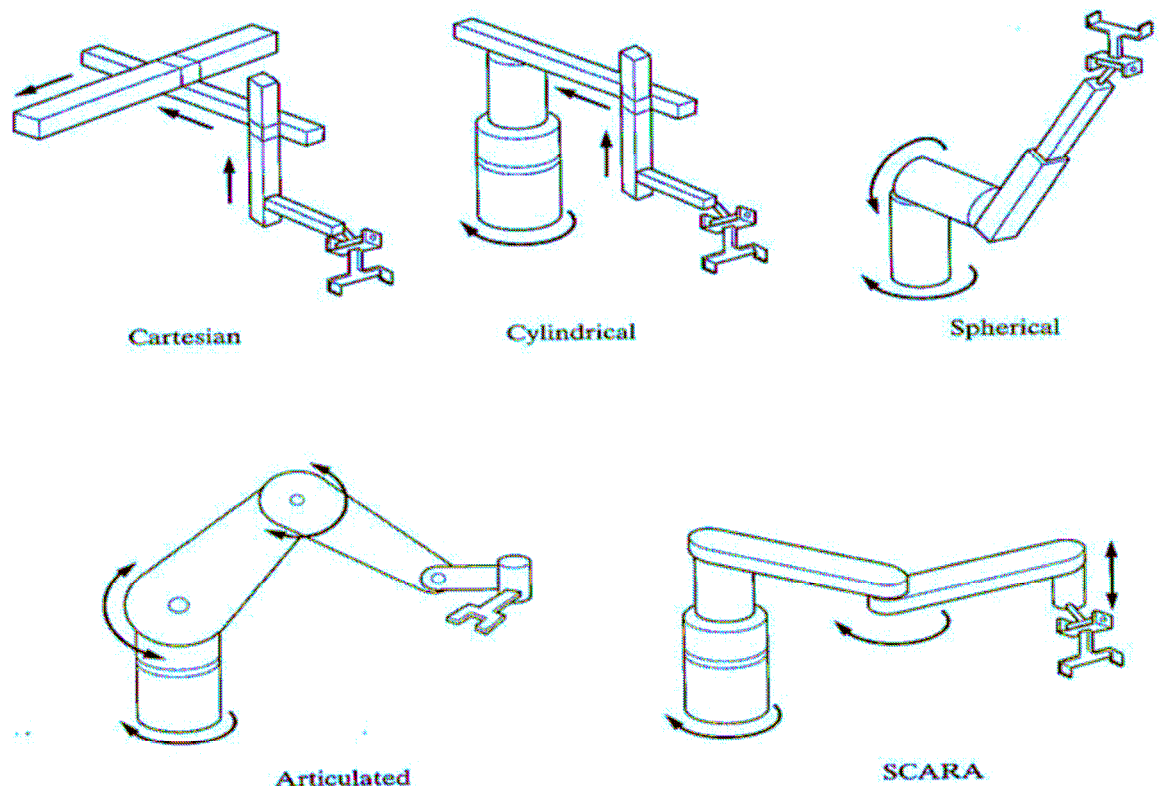
Tarttuja tai työväline on kiinnitetty nivelistön liikkuvaan päähän. Usein tarttuja suunnitellaan ja rakennetaan yksilöllisesti kappaleiden mukaan, koska monipuolinen ja monisorminen yleistarttuja muodostuisi liian kalliiksi ja painavaksi. Joskus tehtävän sitä vaatiessa robotin vieressä on useita tarttuja tai työvälineitä erityisessä pitimessä, ja robotti käy poimimassa kuhunkin työvaiheeseen sopivan tarttujan. Yleisimmät tarttumistavat ovat imukuppitartunta, magneettitartunta, kantotartunta, kitkatartunta (puristustartunta, pihtitartunta).

## 4. Toimilaitteet

Toimilaitteisto vastaa ihmisen lihaksistoa. Kunkin nivelen yhteyteen sijoitetun toimilaitteen tehtävä on suorittaa nivelen paikoittaminen kulloinkin haluttuun asentoon. Toimilaitteina käytetään sähkömoottoreita, nestesylintereitä eli hydraulisia sylintereitä ja paineilmasylintereitä eli pneumaattisia sylintereitä sekä hydraulisia ja pneumaattisia vääntömoottoreita.

Kuvassa 2 esitetään kaikki yleisimmät koordinaatiojärjestelmät:

- suorakulmainen (*Cartesian*); sisältää kolme lineaarista nivelakselia
- sylinterimäinen (*Cylindrical*); sisältää yhden kiertyvän ja kaksi lineaarista nivelakselia
- pallomainen (*Spherical*); sisältää kaksi kiertyvää ja yhden lineaarisen nivelakselin
- nivelmäinen (*Articulated*); sisältää kolme ihmiskäden kaltaista kiertyvää nivelakselia
- *Scara* (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*); sisältää kaksi rinnakkaista vaakatason suuntaisen liikkeen mahdollistavaa kiertyvää nivelakselia sekä yhden pystysuoran suuntaisen liikkeen mahdollistavan lineaarisen nivelniveleksin. [1.]



Kuva 2. Robottien yleisimmin käytetyt koordinaatiojärjestelmät [1]

## 5. Ohjain

Ohjain on robotin aivot. Yleensä se on teollisuustietokone, jossa ohjelmoitavaa logiikkaa tai tavallinen PC, jossa on sopivat ohjelmistot.

Ohjaimen neljä päätehtävää ovat:

1. tallentaa robotintyönkierto-ohjelma
2. suorittaa robotin nivelistön liikeohjaus
3. tahdistaa robotin toiminta ympäristö koneisiin
4. ylläpitää ihmisen ja robotin välinen ohjaus- ja valvontayhteys.

## 6. Anturit

Anturi- ja sensorijärjestelmä vastaa ihmisen aistinelimistöä. Sen tehtävä on välittää ohjaimelle palaute robotin asennosta, työkohteen ja ympäristön tilasta jne.

### Nivelistön ohjaus

Yksinkertaisissa roboteissa nivelten liikeohjaus voi tapahtua ns. *bangbang*-ohjauksena, jolloin asemat määritetään mekaanisten rajoittimien avulla. Tämä on riittävää silloin, kun nivel halutaan pysäyttää tarkasti vain muutamaun asentoon. Vaativimmissa tapauksissa joudutaan soveltamaan servo-ohjausta. Tällöin niveleen sisältyy asema-anturi, joka mittaa nivelen todellisen aseman. Tätä verrataan ohjaimessa ohjesuureeseen eli haluttuun asemaan, erotus eli virhe vahvistetaan ja johdetaan edelleen toimintalaitteelle siten, että tämä pyrkii pienentämään virhettä.

Servo-ohjatuissa roboteissa voidaan edelleen erottaa kaksi liikeohjausperiaatetta. Pistehjauksessa (PTP-ohjaus; *point-to-point control*) ohjaimen muistiin tallennetaan ainoastaan suoraviivaisten alkeisliikkeiden pääteasemat (koordinaatit). Liikesarja, jossa esim. robotin tarttuja joutuu väistämään esteitä, ohjelmoidaan useana peräkkäisenä alkeisliikkeenä.

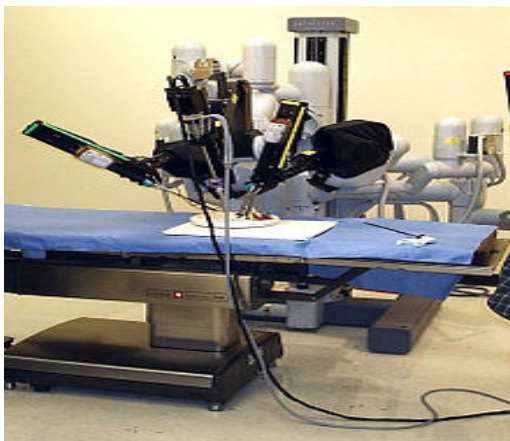
Rata ohjaustavassa (CP-ohjaus; *continuous-path control*) työkierron opetusvaiheessa ohjaimen muistiin tallennetaan jatkuvasti riittävän tiheään asema antureiden välittämät asema tiedot, jolloin toistoajossa robotti seuraa yksityiskohtaisen uskollisesti opetettua

avaruuskäyrää. Tätä periaatetta käytetään mm. ruiskumaalausrobottien ohjauksessa. Opetusvaiheessa robotin nivelistö *kytketään vapaalle*. Ammattimaalari ohjaa sitten robottiin liitettyä maalauspistoolia läpi tarvittavien liikkeiden. Opetusvaiheen jälkeen robotti pystyy toistamaan liikeradan täsmälleen samanlaisena rajattoman monta kertaa. [3, s. 5772 - 5773.]

