
Bildeveiledet og robotisert behandling – kybernetikkens inntog i klinisk medisin

TEMA

ERIK FOSSE

OLE JAKOB ELLE

EIGIL SAMSET

MARGUNN JOHANSEN

JAN SIGURD RØTNES

TOR INGE TØNNESSEN

BJØRN EDWIN

Intervensjonssenteret
Rikshospitalet
0027 Oslo

Introduksjonen av stadig mer avansert teknologi i medisinen gjør at mange operasjoner i dag kan utføres som røntgenveiledet kateterbehandling eller som kikkhullskirurgi. Utvikling av avbildningssystemer og moderne datateknikk muliggjør operasjon med roboter. En rekke roboter er allerede i klinisk bruk i behandlingen av pasienter. Bruken av roboter og bilder i behandlingen gjør simulatorentrening mer aktuelt enn tidligere.

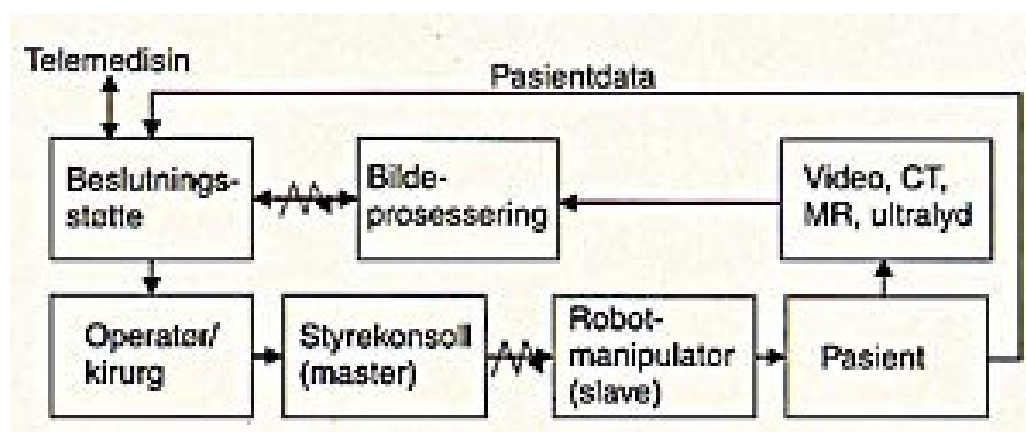
I fremtidens sykehus blir tverrdisiplinært teamarbeid sentralt. Ikke-medisinsk personale som ingeniører, fysikere og andre vil få en viktigere rolle.

I løpet av de siste tiår er stadig mer avansert teknologi blitt tatt i bruk i behandlingen. Den raske utviklingen av datateknologi og avansert bildeteknikk har gjort at sykdommer som tidligere krevde store, åpne operasjoner, i dag kan behandles med radiologisk veiledet intervensjon eller kikkhullskirurgi. I 1998 ble ca. 60 % av alle inngrep for angina pectoris utført som perkutan transkoronar angioplastikk (PTCA) i Norge og kun 40 % som åpen bypasskirurgi (Norsk thoraxkirurgisk forening, nasjonal database). 68 % av operasjonene for gallestein utføres laparoskopisk (1). Ultralyd brukes i økende grad som veiledning ved biopsier.

Kybernetikk

Kybernetikk er læren om styringssystemer og dynamiske prosesser – et sentralt element i et robotisert system. Kybernetikken omfatter modellering, reguleringsteori og teknikker for nøyaktig kontroll av disse. Ved bildeveiledet og robotisert kirurgi vil kybernetiske prinsipper gjøre seg gjeldende på flere nivåer. I denne sammenheng kan dette omfatte følgende elementer (fig 1):

- –Operatør/kirurg
- –Pasientmonitorering
- –Fjernkontroll/styrekonsoll (master)
- –Robot (slave)
- –Bildeopptak (video, magnetisk resonanstomografi (MR), computertomografi (CT), ultralyd, røntgengjennomlysning)
- –Bildeprosessering (analyse og syntese fra ulike bildemodaliteter)
- –Informasjonsoverføring (Integrated Services Digital Network (ISDN), Asynchronous Transfer Mode (ATM), analog telelinje)
- –Beslutningsstøtte (intelligente dataprogrammer)

