

Ville Nurminen, Rahul Raj ja Martin Lehecka

Modernit 3D-eksoskoopit tuovat neurokirurgian digiaikakaudelle

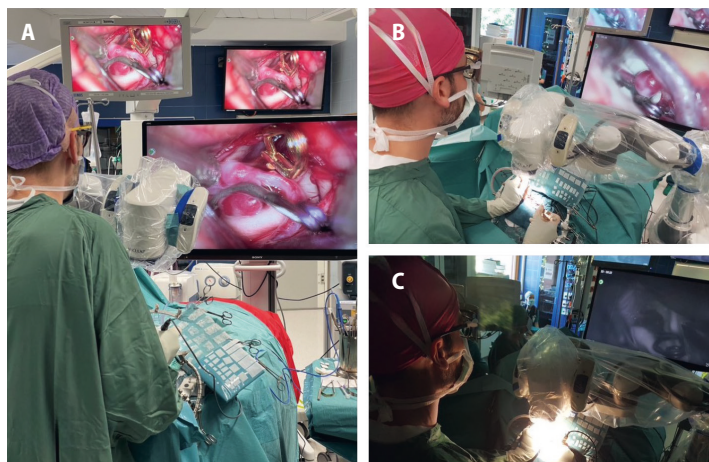
Nykypäivän neurokirurgian mikrokirurgiset standardit edellyttävät leikkauskohteen tarkkaa havainnointia. Optinen leikkausmikroskooppi on pitkään ollut neurokirurgin tärkeimpiä työkaluja. Aivan viime vuosina digitaalisen teknologian kehittyminen on tuonut markkinoille eksoskooppeja (extracorporeal telescope, exoscope). Eksoskooppia käytettäessä kolmiulotteinen (3D) kuvainformaatio sijaitsee okulaarien sijaan suuriresoluutisella kolmiulotteisella näytöllä, ja kamerayksikön ohjaaminen voi tapahtua esimerkiksi jalkapolkimella, mikä vapauttaa kädet mikrokirurgiaan. Erilaisten eksoskooppien käyttöperiaatteet voi pääasiassa omaksua nopeasti. Raportoidun kokemuksen mukaan eksoskoopit tuottavat erinomaisen kuvan sekä sallivat kirurgille usein ergonomisemman työskentelyasennon, mikä mahdollistaa laadukkaan ja turvallisen kirurgian.

Neurokirurgiassa jo vuosikymmeniä käytetyillä leikkausmikroskoopeilla pieninkin leikkauskohde saadaan tarkasti valaistua ja suurennettua, mikä mahdollistaa rakenteiden erottamisen ja instrumenttien hienovaraisen käsittelyn (KUVA 1 A). Viimeisimpien mikroskooppiversioiden yhteyteen on tullut mahdollisuus viedä kuvasignaalia erilliselle suuriresoluutiselle 3D-näytölle, jota katsellen kirurgi voi teoriassa suorittaa jopa koko leikkauksen. Tällöin mikroskooppi on muuntunut

käyttötavaltaan eksoskoopiksi, jossa kamera on potilaan ulkopuolella ja kuvainformaatio näytöllä endoskopian tapaan. Tavanomaiset leikkausmikroskoopit ovat tässä sovelletussa käytössä kookkaita sekä herkästi leikkauksentässä kirurgin tiellä. Varta vasten kehitetyt ja kooltaan selvästi pienemmät, digitaaliset 3D-eksoskoopit edustavat uusinta laitekehitystä ja voivat korvata monipuolisesti perinteisen leikkausmikroskoopin.



KUVA 1. Leikkausmikroskooppi ja optinen kamera. A. Mikroskoopissa kirurgin okulaarien alle on sijoitettu suuohjauskappale, ja vieressä sijaitsevat myös avustavan kirurgin okulaarit. Optinen kamerayksikkö kiinnittyy tasapainotetun ja nivelletyn kameravarren päähän. B. Eksoskoopissa digitaalinen kamerayksikkö sijaitsee motorisoidun kameravarren päässä. Erillinen ja jalustalla liikuteltava näyttö on sijoitettu kuvassa eksoskoopin taustalle. Ohjaamiseen käytettävissä oleva jalkapoljin on asetettu lattialle.



KUVA 2. Aivovaltimopullistumien kirurginen sulkeminen eksoskooppiavusteisesti. Aivovaltimopullistuma on suljettu titaaniklipsillä (A). Sulikutulos pystytään varmistamaan verisuonivärjäyksellä (fluoresenssi-ilmiö), jolloin suljettu aivovaltimopullistuma pysyy värjäyksen aikana näytöllä pimeänä ja kirkkaana näkyvien suonihaarojen avoimuus varmistuu (B ja C).