### 3 Kirurginen robotiikka

Terveystieteiden alalla on käytössä monia robotteja hoitamassa ihmisen tehtäviä, jotka ovat joko sellaisia, joihin ennen tarvittiin paljon henkilökuntaa tai tehtäviä, jotka on helpompi hoitaa robotin avulla, kuten esimerkiksi on siivoojarobotteja ja robotteja, jotka toimittavat näytteitä laboratorioon. Lisäksi robotteja voidaan käyttää apuna esitietojen hankinnassa, kuten esimerkiksi mittaamalla verenpaine. Robotit voivat valvoa sairaalan eri toimintoja, kuten ilmastointia, joka on tärkeä mm. leikkaussaleissa.

Teknillisesti kehittyneimpiä lääketieteellisiä robotteja ovat kirurgiset robotit (kuva 3), ja ne ovat usein ns. manipulaattoreita. Manipulaattori on käsittelylaite, joka on kauko-ohjattu tai yksinkertaisella ohjauksella varustettu automaattinen siirtolaite. Kirurgisessa robotiikassa tämä tarkoittaa lähinnä sitä, että kirurgi istuu konsolin tai työpöydän ääressä, joka voi olla samassa leikkaussalissa tai aivan eri paikassa (esim. eri maassa). Kirurginen robotiikka on robottien käyttämistä kirurgisessa toimenpiteessä. Robotit toimivat servoilla, ja niissä on erilaisia ominaisuuksia mm. imu-, poltto-, ompelu- ja huuhtelutoimintoja. [1.]



Kuva 3. Kirurginen robotti [2]

### 3.1 Kirurgisen robotiikan etuja ja haittoja

Suurimpia etuja kirurgisessa robotiikassa on tarkkuus, leikkausviillot ovat pienempiä, jolloin tulee vähemmän komplikaatioita ja infektioita sekä useissa järjestelmissä voidaan suodattaa kirurgin käsien värinä kokonaan pois. Isoissa ja vaativissa leikkauksissa on kaksi tai kolme kirurgia, nukutuslääkäri ja useita hoitajia. Niin kuin kaikkialla automaatiossa robotit lopulta poistavat tarpeen jostakin ihmistyövoimasta.

Tulevaisuudessa leikkaus vaatii vain yhden kirurgin, nukutuslääkärin ja yhden tai kaksi hoitajaa. Melkein tyhjässä leikkaussalissa kirurgi istuu työaseman ääressä joko leikkaussalissa tai sen ulkopuolella (tai melkein missä tahansa paikassa) ja käyttää kirurgista robottia, joka tekee leikkauksen, johon ennen tarvittiin useita ihmisiä.

Tähystysleikkauksella tarkoitetaan yhdellä tai useammalla tähystimellä tehtävää toimenpidettä pienistä leikkausviilloista. Tällöin aiheutetaan vähemmän kudostraumaa kuin perinteisellä kirurgialla. Vasta nyt on voitu käyttää tätä tekniikkaa hyväksi monimutkaisemmissa leikkauksissa. Taitavilla kirurgeilla ja robotin avulla voidaan nyt tehdä vaativia tähystysleikkaukseen perustuvia leikkauksia kuten sydänleikkauksia, mahaleikkauksia, gynekologiaa, urologiaa ja aivoleikkauksia. Verrattuna normaaliin tähystysleikkaukseen kirurgilla on parempi kontrolli kirurgisiin instrumentteihin ja parempi näkyvyys kohteeseen. Lisäksi kirurgin ei tarvitse seistä koko toimenpiteen.

Koska periaatteessahan kirurgi on erossa potilaasta, tämä mahdollistaa ns. telekirurgian, jolloin potilas voi olla jossakin syrjäseudulla ja leikkaava kirurgi suuressa keskussairaalassa. Potilas säästyy turhalta matkustamiselta, mikä voi rasittaa potilasta. Etuna on myös potilaan nopea toipuminen leikkauksesta, mikä vähentää sairaalassa oloaika ja nopeuttaa työhön paluuta huomattavasti.

Haittoina on, että nämä laitteet ovat alansa huippua, joten kustannukset ovat korkeita. Kirurgien ja huoltohenkilökunnan koulutus on vaativaa ja kallista. Samalla kun kehitetään uusia sovelluksia, myös kirurgisen robotiikan täytyy kehittyä. Tämä voi olla haitaksi siinä mielessä, että leikkaussalin yhteensopivien laitteiden päivittäminen voi olla hankalaa. Lisäksi laitteiden kehittyessä ne myös monimutkaistuvat. Tämäkin nostaa kustannuksia.

Aika, joka kuluu esimerkiksi sydänleikkaukseen, voi olla 2 - 4 kertaa pidempi kuin pienemmissä perusleikkauksissa. Tämä tietysti riippuu toimenpiteestä ja kirurgin kokeemuksesta. Mitä kauemmin potilas joutuu olemaan nukutuksessa, sitä huonompi on tilanne. Lisäksi pitkä leikkaus maksaa enemmän.

Lisäksi laitteet ovat painavia ja vaikeasti liikuteltavia esim. leikkaussalista toiseen. Laitteet vievät paljon tilaa esimerkiksi sydänleikkauksessa, jossa tarvitaan myös paljon potilasvalvontalaitteistoa. Tämä voi häiritä kirurgien toimintaa. Tähän voisi olla ratkaisuna se, että pienennetään robottien kokoa ja suurennetaan leikkaussalin kokoa. Tämä tietenkin lisää kustannuksia.

Leikkaussalin välineet ja laitteet eivät välttämättä aina sovi robottilaitteiston kanssa yhteen. Tästä seuraa, että kesken leikkauksen saatetaan tarvita avustavaa lääkäriä leikkauspöydän äärellä, mikä taas aiheuttaa ruuhkaa leikkaussalissa.

### 3.2 Kirurgian historiaa

Kirurgia kehittyi sotaväen palveluksessa olleiden välskäreiden käsityötaitona. Erityisiä kirurgiammattikuntia syntyi jo 1200 - 1300-luvuilla, mutta esimerkiksi Isossa-Britanniassa kirurgit olivat vielä 1700-luvulla osa parturien ammattikuntaa. Käsityöläisenä pidettyä kirurgia arvostettiin vähemmän kuin pappiin verrattavana parantajana toimivaa yleislääkäriä, vaikka onnistuessaan kirurgi kykenikin hoitamaan potilaansa: rakkokiviä leikattiin jo Hippokrateen aikana, ja 1100-luvulla osattiin hoitaa kaihia pistämällä.

Lääkäreiden akateeminen koulutus alkoi vähitellen keskiajalla. Ensin Italian ja Ranskan yliopistoissa. Latinaa ja yleissivistystä hankkivien lääkärien ja usein killoissa ja oppisopimuksilla harjoittelevien, joskus lukutaidottomienkin kirurgien välillä oli suuri ero. Vasta 1700-luvulla pidettiin tarpeellisena, että lääkärienkin oli perehdyttävä kirurgian alkeisiin.

Ennen nykyisiä hoitokeinoja oli hyvin suuri vaara, että potilas vuosi kuiviin ennen hoitoa tai leikkauksen aikana. Haavan kiinnipolttaminen oli toimiva mutta rajoitettu toimenpide, se oli haitallinen pitkällä aikavälillä, kun haava tulehtui ja oli erittäin kivulias.

Tulehdus on tullut käsitteenä tutuksi vasta aika hiljattain. Tulehdukset olivat suuri syy siihen, että leikkauksen jälkeinen parantuminen ei ollut toivotun tapainen. Tulehduksilta opittiin välttymään, kun lääkärit huomasivat, että on viisasta steriloida työvälineet ja pestä kädet, myöhemmin on ruvettu käyttämään kumihansikkaita.

Nykyisen käytössä olevan puudutuksen keksivät kaksi amerikkalaista hammaslääkärinä, jotka olivat Horace Wells ja William Morton. Aikaisemmin leikkaus oli äärimmäisen kivulias kokemus, ja leikkaajia kehoitettiin hoitamaan leikkaukset mahdollisimman nopeasti, ettei potilas kärsisi niin paljon. 1800-luvulla leikkaukset muuttuivat merkittävästi, kun nukutus ja lihasrelaksantit saatiin käyttöön. [2.]