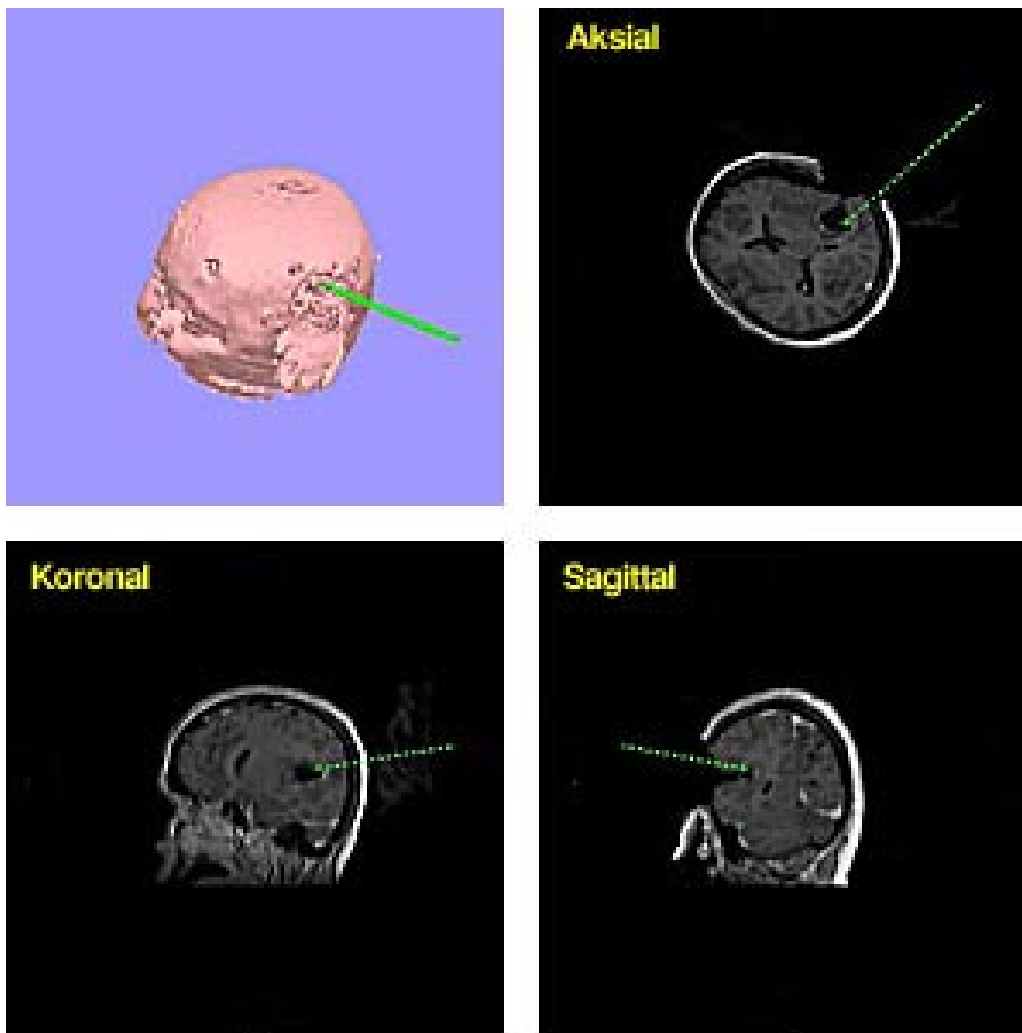


Figur 1 En kybernetisk modell av de ulike elementene som inngår i en fjernstyrt kirurgisk sammenheng. Alle elementene er avgjørende for at prosedyren skal kunne gjennomføres

Bildeteknologi

Inngrep blir i dag styrt etter videobilder, ultralyd, røntgengjennomlysning, MR eller CT. Alle systemene kan gi todimensjonale bilder. Ultralyd, MR og CT kan gi tverrsnittsbilder av anatomiske strukturer. Tradisjonell røntgenteknikk gir projeksjonsbilder, mens video gir overflatebilder. Alle disse bildemodalitetene kan benyttes ved intervensjon, selv om bilderaten varierer fra modalitet til modalitet. CT og MR er de senere år i økende grad blitt benyttet ved diagnostikk og intervensjon, nettopp fordi man har økt avbildningshastigheten og redusert stråledosen på forskjellige måter (2 – 4).

Ultralyd, MR og CT kan også gi tredimensjonale data (3D). Fortsatt er hastigheten ved 3D-avbildning så lav at systemet ikke kan benyttes interaktivt. Men 3D-funksjonen kan benyttes preoperativt i planleggingen av en intervensjon, intermitterende under en operasjon (fig 2) eller ved programmering av en robot (5, 6).



Figur 2 Intraoperativ navigering ved hjelp av MR-bilder. En tredimensjonal modell lages før operasjonen. Intraoperativt følges instrumentet i aksial-, koronal- og sagittalplan

Det faktum at bilder fra alle de nevnte modaliteter kan gjøres tilgjengelige i digital form, gjør at fusjonering av bilder fra ulike modaliteter er mulig. Fusjonering av CT- og MR-bilder har lenge vært brukt rutinemessig i nevrokirurgi, der man skaper et bilde som ivaretar MR-systemets bløtdelsoppløsning og samtidig får CT-systemets klare oppløsning av beinstrukturer og romlige nøyaktighet (7).