Modernit 3D-eksoskoopit

Ensimmäiset eksoskooppiversiot olivat kiinteisiin varsiin kiinnitettäviä kamerayksiköitä, ja niiden liikuttaminen perustui manuaaliseen kameravarren nivelien säätämiseen (1). Uudemmat laiteversiot koostuvat lattialla liikuteltavasta pääyksiköstä ja motorisoidusta, teollista robottivarvasta muistuttavasta kameravarresta (2–4). Digitaalinen kamerayksikkö on tyypillisesti kooltaan merkittävästi tavanomaisen leikkausmikroskoopin optista yksikköä pienempi (KUVA 1 B). Kameroissa on pitkä polttoväli, joka vapauttaa tarvittaessa työskentelytilaa kameran ja leikkauskohteen väliin, sekä LED-valonlähde vähentämässä myös lämpövaikutusta leikkausalueella. Eksoskooppeja ohjataan pääasiassa erillisellä jalkapolkimella tai perinteisemmin kamerayksikön käsikahvasta. Myös kokeellisempia liikuttelutapoja on kehitetty, esimerkiksi kirurgin instrumenttien asennon tai pään liikkeiden seuraaminen, mahdollisesti yhdistettynä äänikomentoihin (5–7).

Eksoskooppien täysin digitaalisessa muodossa oleva kuvasignaali mahdollistaa optista kuvaa monipuolisemman kuvan muokkaamisen, esimerkiksi tietyn värimaiseman tai rajapintojen korostamisen taikka muun informaation tuomisen samaan kuvamaisemaan (muun muassa verisuonien tai aivokasvaimien fluoresenssivärjäys) (KUVA 2) (4,8).

Alusta alkaen suunniteltuja, itsenäisiä eri valmistajien 3D-eksoskooppeja on markkinoilla jo useampia eri ominaisuuksin varusteltuna.

Eksoskooppiteknologiaan ei ole raportoitu liittyvän vikaherkkyyttä esimerkiksi leikkausmikroskooppeihin verrattuna.

Käytettävyys ja työergonomia leikkaussalissa

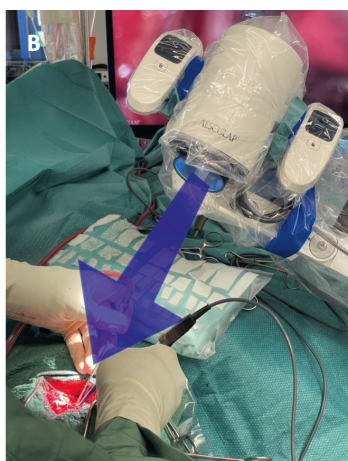
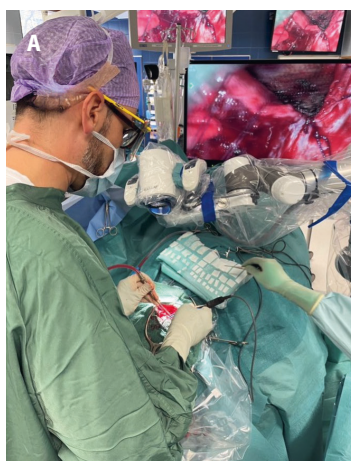
Mikroskooppia käytettäessä kirurgin pään ja kehon asento seuraavat okulaarien ja kameran optiikan liikehdintää ikään kuin pallopinnalla leikkauskohteen ympärillä (KUVA 3 A). Kirurgin pään kallistukset antavat proprioseptiivisen palautteen instrumenttien suuntaamiseksi leikkausalueelle. Erityisesti hyvin viistoissa katselukulmissa kirurgi voi kuitenkin ajautua epämiellyttäviin ja staattisiin työasentoihin. Valtaosa neurokirurgeista on kokenut työhön liittyviä tukielinvaivoja, ja työergonomiaa on viime aikoina huomioitu yhä enemmän (7,9).

Eksoskooppia käytettäessä näyttö ja kuva-informaatio sijaitsevat tyypillisesti vakiopisteessä koko leikkauksen ajan. Kirurgin asento ei ole tällöin sidottu kameran liikehdintään, vaan pääasiassa instrumentteja pitelevät kädet kompensoivat mielekkäästi kameran äärimmäisetkin kallistukset ja kierrot, jolloin kirurgi voi säilyttää pystysuoran ja ergonomisen työskentelyasennon joko seistessään tai istuessaan (KUVAT 3 B ja 4) (7,10–13). Mikroskoopin vaatimiin asentoihin liittyvät ja yleiset niska- tai selkäkiputunteukset poistuivat kokeneilta eksoskoopin käyttäjiltä käytännössä täysin (7).