### 3.3 Kirurgisen robotiikan historiaa

Vuonna 1985 robotti PUMA 560:tä käytettiin laittamaan neula aivoihin koepalaa varten käyttämällä CT(*computerized tomography*) kuvausta. Vuonna 1988 PROBOT suoritti eturauhasleikkauksen. Vuonna 1992 esiteltiin ROBODOC, joka suoritti reisiluun tarkan istutuksen lonkkaan. Lisää kehitystä robottilaitteisiin toi Intuitive Surgical, joka kehitti Da Vinci Surgical -systeemin ja Computer motion AESOP:llä sekä ZEUS *robotic surgical systems*. (Intuitive Surgical osti Computer Motionin 2003, eikä ZEUS ole enää markkinoilla). Kun robotit kehittyivät lääketieteessä NASA:n tutkijat alkoivat työskennellä niin kutsutun *telepresence* eli etäkirurgian parissa. Siinä yhdistetään virtuaalitodellisuus, robotit ja lääketiede. 1990-luvun alussa tutkijat NASA.Ames-tiimistä ja Stanford Research -Instituutista (SRA) käyttivät telemanipulaattoria käsikirurgiaan.

Yhdysvaltojen armeija kiinnostui myös, koska robottien avulla se voisi vähentää kuolleisuutta sota-aikana. Järjestelmän nimi oli MASH(*Mobile Advanced Surgical Hospital*), joka tarkoittaa sitä, että sotilas voitaisiin nostaa kulkuneuvoon, jossa on kirurginen robottilaitteisto, ja häntä voisi hoitaa kirurgi toisesta paikasta. [2.]

Suomessa ensimmäinen robottileikkaus tehtiin Hyksissä Meilahden sairaalassa helmikuussa 2009. Leikkauksessa käytettiin Da Vinci -robottijärjestelmää, joka maksoi n. 1.6 miljoonaa euroa. Toinen Suomessa käytössä oleva robotti on Tampereella.

### 3.4 Kirurgisen robotiikan käyttökohteita

#### 3.4.1 Yleiskirurgia

2000-luvun alussa Ohion Yliopistossa suoritettiin robotilla yleiskirurgisia toimenpiteitä mm. ruokatorvi- ja haimaleikkauksia ensimmäistä kertaa maailmassa. Vuonna 2007 Illinoisin yliopistossa Ghicagossa lääketieteellinen tiimi, jota johti Professori Pier Cristoforo Giulianotti suoritti haimanpoistoleikkauksen kirurgisella robotilla. Sama tiimi vuonna 2008 kirurgeja suoritti maailman ensimmäisen maksan poistoleikkauksen, jossa käytettiin kirurgista robottia. Tällöin 60 % potilaan maksasta poistettiin. Potilas pääsi sairaalasta muutaman päivän kuluttua hyvässä kunnossa. Lisäksi potilas pääsee vähemmällä kivulla ja neljällä pistojäljellä ilman kirurgin jättämää arpea. [2.]

#### 3.4.2 Sydänkirurgia

Da Vinci -järjestelmää käytetään sepelvaltimoiden ohitusleikkauksessa ja mitraaliläppien korjauksissa ja vaihdoissa.

Nykyään on käytössä kolmentyyppisiä sydänleikkauksia, joita suoritetaan rutiininomaisesti:

1. eteisväliseinän korjaus
2. mitraaliläppän korjaus; mitraaliläppä on läppä, joka estää veren paluun ylempiin kammioihin supistuksen aikana
3. sepelvaltimoiden ohitusleikkaus; ohitetaan ne valtimot, jotka tuovat verta sydämeen (valtimot, jotka ovat jostakin syystä tukkeutuneet). [2.]

#### 3.4.3 Sydänsairaudet ja elektrofysiologia

Magneettinen navigointijärjestelmä on kehitetty (MNS; *Magnetic Navigation System*) kasvattamaan tarkkuutta ja turvallisuutta rytmihäiriöiden ja eteisvärinän hoidossa sekä vähentämään potilaan ja lääkärin saamaa säteilymäärää. Järjestelmä mahdollistaa automaattisen 3D-kartoituksen sydäimestä ja verisuonistosta. [2.]

#### 3.4.4 Vatsan alueen kirurgia

Monentyyppisiä toimenpiteitä on tehty Zeuksella tai Da Vinci -robottijärjestelmillä mm. painonhallintaan liittyvää kirurgiaa. Monen yliopiston kirurgit ovat kehittäneet erilaisia tekniikoita vatsan alueen kirurgiaan, joita voidaan käyttää robotin avulla. [2.]

#### 3.4.5 Gynekologia

Kirurginen robotiikka on yksi nopeimmin kasvava alue gynekologian alueella. Tähän kuuluu myös kirurginen Da Vinci -järjestelmä, jolla hoidetaan mm. gynekologisia syöpäsairauksia kuten kohtu- ja munasarjasyöpää. [2.]

#### 3.4.6 Neurokirurgia

Nykyään on tarjolla useita järjestelmiä, jotka perustuvat stereotaktiseen inventioon. MD Robotiikan NeuroArm on maailman ensimmäinen MRI (Magnetic resonance imaging) yhteensopiva kirurginen robotti. [2.]

#### 3.4.7 Ortopedia

Ensimmäinen luuta leikkaava robotti on yhtiöllä Acrobot Company Ltd. Toinen esimerkki on CASPER-robotti, jota käytetään lonkkaleikkauksiin ja nilkan korjauksiin. [2.]

#### 3.4.8 Pediatria

Kirurgista robotiikkaa on käytetty monenlaisissa lasten kirurgiaan liittyvissä toimenpiteissä, jotka liittyvät usein synnynnäisiin poikkeavaisuuksiin ja epämuodostumiin. Tammikuussa 2002 kirurgit Michiganin lastensairaalassa suorittivat Yhdysvaltojen ensimmäisen tietokoneavusteisen kirurgisen robottileikkauksen.

Bostonin lastensairaalassa erikoiskoulutetut kirurgit käyttävät huipputeknisiä robotteja monimutkaisiin ja herkkiin operaatioihin aiheuttaen vain pieniä kirurgisia viiltoja. Tästä seuraa vähemmän kipua, nopea toipuminen, nopea kotiutus, pienempiä arpia ja tyytyväisempiä potilaita ja heidän perheitään. Bostonin lastensairaalan lääkärit ovat kehittä-

neet sovelluksia laajentaakseen robottien käyttöä ja kouluttaneet kirurgeja ympäri maailman käyttämään apuna robotteja. [2.]

#### 3.4.9 Radiologia

Radiologinen CyberKnife-robottijärjestelmä käyttää kuvantamista ja tietokoneohjausta kasvainten hoidossa koko kehossa tuottamalla monitahoista, korkeaenergistä säteilyä, jota tuotetaan ympäri kasvainta. Järjestelmä käyttää saksalaista KUKA KR 240 - robottia. Robottiin on asennettu lineaarinen hiukkaskiihdytin, joka tuottaa 6 MV:n röntgensäteilyä. Kun säteilylähde asennetaan robottiin, pystytään erittäin nopeisiin säteilylähteen siirtoihin, joka taas mahdollistaa, että säteilyä saadaan eri paikoista ilman, että potilasta tai säteilylähdettä tarvitsee siirtää. [2.]

#### 3.4.10 Urologia

Kirurginen robotiikka urologian alalla on tullut suosituksi etenkin Yhdysvalloissa. Se on ollut suosittu etenkin eturauhassyövän hoidossa, koska eturauhanen sijaitsee anatomisesti vaikeassa paikassa. Sitä käytetään myös munuaissyövän hoidossa ja virtsarakon leikkauksissa. Uusin pieni invasiivinen robottilaitte sisältää ultraäänipään. [2.]

### 3.5 Kirurgisia robottijärjestelmiä

#### 3.5.1 Kirurginen Puma 560 -robottijärjestelmä

Puma 560 oli ensimmäinen robottivarsi (kuva 4), jota käytettiin neurokirurgiassa koepalan ottamiseen vuonna 1985. Kolme vuotta myöhemmin suoritettiin eturauhasen poisto käyttäen Puma 560 -robottivartta. Siitä ei saatu toivottuja hoitotuloksia huonon ultraäänikuvan vuoksi. [4.]