Videoskopiske bilder benyttes i økende grad ved intervensjoner. En svakhet med videoskopisk kirurgi har vært at man kun ser overflatene av organer, ikke dypere strukturer. Dette er et problem, spesielt ved behandling av parenkymatøse organer. For å kompensere for dette kan man flette sammen bilder fra ulike modaliteter. Dersom man vil nyttiggjøre seg bildene interaktivt under en operasjon, må det skapes en matematisk sammenheng mellom bildene og operasjonsfeltet. Dette kan gjøres ved å identifisere de samme landemerker i operasjonsfeltet og i et MR- eller CT-volumopptak (8). På denne måten kan man, ved å knytte bildene til en dataprosessor der preoperative bildevolumer tatt opp med MR eller CT er lagret, se tredimensjonale bilder tvers gjennom parenkymatøse organer bare ved å peke på organet med laparoskopet. Dette kalles ”utvidet virkelighet” (9, 10). Bruk av slik bildeprosessering er fullt mulig i dag, men krever stor datakapasitet og kostbare dataprosessorer.

Robotkirurgi

En rekke roboter er allerede utviklet for dedikerte oppgaver innen pasientbehandling og diagnostikk. De teoretiske fordelene med robotisert behandling er:

- –Raskere operasjon
- –Bedre presisjon
- –Mulighet for fjernoperasjon
- –Bedre ergonomi
- –Eliminering av menneskers utilstrekkelighet, f.eks. tremor og tretthet

Man kan dele opp de eksisterende medisinske roboter i to grupper: fjernkontrollerte manipulatorsystemer og autonomt arbeidende, preprogrammerede roboter.

Fjernkontrollerte manipulatorsystemer

Her overføres kirurgens bevegelser via en styrekonsoll, eller såkalt master-enhet, til en slaverobot som beveger instrumentene i operasjonsfeltet (11). Disse robotene er utviklet for situasjoner der man trenger robotens presisjon og mulighet for å forminske (skalere ned) bevegelser og der hvor fjernkirurgi for øvrig har en hensikt.

Flere robotsystemer av denne typen er utviklet for laparoskopisk kirurgi, torakoskopisk kirurgi og åpen hjertekirurgi. Computer Motion's system Zeus (Computer Motion, Goleta, California, USA) består av to armer som styres av kirurgens hender og en tredje arm som er stemmestyrte og beveger kameraet under operasjonen. Kirurgen sitter i en stol ved siden av operasjonsbordet og styrer instrumentene. Systemet har vært brukt ved tuberekonstruksjoner (12) og ved koronar anastomose hos mennesker (13) samt ved kolecystektomier. Ved vår avdeling har vi også benyttet systemet ved reseksjon av splanchnicusnerven hos pasienter med kronisk pankreatitt. Teoretisk vil man få høyere presisjon når kirurgen sitter ergonomisk riktig og man unngår tremor. Ved robotkirurgi mister man imidlertid mye av den taktile følelsen og dermed dybdefølelsen man har ved å manipulere endoskopiske instrumenter direkte. Man er derfor mer avhengig av tredimensjonale videoskopiske bilder i denne situasjonen enn ved vanlig endoskopisk kirurgi. Vi benytter Vistas tredimensjonale videosystem Cardioview 8000 (Vista Medical Technologies Inc., Boston, Massachusetts, USA) ved disse inngrepene (fig 3).



Figur 3 Operasjon med roboten Zeus. Kirurgen sitter ved siden av operasjonsbordet og styrer tre robotarmer. Armen som holder endoskopet er stemmestyrte, de andre styres av operatørens hender. Han styrer ved hjelp av et tredimensjonalt brillesett

Det kanskje teknisk mest avanserte systemet i denne genren er roboten da Vinci fra Intuitive Surgical (Mountain View, California, USA). Her er et tredimensjonalt videosystem integrert i roboten. Roboten har dessuten to ekstra ledd i instrumentene som gir bevegelsesmuligheter tilsvarende et håndledd. da Vinci har vært benyttet ved hjertekirurgi, både koronarkirurgi (14) og ventilimplantasjoner, samt ved laparoskopiske inngrep (inkludert fundoplikasjon og gastric banding) (15). Per oktober 1999 var det utført mer enn 200 hjerteoperasjoner (koronaroperasjoner og mitralplastikker) med disse to systemene (personlige meddelelser F. Mohr, Leipzig, H. Reichenspurner, München, Tyskland, F. Damiano, Hersey, USA).

ARTEMIS-systemet er utviklet av Forschungszentrum i Karlsruhe i Tyskland og er et liknende system utviklet for laparoskopisk kirurgi (16). Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (Stuttgart, Tyskland)

har utviklet et fjernstyrt manipulatorsystem hvor sensorisk informasjon til operatøren er prioritert (17).

Et eksempel på en robot laget for presisjonskirurgi i små felter er Robot Assisted Micro Surgery – RAMS-systemet (NASA – Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California USA and Microdexterity Systems Inc, Memphis, Tennessee, USA), utviklet for øyekirurgi, med presisjon på under 10 mikron (18).