Kuva 4. Puma 560 -kirurginen robotti [4]

#### 3.5.2 Kirurginen PROBOT-robottijärjestelmä

PROBOT on robotti, jonka Lontoon Imperiaalin Gollege suunnitteli erikoisesti avustamaan eturauhasen kudoksen poistossa. Järjestelmä on kuvaohjattu, simulaatiolla ja *online*-videokuvalla varustettu. Kehitys osoitti, että robottikuvaus ja eturauhasen poisto robotilla on mahdollista. [4.]

#### 3.5.3 Kirurginen ROBODOC-robottijärjestelmä

ROBODOC on robottijärjestelmä (kehittäjä Integrated Surgical Systems (ISS) teki lääketieteen historiaa 1992 ensimmäisenä robottina, joka avusta ihmisen lonkantekonivel-leikkauksessa. Sittemmin sitä on käytetty yli 24 000 kirurgisessa toimenpiteessä kautta

maailman. ROBODOC-kirurginen robotti on suunniteltu tarkkaan reisiluun ja lonkan yhdistämiseen, on FDA (*U.S Food and Drug Administration*) antanut luvan ROBODOC® Surgical System nimiselle tuotteelle suorittaa täydellisiä lonkkaleikkauksia. Järjestelmällä pystytään etukäteen suunnittelemaan leikkaus 3D-virtuaalitallassa, ja sitten suorittaa leikkaus siten kuin se oli suunniteltu.

Järjestelmä sisältää kaksi komponenttia: ORTHODOC®-tietokonetyöasema varustettuna vaadittavalla ohjelmistolla leikkauksien suunnitteluun (3D) ja tietokoneohjatulla ROBODOC®-kirurgisella robotilla, jonka tarkkuutta hyödynnetään lonkka- ja polvileikkauksissa. [4.]

### 3.5.4 Kirurginen Da Vinci -robottijärjestelmä

Da Vinci on kirurginen robottijärjestelmä, jota yleisesti käytetään. Periaatteessa se ei ole robotti vaan ns. manipulaattori, joka tarkoittaa, että kirurgi ohjaa suoraan *kybergisiä* käsivarsia. [4.]



Kuva 5. Da Vinci -leikkaustiimi [4]

Da Vinci -robottijärjestelmään kuuluu periaatteessa kolme eri osaa (kuva 5). Kirurgi istuu ergonomisesti suunnitellussa tuolissa ja pystyy hyvin käsittelemään konsolia tai työasemaa. Hänen kätensä sopivat ohjaimiin, jotka on liitetty tietokoneeseen. Tietoko-

ne ja 3D-näyttöjärjestelmä kuuluvat myös työasemaan. Elektroniikkatorniin kuuluu ilmakompressori ja videoelektroniikkalaitteet. Robotilla on kolme kättä. Keskimmäisessä kädessä on kamera ja kaksi muuta kättä käsittelee kirurgisia instrumentteja. Instrumentit on nivelletty *ranteeseen* (kuva 6). [4.]



Kuva 6. *Endowrist*-robotin ranne [4]

Robotin kädet liikkuvat seitsemän astetta vapaasti ja kaksi astetta akselinsa suuntaan pyörien. Robotti liikkuu leikkauspöydän sivusuuntaisesti. Se on kiinnitetty kolmella jalalla, mutta ei leikkauspöytään. Tietokone valvoo 3D-paikannusta varren päästä eikä kirurgisen instrumentin päästä. Teleskooppi päästää 12 mm vartta (kuva 9), ja kirurgiset instrumentit käyttävät 8 mm vartta (kuva 7). Yhdysvalloissa leikkauvälineet ovat osittain uudelleen käytettäviä: niitä voi käyttää uudelleen kymmenen kertaa (yhdessä leikkauksessa). Robotin tietokone laskee käyttökerrat ja lopettaa toimimisen kymmenen kerran jälkeen. [4.]



Kuva 7. Tähystysinstrumentit [4]

Kuva, joka näkyy konsolista, muistuttaa kiikareiden näkymää, ikään kuin katsottaisiin kiikareiden läpi. Järjestelmän teleskooppi on 12 mm ja sisältää kaksi 5 mm erillistä teleskooppia. Kaksi videokameraa lähettää kuvaa kahteen eri näyttöön. Synkronisaattori pitää kuvat samassa vaiheessa. Peilit heijastavat kuvan kirurgin konsoliin, kuten kiikareissa oikea silmä näkee oikean kuvan ja vasen vasemman kuvan.



Kuva 8. Kirurginen Da Vinci -robotti [4]

Da Vinci -järjestelmä kehitettiin erityisesti tähytyksessä suoritettavaan ohitusleikkaukseen. Suunnittelijat eivät ottaneet huomioon vatsan alueella tapahtuvia leikkauksia. Da Vinci -järjestelmä tarvitsee ison leikkaussalin, ja se painaa melkoisesti (kuva 8). Sitä on vaikea liikutella, puhumattakaan, että sitä siirrettäisiin toiseen leikkaussaliin. Eri leikkauksia varten tehtävä asetuksien säätö vie aikaa ja on rasittavaa. Leikkaussalin ulkopuolella tarvitaan varastuhuone. [4.]



Kuva 9. Instrumenttivarasi [4]

Leikkaussalissa videosaali lähetetään useaan monitoriin, joita voivat seurata avustava kirurgi ja muu hoitohenkilökunta. Monitoriliitännät on helppo tehdä uusissa integroiduissa leikkaussaleissa, mutta se voi olla hankalaa vanhoissa saleissa, kun käytetään liikuteltavaa videotornia. [4.]

### 3.5.5 Kirurginen ZEUS (*Computer Motion Inc.*) -robottijärjestelmä

FDA hyväksyi ZEUS:n markkinoille vuonna 2001. Järjestelmässä on kolme robottikäsiä, jotka on asennettu leikkauspöytään (kuva 10 ks. seur. s.). Yhtä käsivarsista kutsutaan AESOP:ksi (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning Robotic System). AESOP on ääni aktiivinen robotti, jota käytetään endoskoopin ohjaukseen.

FDA hyväksyi AESOP:n endoskoopin ohjaukseen vuonna 1994, ja ääniaktiivointi lisättiin myöhemmin. ZEUS eroaakin da Vinci -järjestelmästä juuri ääniaktiivoinnin takia. Kirurgi voi sanoa: "*AESOP move right*". Tällöin robottikäsi siirtyy oikealle, kunnes annetaan käsky: "*Stop*".



Kuva 10. Kirurginen ZEUS-robotti [4]

Kuten da Vinci -järjestelmässä, kaksi muuta käsivartta ovat jatkoa kirurgin käsille. Kirurgi istuu työpisteessä päässään erikoislasit, jotka luovat kolmeulotteisen kuvan. Computer Motion on lisännyt järjestelmään myös ns. *taipuisan ranteen Micro-Wristin*, joka on myös saanut FDA:n hyväksynnän. ZEUS-yksiköitä on Pohjois-Amerikassa 30, 15 Euroopassa ja Keski-Idässä sekä 5 yksikköä Aasiassa. [4.]

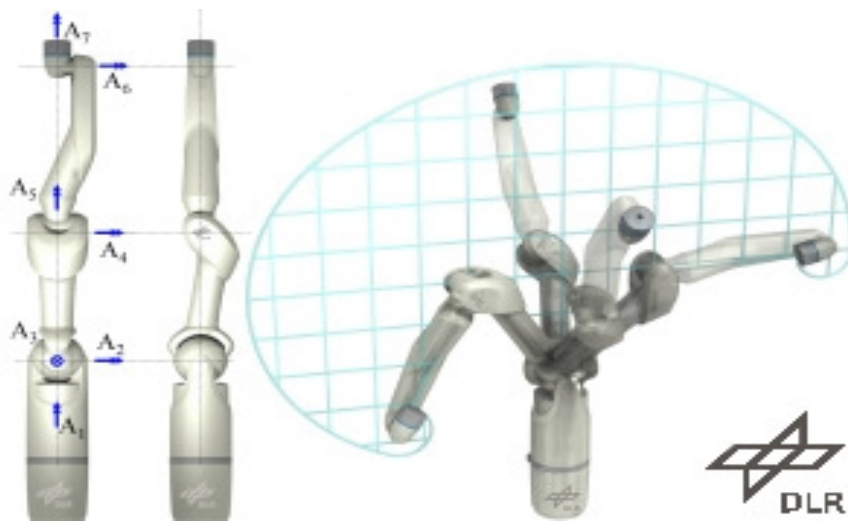
### 3.5.6 Kirurginen DLR MIRO -robottijärjestelmä

DLR MIRO on toisen sukupolven monipuolinen, kirurgisiin sovelluksiin sopiva robottivarsi, jonka on kehittänyt *Institute for Robotics and Mechatronics*. Koska robotti painaa vain 10 kg, ja sen mitat vastaavat ihmisen käsivartta, se mahtuu avustamaan kirurgia suoraan leikkauspöydän äärellä, missä tilaa on vähän (kuva 11). Sovellusten suunniteltu laajuus vaihtelee ohjaavasta laseryksiköstä reikien tekoon luuhun ruuvien kiinnittämisestä varten aina robottiaavusteiseen endoskooppiohjaukseen. [4.]



Kuva 11. DLR MIRO [4]

Seitsemän voimaohjattua niveltä mahdollistaa joustavan leikkaussali kokoonpanon ja sillä voidaan hyvin työskennellä myös muiden robottien ja muun leikkaussalilaitteiston kanssa törmäämättä niihin. Jokaiseen niveleeseen on integroitu asento ja voima-anturit, että robottia voidaan käyttää myös impedanssilassa, joka mahdollistaa herkemät liikkeet (*kirurgin kädet*), erittäin tarkan manipulaation paikan kontrolloidussa moodissa sekä tahattomien törmäysten välttämisen.



Kuva 12. MIRO:n kinematiikka [4]

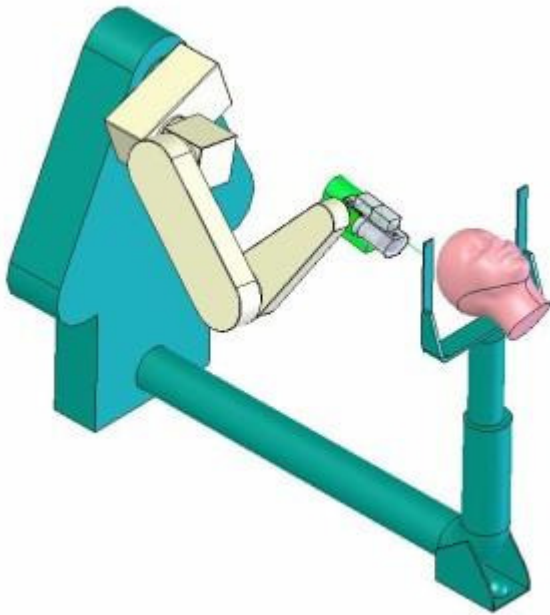
MIRO-robottikäsi on pitkälle integroitu mekatroninen järjestelmä (kuva 12). Moottorien, hammaspyörien ja turvajarrujen ohella robotti sisältää voima- ja asema-anturit, tehoelektroniikkaa ja ohjelmoitavaa logiikkaa liittyen jokaiseen liitokseen. Eri liitosten elektroniikka on yhdistetty väylällä, joka mahdollistaa ulkopuolisten ohjainten liittämisen robottiin. [4.]

Taulukko 1. MIRO:n tekniset tiedot [4]

Parametri	arvo	kommentti
Hyötykuorma	30 N	maksimi, varsi ojennettuna
Paino	9.8 kg	yksi henkilö voi kantaa
Nivelten määrä	7	vertaa ihmisen käsivarsi
Max. Varren pituus	1.1 m	
Ohjaustaajuus	3 kHz	anturiseuranta, signaalin muodostus ja tiedonsiirto
Max. Nopeus	>0.25 m/s	

### 3.5.7 Kirurginen NeuroMate-robottijärjestelmä

NeuroMate oli ensimmäinen robottijärjestelmä, joka suunniteltiin stereotaktiseen aivokirurgiaan. Systeemiä käytetään nykyään avustamaan kirurgeja neurokirurgisissa leikkauksissa. Sen suunnitteli Integrated Surgical Systems Inc, ja se on suunniteltu suorittamaan leikkauksia käyttämällä VoXim:ä, joka on IVS Software Engineering ohjelmisto. Kuvaohjattu, tietokonevalvottu laitteisto, manipuloi 6 nivelistä robottivartta, mahdollistaen 5 asteen liikkuvuuden. NeuroMate sai FDA:n hyväksynnän kesällä 1999.



Kuva 13. NeuroMate-periaatekuva [4]

NeuroMatea voidaan käyttää laittamalla potilaan pää kehukseen tai ilman kehystä (kuva 13). Ero näiden kahden menetelmän välillä on se, että kehuksetön menetelmä on kuvantamisen kannalta vielä hieman epätarkka. Robotti ja ohjelmisto toimivat yhdessä muodostaen 3D-kuvan aivojen anatomiasta käyttämällä CT- tai MRI-skannausta. Kun suunnitelma on muodostettu, kirurgi käyttää robotin käsivartta katsomalla samalla PC:ltä kuvaa ja tämän perusteella suorittaa leikkausta.

Käyttökohteita on monenlaisia aivokirurgiaan liittyen, mm. aivokasvainten poisto, liikehäiriöiden leikkaukset aivojen syvissä osissa ja erilaisten toiminnallisten implanttien istuttaminen aivoihin (epileettisten oireiden lieventämiseen).

Etuina on se, että NeuroMate on suunniteltu käyttämällä PC-pohjaista järjestelmää, joka on helppo liittää muiden yhtiöiden suunnittelu järjestelmiin. [4.]

### 3.5.8 Kirurginen NeuroArm-robottijärjestelmä

NeuroArm, 30 miljoonaa dollaria maksanut projekti, kehitettiin yhteistyönä Galgaryn terveydenhoitopiirin ja Galgaryn yliopiston kanssa. NeuroArm on kirurgiseen robotiikkaan suunniteltu robotti, joka pystyy myös toimimaan magneettikuvauslaitteessa (MRI). Siihen kuuluu kaksi irrotettavaa manipulaattoria, jotka on kiinnitetty liikuteltavaan alustaan (kuva 14), työasema ja järjestelmän ohjauskaappi. Leikkaus tehdään käyttäen hyväksi videokuvaa sekä magneettikuvaa, joka saadaan melkein reaaliajassa.

Robotin kädet ovat varustettu kirurgisilla välineillä, jotka vastaavat standardinmukaisia neurokirurgisia välineitä. Kirurgiset instrumentit ovat erikoisvalmisteisia, MRI-laitteisiin sopivia (esim. ei-magneettisia metalleja). Näitä instrumentteja käyttämällä, NeuroArm voi leikata ja käsitellä pehmytkudosta, ommella, ottaa koepaloja, polttaa kudosta, ja sillä voi myös imeä ja huuhdella. Järjestelmä suodattaa pois myös mahdollisen käsien tärinän. Neurokirurgit koulutetaan työskentelemään 1 mm:n tarkkuudella, kun taas robotti pystyy jopa 30 mikrometrin tarkkuuteen. [5.]



Kuva 14. NeuroArm-kirurginen robotti [6]

NeuroArm on 0.9 m pitkä ja 0.6 m leveä, ja sitä voidaan säätää pöydän korkeuden mukaan. Robotti painaa 230 kg. Alusta on varustettu pyörillä, ja sitä on helppo liikuttaa paikalleen. Siinä on myös varmistettu jarrumeکانismi, joka estää kaiken liikkumisen.

Kolmeulotteiset voima-anturit on sijoitettu robotin käsiin, jotka antavat haptisen palautteen (ks. 5 Haptiikka). Kirurgi istuu työasemalla ja käyttää robottia ohjaimilla, joissa on haptinen palaute. Kirurgi saa hyvän tuntuman ja kuvan leikkauksesta sekä tavallisesta videokuvasta ja MRI-kuvasta, joka tulee melkein reaaliajassa. Järjestelmä on kehitetty toimimaan 1.5 ja 3.0 teslan magneettikentissä.

NeuroArm-järjestelmä ei korvaa kokenutta kirurgia, jota tarvitaan käyttämään robottia. NeuroArm-järjestelmän kehittäminen vei seitsemän vuotta ja maksoi n. 30 miljoonaa dollaria. [5.]

### 3.5.9 Kirurginen Amadeus-robottijärjestelmä

Amadeus (Titan Medical Inc) on uuden sukupolven kirurginen robottijärjestelmäalusta, johon kuuluu neljä robotti käsivartta, jotka takaavat kirurgeille paremman kontrollin ja tarkkuuden. Teknologia, jolle järjestelmä perustuu on saatu eri tieteen- ja teollisuudenaloilta (lääketiede, ilmailu ja puolustusteknologia).