Et annet system for øyekirurgi er basert på en mikrokirurgisk robot og assosierte virtuelle omgivelser (19). Det bygges opp en nøyaktig modell av øyet, hvor både anatomen visualiseres og mekaniske beregninger utføres slik at kirurgen får taktil feedback under operasjonen.

Det er også utviklet systemer spesielt for anastomosering av mikrokår under mikroskop. Det er utført karanastomoser i forsøksdyr på kar med 1 mm i diameter med dette systemet (20)

Computer Motions stemmestyrte robot Aesop utgjør en av komponentene i Zeus-systemet, nemlig den ene armen som holder videoskopet. Aesop er benyttet ved en rekke kirurgiske og nevrokirurgiske avdelinger over hele verden og overflødiggjør assistenten som holder endoskopet. Fordelen er at skopet holdes helt stille. Operatøren styrer systemet på samme måte som han styrer en assistent, med stemmen. Ved Intervensjonssenteret har vi benyttet denne stemmestyrte roboten ved en rekke laparoskopiske og torakoskopiske prosedyrer (fig 4). Dette er kanskje den mest anvendte roboten ved kirurgiske prosedyrer i dag.



Figur 4 Operasjon med den stemmestyrte roboten Aesop som assistent. Kirurgen styrer torakoskopet med stemmen. Roboten ”erstatter” en assistent

Autonome roboter

Dette er roboter som er programmert til å gjøre en selvstendig oppgave basert på tredimensjonal informasjon fra preoperativ CT, MR eller annen undersøkelse.

Et eksempel på dette systemet er Robodoc (Integrated Surgical Systems Inc., Sacramento, California, USA). Denne roboten er brukt ved oppfresing av femur ved innsetting av hofteproteser (21, 22). Systemet er preprogrammert, basert på et tredimensjonalt CT-bilde av hoften og en 3D-modell av den aktuelle sementfrie protese som kombineres. Basert på disse opplysningene vil roboten frese et eksakt hull i femurskafet slik at protesen teoretisk får bedre feste enn ved manuell oppfresing. Et annet system som baserer seg på tilsvarende teknikk er Orto-Maquet's CASPAR (Computer Assisted Surgical Planning And Robotics, Maquet, Rastatt, Tyskland). Disse systemene og liknende systemer er brukt i behandlingen av pasienter ved en rekke sentre i Europa. Man har imidlertid ikke kunnet dokumentere mindre proteseløsning eller færre infeksjoner.

Ved Johns Hopkins-universitetet har man utviklet en robot for presis deponering av radioaktive partikler for brakyterapi i små tumorer. Systemet er basert på preoperativ informasjon fra CT-undersøkelse og har en presisjon på 0,5 mm. Systemet er utviklet for behandling av leverlesjoner, men tenkes brukt i flere organsystemer der perkutan deponering av radioaktive partikler med høy presisjon er nødvendig (23).

Forhåndsprogrammerte roboter er også brukt ved stereotaktisk intrakranial kirurgi. Den nevrokirurgiske roboten MINERVA (Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne, Sveits) (6) er utviklet for å operere i en CT-skanner. Roboten er forhåndsprogrammert og utfører hele inngrepet, kirurgens rolle er å planlegge og overvåke prosedyren. En annen stereotaktisk robot er NEUROMATE fra iMMi Medical Robots (Bron, Frankrike). Her er det instrumentføringen ved f.eks. biopsier som forhåndsprogrammeres, slik at guiden til biopsinålen er nøyaktig posisjonert og orientert før biopsien utføres manuelt.