Järjestelmän avulla kirurgit pystyvät kauko-ohjattaviin leikkauksiin sekä kirurgiseen harjoitteluun. Järjestelmä mahdollistaa saumattoman vaihdon leikkauksista, harjoittelustuntoihin. Eräitä kehittyneitä piirteitä Amadeus-järjestelmässä on moni nivelletyt robottikäsivarret, ääniohjattu viestintäjärjestelmä, ja näkemistä parantavat järjestelmät. Järjestelmä kykenee myös antamaan haptista palautetta, jolloin kirurgin tuntuma leikattavaan kohteeseen paranee. [7.]

## 4 Kirurginen simulaatio

### 4.1 Yleistä kirurgisesta simulaatiosta

Lääkärinkoulutuksen perinteiset opetusmenetelmät eivät ole riittäviä tähytystekniikoita omaksuttaessa, ja siksi on käynnistetty koulutuksen ja oppimisympäristöjen uusia sovellutuksia. Lentäjiä on koulutettu simulaattoreilla jo toisen maailmansodan alusta ja tietotekniikkaa on käytetty lentosimulaattoreissa 1980-luvulta asti. Ilmailuammateissa simulaattorien pitkä käyttöhistoria, ja tutkimus ovat osoittaneet, että simulaattorikoulutuksella voidaan merkittävästi lyhentää ammattitaidon hankkimiseen kuluva-aikaa. Riskien vähentäminen simulaation avulla on tuttua myös muilta korkean riskin aloilta, kuten ydinvoima- ja sotilastoiminnasta. Leikkaus-simulaatioiden käyttö harjoittelussa suojaa potilasvahingoilta ja on myös eettinen ratkaisu.

Lääkärien peruskoulutuksessa erilaisia harjoitusmalleja on käytetty jo pitkään. Esimerkiksi anestesian erikoisalan jatko- ja täydennyskoulutuksessa on vuosien kokemus simulaattorista. Ensimmäisiä toimenpideharjoituksia tehtiin koe-eläimillä ja harjoituslaatikoilla (*Black box*). Uusia koulutukseen käytettyjä harjoitusvälineitä ovat tietokone-mallinteiset toimenpide simulaattorit (*computer-based VR simulators*).

Markkinoilla on teknisesti kehittyneitä kalliita simulaattoreita, joiden uskotaan mahdollistavan monipuolisen harjoittelun. Laparoskooppinen sappileikkaus on leikkaussimulaattorien pisimmälle kehitetty toimenpide, joten siitä julkaistu tutkimus tieto kuvaa luultavasti parhaiten, mikä asema simulaattoreilla kirurgikoulutuksessa voisi olla. [8.]

### 4.2 Simulaattorit ja oppiminen

Simulaatiolla tarkoitetaan koulutusstrategioita, joissa oppimiskohteet, -välineet, -ympäristö on luotu todellisuutta jäljittelevin keinoin. Leikkaussimulaattoreita kuvaava nimikkeistö on horjuvaa. Alkeellisin ensimmäisen sukupolven mallinne (*Black box*, harjoituslaatikko) tarkoittaa yleensä suoralta näköyhteydeltä suljettua laatikkoa, jonka sisällä kolmiulotteinen tehtävä suoritetaan laatikkoon työnnetyllä tähytysleikkausinstrumentilla. Samalla kameran ottama kuva välittyy monitorille autenttisen leikkauksen

mukaisesti. Uuden sukupolven simulaattorit hyödyntävät tietokonepohjaista virtuaalito-dellisuutta (*virtual reality; VR simulations*) ja perustuvat kolmiulotteiseen grafiikkaan. Harjoitustehtävät tuotetaan tietokoneen näytölle ja instrumenteilla toimitaan keinoto-dellisuudessa. Uusimmissa virtuaalikirurgian sovelluksissa (mm. LapSim ja LapMentor) on mallinnettu anatomisia rakenteita. Näillä laitteilla voi harjoitella yksittäisiä tehtäviä tai kokonaisia toimenpiteitä, kuten sappirakon poistoa.

Realistinen kudosvaikutelma on saavutettu leikkaustilaa ympäröivien rakenteiden läpi-kohtaisella mallintamisella. Eräissä simulaattorissa on lisäksi tuntopalautetta tuottavaa robotiikkaa (*haptics/force feedback*), joka lisää simulaation todenmukaisuutta. Suori-tuksista tallentuu lukuisia tietoja, jotka mittaavat harjoittelun edistymistä ja joiden avulla voi asettaa oppimistavoitteita.

Leikkaussimulaattoreiden edut ovat helppo toistettavuus ja harjoittelun vakiointi, suo-rituksen tallentuminen, mahdollisuus seurata taitojen kehittymistä, yksilöllinen harjoit-telu sekä mahdollisuus kokeilla ja epäonnistua turvallisesti. Haittoja ovat laitteidenkor-kea hinta ja haasteita simulaattoriharjoittelun liittäminen työn oheen ja integrointi ope-tusohjelmiin. Simulaatio harjoittelun etuna on taitojen kehittäminen yksilöllisen op-pimismopeuden mukaisesti. Laparoskopian kaltaiset monimutkaiset monitoriset taidot vaativat toistuvaa harjoittelua. Simulaattoreista on esitetty aloittelijoiden koulutuksen lisäksi muitakin etuja. Harvakseltaan tähytyskirurgiaa tekevät lääkärit voisivat laitteilla ylläpitää tähytyskirurgian taitojaan. Kirurgien osaamista voitaisiin säännöllisesti myös valvoa (suunnitelmissa ainakin Yhdysvalloissa).

Simulaattorilaitteiston hankintahinnan ja ohjelmistojen lisäksi kuluja aiheutuu simu-laattorin käytöstä ja ylläpidosta. Harjoittelu ohjaajan kanssa työaikana aiheuttaa palk-kakustannusten verran lisäkuluja. Toisaalta mikäli harjoittelu johtaa nopeampaan vir-heettömämpään leikkaussalioyöskentelyyn, menojen vastapainoksi voi koitua säästöjä. Esimerkiksi vaikea sappitieaurio voi johtaa maksansiirtoon, jolloin ylimääräisiä kus-tannuksia kertyy arviolta 100 000 euroa. [8.]

#### 4.4 RoSS-kirurginen simulaattori

Kirurginen robotti simulaattori eli RoSS (Robotic Surgical Simulator) (kuva 15) on tarkoitettu nopeasti kasvavalle tarpeelle realistiseen harjoitteluun kirurgisessa robotiikassa. RoSS näyttää kriittistä, koulutuksellista osaa RPCI:lle, joka kouluttaa kirurgisia robottitiimejä ympäri maailman. Asiantuntijat ennustavat, että RoSS:lla on suuri vaikutus, kun parannetaan kirurgisia tuloksia ja tuote uskottavuutta kasvavilla kirurgisen robotiikan alalla. Huippuharjoittelu, minkä RoSS tarjoaa, siirtyy suoraan parempaan hoitoon tuhansille potilaille. [4.]



Kuva 15. RoSS-simulaattori [9]

#### 4.5 Kirurginen Da Vinci -simulaattori

Da Vinci -simulaattori (Da Vinci *skills simulator*) sisältää paljon harjoituksia ja skenaarioita, jotka on erikoisesti suunniteltu siten, että käyttäjät voivat harjoitella da Vinci -konsolin ohjaimia (kuva 16). Se on siirrettävä, käytännöllinen, tehokas eikä tarvitse mitään lisälaitteita.



Kuva 16. Da Vinci -simulaattori [10]

Da Vinci -simulaattorin etuja ovat

- suoraviivainen *set-up*, jolla käyttäjä voi itsenäisesti ilman valvontaa harjoitella
- sisäänrakennetut mittausjärjestelmät mahdollistavat seurata taitoja, saada reaaliaikaista palautetta ja seurata kehitystä
- hallinnolliset työkalut mahdollistavat harjoittelun liittämisen omiin opetussuunnitelmiin.
- järjestelmän aviohjelmisto mahdollistaa tulevan kehityksen ja uusien harjoitus moduuleitten lisäämisen. [10.]

## 5 Haptiikka

### 5.1 Yleistä haptiikasta

Haptiikka liitetään kosketusaistin fysiologiseen prosessiin. Haptinen järjestelmä on monimuotoinen ja eri osista koostuva rakennelma. Sillä ei ole tiettyä aistielintä perinteisessä mielessä ja sen reseptorit ovat melkein joka puolella kehoa. Viime vuosisadalla Katz (1925/1989), Révész (1950) ja Gibson (1966) tutkivat kädellä saavutettavaa tietoa, kehon sisäistä aistikokemusta, liikkeiden tuomaa tietoa sekä ympäristön aistimista suhteessa maan vetovoimaan. Kontaktin, kosketuksen ja liikkeen yhdistelmästä syntyy aistikokemus iholla ja koko kehon toiminnassa (Révész, 1950).

Haptisen tilan kokeminen painottaa juuri kokemusta ympäristöstä suhteessa kehokokemukseen. Tietoa vastaanotetaan käsillä ja koko keholla. Taktiili on kosketusta ja kosketukseen liittyvää aistihavaintoa. Haptinen havainto on kosketus, joka sisältää vahvan liikeosuuden tiedon välittymisessä. Kosketuksen ja tuntoaistin ilmiöitä kuvataan molemmilla käsitteillä. Taktiili korostaa vastaanottavaa sensoriikkaa ja haptiikka kokonaisvaltaista liikkeeseen perustuvaa informaation hakua. Tässä työssä haptiikka liitetään vahvasti ympäristötiedon jakamiseen ja kehon kokonaisvaltaiseen orientaatioon.

Tuntopalaute (engl. *tactile feedback*) tarkoittaa tahallisesti tuotettua ärsykettä, joka havaitaan ihon tuntoaistin välityksellä. Tuntoaisti on yksi ihmisen viidestä perusaistista ja on näköaistin ja kuuloaistin ohella ihmisen tärkeimpiä aisteja. Tästä huolimatta tuntopalautetta on hyödynnetty nykyisessä tietoyhteiskunnassamme ihmisen ja koneen vuorovaikutuksessa erittäin vähän. Tuntoaistimuksia vastaanottavat pääasiassa ihon pintakerroksissa sijaitsevat mekanoreseptorit, jotka välittävät tietoa myös paineaistin ärsykkeistä. Nämä kaksi aistia ja niiden välittämä informaatio on hyvin samankaltaista, mistä johtuen tuntopalaute aktivoi niitä molempia.

Tuntopalaute on lähes poikkeuksetta hyvin paikallista rajoittuen palautteenantopaikkaan ja sen välittömään läheisyyteen. Tuntopalautetta ei kokonaan voida erottaa voimapalautteesta, joka perustuu kehon liike- ja asentoaisteihin. Nämä kaksi palautemuotoa yhdessä lämpöaistin ja kipuaistin välittämien tuntemusten kanssa muodostavat

haptisen palautteen, jota somatosensorinen järjestelmä, omasta kehosta tulevia tuntoärsyksiä kuljettava hermorata, välittää.

Tuntopalaute eroaa kahdesta muusta pääpalautemodaliteetista, näkö- ja äänipalautteesta, lähinnä kahdella tapaa: tuntoa aistivia reseptoreja on joka puolella kehoa, ja reseptorien vastaanottama informaatio on usein yksityistä, muiden tuntemattomissa. Tämä siksi, että tuntoaisti on mekaaninen aisti, joka vaatii aistittavan kohteen koskettamista. [11.]

## 5.2 Tuntopalautteen havaitseminen

Tuntoaistimukset vaihtelevat eri ihoalueiden välillä ihokerroksissa sijaitsevien mekanoreseptorien määrän ja yleisyyden mukaan. Esimerkiksi sormenpäissä mekanoreseptoreita on huomattavasti tiheämmässä kuin selässä ja siten sormenpäiden tilallinen erottelukyky on parempi. Myös esimerkiksi ihon paksuus, ikä ja harjoittelu vaikuttavat tuntoaistimusten havaittavuuteen.

Yleisesti ottaen ns. karvattoman ihon alueilla (mm. käden sisäpuoli, jalkapohjat, huulet) mekanoreseptoreita on karvaista ihoa tiheämmässä, jolloin myös ihmisen kyky paikallistaa tuntoaersyksiä näillä alueilla on suurempi. Ihmisen kehon tuntoherkimpiä alueita ovatkin juuri sormenpäät, huulet ja sukupuolielimet. Etenkin tietokoneen osoitinlaitteissa, esimerkiksi tuntopalautehiirissä, tuntopalaute johdetaan usein juuri sormenpäihin tai kämmeneen. Joissakin tapauksissa tuntopalaute on kuitenkin parempi suunnata esimerkiksi jalkoihin tai kehoon esimerkiksi tasapainoaitia tai suunnan hahmottamista tukevilla sovelluksissa. [11.]

## 5.3 Tuntopalautteen tuottaminen

Mekaanisesti tuntopalautetta tuotetaan esimerkiksi erilaisten ihoa koskettavien toimimoottorien (engl. *actuator*) avulla, joiden toiminta voi perustua esimerkiksi sähkömoottoreihin, paineilmaan, hydraulikkaan, pietsosähköiseen ilmiöön tai solenoideihin. Tuntopalaute tuotetaan usein ihokontaktin avulla, mutta myös esimerkiksi kovaa toistetut matalat äänet ja riittävän voimakas ilmavirta aiheuttavat iholla tuntoaistimuksia, joita voidaan hyödyntää myös palautteena.

Yleisimmin tuntopalautteen tuottamiseen käytetään väriseviä toimimoottoreita, jolloin puhutaan värinä- tai värinäpalautteesta. Ihminen kykenee luotettavasti aistimaan värinää, jonka taajuus on välillä 20 – 500 Hz tuntoherkkyyden ollessa korkeimmillaan taajuusvälillä 200 - 250 Hz. Taajuuden lisäksi värinäpalautteella tuotetaan erilaisia aistimuksia värinän värähdyslaajuutta (amplitudi), rytmiä tai palautteen kestoa muuttamalla. Tuhatta Hertsiä korkeammat taajuudet ihminen aistii erilaisina pintarakenteina.

Värinäpalautteen lisäksi myös muita mekaanisia menetelmiä on yleisesti käytetty tutkimuskäyttöön tarkoitetuissa prototyypeissä. Esimerkiksi erilaisia paineilma- tai hydraulikalaitteita ja solenoideja voidaan käyttää tuottamaan paineaistimuksia ihoon. Näiden lisäksi myös sähköisiä elektrodeja on kokeiltu, mutta niiden tuottamaa palautetta ei vielä olla kyetty saamaan riittävän hallituksi johtuen muun muassa yksilöiden välisistä herkkyyseroista sähköärsykeille. [11.]

#### 5.4 Tuntopalaute käyttöliittymissä

Löyhästi määriteltynä ensimmäiset tuntopalautekäyttöliittymät syntyivät samalla, kun ensimmäinen kädellä käytettävä ohjainlaite kehitettiin. Tämä sen vuoksi, että esimerkiksi tietokoneen hiiren nappien painamisesta saadaan tuntoaistin kautta erilaista palautetta riippuen siitä mitä nappia kulloinkin painetaan. Tämä palaute kuitenkin kertoo meille ainoastaan syöttölaitteen toiminnasta, ja sitä kutsutaan tahattomaksi tuntopalauteksi (engl. *accidental tactile feedback*). Käyttäjän näin sama palaute ei ole varta vasten tuotettua eikä sen sisältö siten kerro mitään sovelluksen toiminnasta.

Tietokoneiden ja muiden laitteiden käyttöliittymissä tuntopalautetta käytetään useimmiten yhdessä kahden yleisimmän palautemuodon, näkö- ja äänipalautteen, kanssa. Tuntopalautteen avulla voidaankin esimerkiksi auttaa sokeita ja heikkonäköisiä käyttämään heille muuten hankalia graafisia käyttöliittymiä sekä tukea katse-käsi-koordinaatiota erityisen suurta tarkkuutta vaativissa tehtävissä. Tuntopalautetta hyödyntävät käyttöliittymät ovat kuitenkin lähes aina moniaistisia käyttöliittymiä, sillä pelkän tuntoaistin avulla toimiminen on ihmiselle hankalaa. [11.]

Myöskin nykyaikaisissa lentokoneissa käytetään tuntopalautetta ns. *feedback joystick*, joka antaa pilotille samanlaisen tuntopalautteen kuin jos hän ohjaisi hydraulista järjestelmää. Hän saa vastuksen, joka tuntuu, kun hän ohjaa siivekkeitä. [11.]