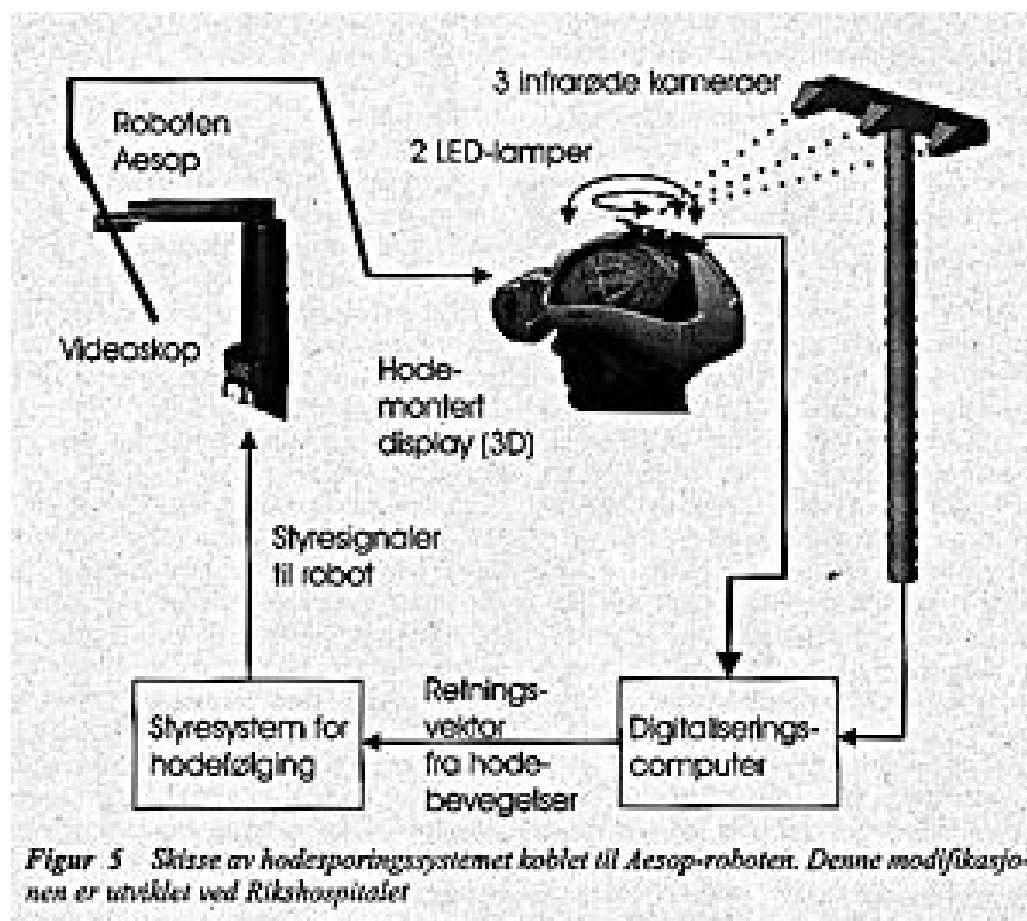
For behandlinger av pasienter i områder med sterk ioniserende stråling er det utviklet spesielle robotsystemer. Ved Massachusetts General Hospital har man bygd opp et robotisert pasientposisjoneringssystem (PPS) ved protonstråleterapi, der man kan programmere både apparatur og bord slik at målområdet for stråleterapien er i isosenter. Systemet sikrer høy presisjon og minimal eksponering for pasient og personale (24).

Styringssystemer og signaloverføring

Roboter kan styres ved direkte overføring av kirurgens håndbevegelser. I Zeus-systemet sitter kirurgen med to Castroviejo-håndtak tilkoblet en styrekonsoll (master) og styrer instrumentene. I Vinci-systemet styres med hendler festet

til kirurgens fingrer. ComputerMotion leverer stemmestyring av robot (Aesop) og hele operasjonsstuer (Hermes). Stemmetstyrte operasjonsstuer eller deler av operasjonsstuer leveres også av Dornier og Siemens. Fordelen med stemmestyring av assistanseroboter, bordbevegelse, skjermer etc. er at det er slik kirurgen styrer disse systemene i dag. I dag gir han en muntlig kommando til en assistent, med disse systemene gis kommandoen til en robot.

Dersom kirurgen ser bildene i en hjelm, er styring med hodebevegelse mer hensiktsmessig enn stemmestyring, da den intuitive reaksjonen for å fokusere på objekter perifert i synsfeltet er å snu hodet. Ved Intervensjonscenteret har vi derfor utviklet et system som følger hodebevegelser. Aesop-roboten er modifisert til å ta imot signaler fra en ekstern sensor som måler hodebevegelsene (fig 5). I prototypen ble dette utført ved å feste lysdioder på de hodemonteerte skjermene tilhørende 3D-visualiseringssystemet Vista (fig 6). Disse kan sees av tre infrarøde kameraer (Flashpoint, Image Guided Technologies, Bulder, Colorado, USA) (fig 7). Via sensorene overføres hodebevegelsene til robotens styringssystem. Dette kan imidlertid med fordel gjøres med andre former for sensoriske målinger av hodebevegelsene (gyroskoper, ultralyd eller magnetiske sensorer). Dette er et velkjent prinsipp fra f.eks. styring av jagerfly og missiler (25). Laparoskopet vil med dette systemet alltid følge kirurgens hodebevegelse. En annen metode for intuitiv bildefremstilling er å etablere et sporingssystem der f.eks. et endoskopisk instrument har en spesiell farge. Endoskopet kan så kodes til å følge dette instrumentet.



Figur 5 Skisse av hodesporingssystemet koblet til Aesop-roboten. Denne modifikasjonen er utviklet ved Rikshospitalet



Figur 6 Lysdioder plassert på Vista-hjelmen for hodesporing



Figur 7 Operasjon med hodesporingssystemet. Tre kameraer over kirurgen monitorerer hodebevegelsene og overfører dem til Aesop-roboten

De fleste roboter i dag er utviklet for å utføre oppgaver i kirurgens umiddelbare nærhet. Utviklingen av telelinjer og satellittkommunikasjon brukes allerede i utstrakt grad ved overføring av bilder, og har i oppvisningsøyemed vært brukt til fjernkirurgi med ulike robotsystemer. Fjernstyring krever rask, høykvalitets bildeoverføring og rask overføring av signalene til roboten. Dette krever full digitalisering av alle elementer av bildeoverføringen og bevegelsesoverføringen. I dag har man i prinsippet tre alternative teleoverføringssystemer: telefonlinjer som ISDN, høykapasitetsnett som ATM og satellittoverføring.