## 5.5 Tuntopalautteen suunnittelu

Liiallinen tuntopalautteen käyttö on yhtä lailla häiritsevää ja ärsyttävää kuin liiallinen äänen käyttö ja esimerkiksi liiallisen altistumisen peliohjainten värinäpalautteelle on epäilty aiheuttavan jopa vakavia tuntoaistinhäiriöitä. Tuntopalautteen suunnittelussa pitääkin miettiä tarkkaan, missä tilanteissa palautteesta on hyötyä ja kuinka paljon sitä on tarkoituksenmukaista tuottaa. Tärkeintä tuntopalautteen käytössä ei aina välttämättä ole sen tuomat parannukset suoritusaikoihin ja tarkkuuteen vaan lisääntyneestä palauteinformaatiosta saadut positiiviset käyttäjäkokemukset.

Tuntopalautetta käytettäessä joudumme tavalla tai toisella opettelemaan ja muistamaan erilaisten palautteiden merkitykset - toisin sanoen palaute täytyy aina koodata jollakin tapaa. Yksinkertaisimmillaan tämä on esimerkiksi lukuarvojen esittämistä vastaavalla määrällä yksittäisiä palautteita. Nykyisillä tuntopalautelaitteilla tämä ei kaikilta osin kuitenkaan ole mahdollista, joten tuntopalautteen käyttöön on pyritty laatimaan erilaisia käyttöohjeistoja. [11.]

## 5.6 Haptiikka kirurgisessa robotiikassa

Yksi kirurgisen robotiikan haittapuolia on se, että kirurgi ei tunne samalla tavalla kudoksen vastus kuin oikeassa omin käsin tapahtuvassa leikkauksessa. Kirurgisessa robotiikassa käytetään haptiikan osa-aluetta voimapalaute (*force-feedback*), joka antaa vastavoiman, jonka kirurgi tuntee samoin kuin omin käsin tehty toiminta. Esimerkiksi ohuilla neuloilla tehtävät puhkaisut ja solmujen sitominen.



Kuva 17. Sofie force-feedback -kirurginen robotti [12]

Tähän ongelmaa kehitti ratkaisun Linda van den Bedem Eindhovenin Teknillisestä Yliopistosta (TU/e): Sofie (kuva 17) (Surgeon's Operating Forcefeedback Interface Eindhoven) on robotti, joka antaa voimapalautteen. Sofieta ohjataan *joysticillä*, joka tulee raskaammaksi käsitellä riippuen siitä, kuinka paljon vastusta potilaan kudoks antaa. [12.]

## 6 Yhteenveto

Työhön liittyvää aineistoa löytyi paljon, ja se vaikeutti työn kokonaisuuden hahmottamista. Aiheeseen lisättiin vielä yleistä robotiikkaa, joka valaisee käsitystä roboteista ja robotiikasta. Periaatteessa kaikki kirurgiset robotit muistuttavat jotenkin teollisuuden käytössä olevia robotteja tai, ne ovat ainakin joillakin tapaa niistä mallinnettuja.

Kirurgisten robottien tarkkuus on eri luokkaa kuin kirurgien, esim. neurokirurgit koulutetaan työskentelemään 1 mm:n tarkkuudella, kun taas robotti pystyy jopa 30 mikrometrin tarkkuuteen. Robotit mahdollistavat myös ns. telekirurgian, jolloin kirurgin ei välttämättä tarvitse olla fyysisesti läsnä leikkaussalissa, eli potilas voi olla oman paikkakunnan sairaalassa ja kirurgi jossain muualla keskussairaalassa. Haittapuolina ovat korkeat kustannukset, esim. Da Vinci -järjestelmä maksaa n. 1.6 miljoonaa euroa. Kustannukset kirurgien ja huoltohenkilökunnan koulutuksessa voivat olla myös korkeita.

Haptiikkaa katsottiin tarpeelliseksi tuoda esille tässä työssä, koska sillä on suuri merkitys kirurgisen robotiikan tulevaisuudessa. Nimenomaan haptiikka lisää kirurgin todellisuuden tunnetta leikkausta suoritettaessa. Tähän aiheeseen panostettiin hieman enemmän, koska monille lukijoille haptiikka on melko tuntematon käsite.

Kirurgisen simulaation avulla voidaan kehittää uusia leikkausmenetelmiä, ja leikkauksia pystytään simuloimaan ennen leikkausta moneen kertaan, jos se on tarpeellista. Simulaattoreilla voidaan harjoitella myös robotin käyttöä ja tulla tutuksi laitteiden kanssa. Harjoitella voidaan vaikka tuhansia kertoja ja näin karsia pois mahdolliset virheet.

Terveydenhuollon tekniikan kannalta kirurgista robotiikkaa voisi sisällyttää johonkin sopivaan kurssiin. Kirurgisia robotteja on maailmalla käytössä jo paljon, ja tulevaisuudessa näitä laitteita tulee varmasti lisää myös Suomeen.

Tulevaisuudessa leikkauslääketieteestä tulee entistä potilasystävällisempää, koska jos robottien käyttö yleistyy, päästään yhä pienempään kirurgiaan, jolloin potilaan sairaalassa oloaika lyhenee. Tekniikkaa kehitetään enemmän puoliautonomian suuntaan tietokoneiden avulla. Tällöin saadaan liitettyä robotteihin haptiikkaa, värinäpoistoa ja parannettua kuvantamista. Eri kuvantamistekniikoiden (MRI,CT) avulla roboteilla päästään yhä vaikeampiin paikkoihin, kuten esim. aivojen sisäosiin. Roboteilla, jotka eivät vielä ole täysin autonomisia, voidaan ehkä tulevaisuudessa tehdä leikkauksia vain tietokoneen ohjaamana. Voidaan kuvitella, että on olemassa ohjelmia, jotka ladataan järjestelmään, ja (ihmisen valvonnassa tietenkin) robotti hoitaa osan tehtävistä autonomisesti.

Vielä hurjempaa tulevaisuuden näkymää edustaa ns. nanobotit, jotka olisivat nanokokoisia täysin autonomisia robotteja, joilla olisi kyky liikkua ihmisen elimistössä ja verisuonistossa korjaten nyky lääketieteelle mahdottomia vaurioita jopa solutasolla. Nanoteknologian ja robotiikan kehittyessä, ja niitä yhdistettäessä, tuloksena on yhä parempi terveydenhuolto.

## Lähteet

1. Robotiikka/verkkodokumentti/viitattu 20.3.2012. Saatavissa:  
[http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf\\_tiedostot/Robotiikka\\_yleinen.pdf](http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf_tiedostot/Robotiikka_yleinen.pdf)
2. Robotic Surgery/verkkodokumentti/viitattu 15.2.2012, 16.2.2012, 17.2.2012, 24.12.2012. Saatavissa:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Robotic\\_surgery](http://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_surgery)
3. Otavan suuri ensyklopedia/robotti/sivut 5722/5723/viitattu 20.3.2012
4. All About Robotic Surgery/verkkodokumentti/viitattu 25.2.2012. Saatavissa:  
<http://allaboutroboticsurgery.com/surgicalrobots>
5. Project NeuroArm/Verkkodokumentti/viitattu 24.2.2012. Saatavissa:  
<http://www.aihealthsolutions.ca/publications/newsletter/Winter05/www.files/inside/neuroarm.htm>
6. NeuroArm/verkkodokumentti/viitattu 29.3.2012. Saatavissa:  
<http://www.bioopticsworld.com/articles/print/volume-2/issue-/features/image-guided-surgery/a-new-view-of-robotic-surgery.html>
7. Amadeus/verkkojulkaisu/viitattu 25.2.2012. Saatavissa:  
<http://www.azorobotics.com/news.apx?newsID=2307>
8. Simulaattorit/verkkojulkaisu/viitattu 28.2.2012 Saatavissa:  
<http://finohta.stakes.fi/NR/rconlyres>
9. RoSS/verkkojulkaisu/viitattu 17.2.2012. Saatavissa:  
[www.simulatedsurgicals.com](http://www.simulatedsurgicals.com)
10. Skills simulator/verkkojulkaisu/viitattu 19.3.2012. Saatavissa:  
[www.intuitivesurgical.com/products/skills\\_simulators](http://www.intuitivesurgical.com/products/skills_simulators)
11. Haptiikka/verkkojulkaisu/viitattu 18.3.2012. Saatavissa:  
<http://suomisanakirja/haptiikka>
12. Sofie/verkkojulkaisu/viitattu 19.3.2012 Saatavissa:  
<http://mowelle.com/2010/09/30/Linda-van-den-bedan>