Videokonferanseløsninger over det ordinære telefonnettet (ISDN-linjer) blir i dag hyppig benyttet til bl.a. møtevirksomhet. Overføringskapasiteten (båndbredden) i standardutstyr (384 kbit/s) er imidlertid så lav at kvaliteten på videobildet blir så dårlig at teknologien er lite egnet til kirurgisk fjernassistanse. Nettverksteknologi med høy overføringskapasitet (bredbåndsnett) som f.eks. ATM-nett kan overføre video og bevegelige bilder (angiografier) med høy kvalitet til medisinske formål. Både ISDN og ATM benytter som regel fysiske nettforbindelser, mens bruk av satellitt gjør det mulig med trådløs

overføringsmetode også når kapasitetsbehovet er stort. Når roboter skal fjernstyres, må både styreinformasjon og bilder overføres sammen med selve styresignalene til roboten.

Diskusjon

Avanserte teknologiske løsninger innen bildeveiledning og behandling introduseres fortløpende i medisinen. Argumentasjonen for innføring av disse systemene er at de forenkler diagnostikk og behandling og fører til mindre belastning for pasientene. Innføringen av høyteknologi muliggjør derfor behandling av nye pasientgrupper. Ved å forkorte sykehusopphold og redusere bruken av dyre intensivtjenester vil store investeringer kunne forsvares.

Utviklingen av røntgenteknologi og datateknologi har gjort at man i dag kan fremskaffe høykvalitetsbilder med en brøkdel av den stråledosen som tidligere var nødvendig. Samtidig blir stadig flere kontrastundersøkelser og diagnostiske kirurgiske undersøkelser som f.eks. artroskopi erstattet av MR-undersøkelser (2). Dette reduserer belastningen og risikoen både for pasienter og personale. Økende automatisering av behandlingsprosedyrer ved stråleterapi eller CT-veiledede intervensjoner vil føre til økt beskyttelse av personalet som utfører prosedyrene.

Operasjonsrobotene man benytter i dag er tidliggenerasjonsroboter, de er på samme nivå i medisinen i dag som mobiltelefonene var i samfunnet i 1960-årene. Morgendagens roboter vil inneholde en egen "intelligens" og være fjernstyrte. Ved Massachusetts Institute of Technology Artificial Intelligence Laboratory drives forskning og prototypebygging av mikromotorer og ulike varianter av mikroroboter for fremtidens minimalt invasive kirurgi (26). Blant annet er det laget prototyper av små roboter som kan "kjøre" innover i tarmsystemet og f.eks. behandle tumorer i colon med laser, mens kirurgen sitter ved et konsoll og fjernstyrer kjøretøyet med radiobølger. Etter hvert som stadig mindre computersystemer utvikles, kan man tenke seg mikroroboter som utfører operasjoner inne i blodbanen.

Mulighetene for å transportere store datamengder over bredbåndsnett vil påvirke arbeidsmetodene i helsevesenet. Ved innføring av digitale lagringsmedier for røntgenbilder (Picture Archiving and Communication System, PACS) og ved å knytte disse til et bredbåndsnettverk vil bildediagnostikk og bildeprosessering kunne utføres på et hvilket som helst sykehus tilknyttet nettverket, uten merkbar tidsforsinkelse. Dette vil få betydning for vaktordninger og datainvesteringer ved sykehusene. Videobilder fra operasjoner vil også kunne sendes via dette nettet. Ullevål sykehus, Rikshospitalet, Telia og Ericsson har de siste årene hatt et samarbeid der man har overført videobilder fra operasjoner mellom de to sykehusene. Dette prosjektet viste at ved bruk av ATM-nett og MPEG2 (Motion Pictures Exports Group)-komprimering ved 6 – 8 Mbit/s, var bildekvaliteten tilnærmet uendret med ubetydelig tidsforsinkelse (O. Hanseth, personlig meddelelse). Det er således teknologisk fullt mulig at deler av operasjonsteamet befinner seg på et annet sted enn pasienten, uten at man dermed mister informasjon.

Undervisning av studenter og spesialister vil kunne forenkles både ved muligheten av å følge prosedyrer i sann tid uten å være til stede i operasjonsrommet og ved oppbygging av medieservere, der ”gode undervisningskasus” og pasienter med typiske symptomer på aktuelle lidelser er lagret.

Utviklingen av mulighetene for utveksling av bilder og ikke minst fjernoperasjon åpner for en rekke etiske problemstillinger. For det første blir pasientens krav til anonymitet utsatt. Ved utveksling av bilder fra ett sykehus til et annet for tolking vil også nødvendigvis sykehistorien følge med. Det samme gjelder ved overføring av videobilder i konsultasjonsøyemed. Både ved fjerndiagnostikk og ved fjernoperasjoner, der deler av teamet befinner seg ved et annet sykehus, åpnes problemstillinger omkring ansvarsforhold, pasientinformasjon og ikke minst pasientkontakt. Man kan vanskelig forestille seg at en ansvarlig operatør som befinner seg milevis fra pasienten kan påta seg ansvar for informasjon, konvertering av operasjonen til standardinngrep ved teknisk svikt etc. Vi tror derfor at fjernoperasjoner i vårt land i overskuelig fremtid vil begrense seg til undervisningssesjoner der fjernoperatøren deltar som hovedsakelig passiv assistent med rådgivning etc. Innen romfartsprogrammer og i krigsmedisinsk forskning, derimot, er fjernoperasjon med robot et seriøst alternativ (27).

Ved robotkirurgi mister operatøren informasjonen fra sitt dype sensoriske system, og dette vanskeliggjør orientering i rommet. Tredimensjonale bilder og kinetisk feedback fra systemet til operatøren er derfor nødvendig for at robotisert kirurgi skal oppnå utbredt anvendelse (28). Selv med slik teknologi krever robotisert kirurgi betydelig trening, og læringskurven er lang. I dag benyttes kadavermodeller og dyremodeller i treningen med robot. Bildeveiledet behandling, særlig ved bruk av robot, ligger godt til rette for simulatortrening. Simulatortrening av fremtidens operatører vil endre utdanningen, utvelgelsen og sertifisering av intervensjonelle behandlere.

De fleste robotene som leveres i dag, bærer preg av å være prototyper – de krever spesiell trening. Solid dokumentasjon på forbedrede resultater eller kostnadsbesparelser foreligger ikke. Mens stemmestyrte og automatiserte assistentsystemer som Aesop og Hermes allerede er på vei inn i klinikken, er fortsatt de fleste operasjonsrobotene dyre systemer under utvikling på spesielle avdelinger. Produkter av denne typen får ingen plass i den kliniske hverdag før de beviselig bidrar til å forenkle og sikre eksisterende prosedyrer. Bildeveilede og robotiserte prosedyrer blir allemannseie den dagen man får til operasjonen *fordi* man benytter prosedyren og ikke *på tross av* at man benytter den. For mange av dagens minimalt invasive og særlig robotiserte prosedyrer er det fortsatt et stykke igjen til man har nådd et slikt nivå.

Innføring av høyteknologi vil endre personalsammensetningen i sykehuset. Allerede i dag ser vi en tendens i retning av tverrfaglig organisering av prosedyrene innen en rekke fagområder, bl.a. hjertekirurgi og karkirurgi (29). Avansert bildeprosessering og robotintervensjoner vil kreve at også andre personalgrupper, som sivilingeniører, fysikere og matematikere, vil bli engasjert i behandlingsprosedyrene. Ny teknologi har ingen verdi hvis den ikke virker optimalt når man trenger den.

LITTERATUR

1. Buanes T, Mjåland O, Waage A, Langeeggen H, Holmboe J. A population-based survey of biliary surgery in Norway. Relationship between patient volume and quality of surgical treatment. *Surg Endosc* 1998; 12: 852 – 5.
2. Gudmundsen TE, Vinje B. Undersøkelsesmønsteret ved en røntgenavdeling gjennom 25 år. *Tidsskr Nor Lægeforen* 1990; 110: 2781 – 4.
3. Alexander E, Moriarty TM, Kikinis R, Black P, Jolesz FM. The present and future role of intraoperative MRI in neurosurgical procedures. *Stereotactic Funct Neurosurg* 1997; 68: 10 – 7.
4. Butler WE, Piaggio CM, Constantinou C, Niklason L, Gonzalez RG, Cosgrove GR et al. A mobile computed tomographic scanner with intraoperative and intensive care unit applications. *Neurosurgery* 1998; 42: 1304 – 10.
5. Samset E, Hirschberg H. Neuronavigation in intra-operative MRI. *Computer Aided Surgery* 1999; akseptert for publisering.
6. Glauser D, Flury P, Durr P, Funakubo H, Burckhardt CW, Favre J et al. Configuration of a robot dedicated to stereotactic surgery. *Stereotactic Funct Neurosurgery* 1990; 54 – 55: 468 – 70.
7. Meyer CR, Boes JL, Kim B, Bland PH, Zasadny KR, Kison PV et al. Demonstration of accuracy and clinical versatility of mutual information for automatic multimodality image fusion using affine and thin-plate spline warped geometric deformations. *Med Image Anal* 1997; 1: 195 – 206.
8. Alpert NM, Berdichevsky D, Levin Z, Morris ED, Fischman AJ. Improved methods for image registration. *Neuroimage* 1996; 3: 10 – 8.
9. Blackwell M, Morgan F, DiGioia AM. Augmented reality and its future in orthopaedics. *Clin Orthop Rel Research* 1998; 354: 111 – 22.
10. Tang SL, Kwok CK, Teo MY, Sing NW, Ling KV. Augmented reality systems for medical applications. *IEEE Engineering in Medicine & Biology Magazine* 1998; 17: 49 – 58.
11. Sheridan TB. Defining our terms. *Presence* 1992; 1: 272 – 4.
12. Falcone T, Goldberg J, Garcia-Ruiz A, Margossian H, Stevens L. Full robotic assistance for laparoscopic tubal anastomosis: a case report. *J Laparoendosc Adv Surg Techn* 1999; 9: 107 – 13.
13. Reichenspurner H, Damiano RJ, Mack M, Boehm DH, Gulbins H, Detter C et al. Use of the voice-controlled and computer-assisted surgical system

- ZEUS for endoscopic coronary artery bypass grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1999; 118: 11 – 6.
14. Loulmet D, Carpentier A, d'Attellis N, Berrebi A, Cardon C, Ponzio O et al. Endoscopic coronary artery bypass grafting with the aid of robotic assisted instruments. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1999; 118: 4 – 10.
 15. Cadiere GB, Himpens J, Vertruyen M, Bruyns J, Fourtanier G. [Nissen fundoplication done by remotely controlled robotic technique] [French]. *Annales Chir* 1999; 53: 137 – 41.
 16. Voges U, Holler E, Neisius B, Schurr M, Vollmer T. Evaluation of artemis, the advanced robotics and telemanipulator system for minimally invasive surgery. 2nd workshop of medical robotics. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1997: 137 – 48.
 17. Urban V, Wapler M, Weisener T, Schonmayr R. A tactile feedback hexapod operating robot for endoscopic procedures. *Neurol Res* 1999; 21: 28 – 30.
 18. Charles S, Das H, Ohm T, Boswell C, Rodriguez G, Steelse R et al. Dexterity-enhanced telerobotic microsurgery. I: Proc. of the 8th internat conf on advanced robotics. Monterey Piscataway NJ: Institute of electrical and electronics engineers, 1997: 5 – 10.
 19. Hunter IW, Jones LA, Sagar MA, Lafontaine SR, Hunter PJ. Ophthalmic microsurgical robot and associated virtual environment. *Comput Biol Med* 1995; 25: 173 – 82.
 20. Mitsuishi M, Watanabe H, Nakanishi H, Kubota H, Iitzuka Y. Dexterity enhancement for a tele-micro-surgery system with multiple macro-micro co-located operation point manipulators and understanding of the operator's intention. I: Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 1997: 821 – 30.
 21. Bargar WL, Bauer A, Borner M. Primary and revision total hip replacement using the Robodoc system. *Clin Orthoped Rel Res* 1998; 354: 82 – 91.
 22. Spencer EH. The ROBODOC clinical trial: a robotic assistant for total hip arthroplasty. *Orthop Nurs* 1996; 15: 9 – 14.
 23. Schreiner S, Anderson JH, Taylor RH, Funda J, Bzostek A, Barnes AC. A system for percutaneous delivery of treatment with a fluoroscopically-guided robot. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 1997: 747 – 56.
 24. Mavroidis C, Flanz J, Dubowsky S, Drouet P, Goitein M. High performance medical robot requirements and accuracy analysis. *Robotics Computer-Integrated Manuf* 1998; 14: 329 – 38.
 25. Hudgins V, Leger A, Dauchy P, Pastor D, Pongratz H, Rood G et al. Head based control. RTO Technical report 7. Alternative control technologies.

Neuilly-sur-Seine: NATO Research and technology organization, 1998: 29 – 59.

26. Flynn AM, Udayakumar KR, Barrett DS, McLurkin JD, Franck DL, Shectman AN. Tomorrow's surgery: micromotors and microrobots for minimally invasive procedures. *Minimal Inv Ther All Technol* 1998; 7: 343 – 52.

27. Satava RM. Virtual reality and telepresence for military medicine. *Ann Acad Med Singapore* 1997; 26: 118 – 20.

28. Wapler M, Neugebauer J, Weisener T, Urban V. Robot-assisted surgery system with kinesthetic feedback. *Comput Aided Surg* 1998; 3: 205 – 9.

29. Lærum F, Stordahl A. Interventional clinic: a common turf for endoscopic surgery and interventional radiology. *Eur J Radiol* 1992; 15: 293 – 8.

Publisert: 20. januar 2000. Tidsskr Nor Legeforen.

© Tidsskrift for Den norske legeforening 2026. Lastet ned fra tidsskriftet.no 6. februar 2026.