Näytöillä toimittaessa instrumenttien vienti leikkauskohteeseen vaatii totuttautumista uu-



KUVA 3. Kaularangan hermojuurivapautus etukautta. A. Leikkausmikroskooppia käytettäessä kirurgi katsoo okulaareihin ja asentoaan taivuttaen suuntaa optikan viistosti nikamaväliin. B. Eksoskooppia käytettäessä kamera suuntautuu viistosti leikkauskohteeseen, mutta kirurgi katsoo kuvaa näytöltä ja asento säilyy ergonomisena.

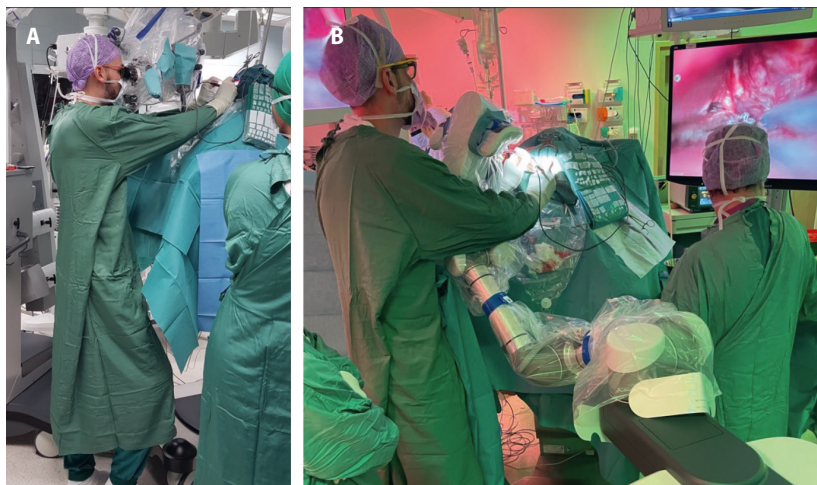


KUVA 4. Eksoskooppia käytettäessä kirurgi katsoo eteen sijoitettua suuriresoluutioista 3D-näyttöä. A. Vapaa tila leikkausalueella mahdollistaa kuitenkin myös kohteen samanaikaisen tarkastelun paljaalla silmällä. B. Kameran liikkeitä kompensoidaan käsin asennolla instrumenttien viemiseksi kohteeseen. Eksoskooppi sallii hyvin viistoja mutta yhä ergonomisia työskentelysuuntimia.

denlaiseen suunnistamiseen, kun edellä mainittu proprioseptiivinen pään kallistusten palaute jää pois (10,14,15). Toisaalta esimerkiksi jalkapoljinohjauksen avulla instrumentit voidaan pitää suunnistettaessa leikkauskentässä eikä leikkaus keskeydy liikkeen aikana (4). Aiempi kokemus endoskopiasta tai jalkapolkimen hyödyntämisestä voi helpottaa käyttöönottoa ja tukee kirurgin pääsemistä mukavuusalueelleen (11,16). Myös kokemus videopeleistä saattaa olla eduksi, mutta tutkimusta tältä osin on tehty pääosin muilla kirurgian aloilla (6,17). Puettavilla 3D-laseilla välittyvän kolmiulotteisen kuvan katseluun voi joillakin käyttäjillä liittyä lieviä haittatuntemuksia tai silmien väsymistä, mutta tämäkin on usein tottumiskysymys (7,18). Uusissa leikkaussaleissa voidaan hyödyntää silmäystävällisempää ergonomista valaistusta eri tilanteisiin, jolloin heijastukset

näyttöruuduilta vähenevät ja kuvan kontrastisuhte paranee (**KUVA 5**).

Eksoskoopin käyttöönotossa toiminnan mukavuusalue löytyy vähitellen, jolloin laitteen edut pääsevät kunnolla esiin (11,16). Pienen kokeellisen laboratorioharjoitteen perusteella oppimisnopeudessa eksoskoopin tai mikroskoopin välillä ei ollut merkittävää eroa (16). Nykyisin eksoskooppeja kliniseen käyttöön otavilla kirurgeilla on kuitenkin yleensä jo edeltävää käyttökokemusta leikkausmikroskoopeista. Yli 1 500 leikkausta koostaneen katsausartikkelin perusteella kirurgi on hyvin harvoin joutunut leikkauksen aikana enää palaamaan eksoskoopista mikroskooppiin (5,4 %) (19). Oman kokemuksemme mukaan täydellinen adaptoituminen eksoskoopin käyttöön vie kokeneelta mikroneurokirurgilta noin 4–6 kuukautta eli satoja käyttötunteja.



KUVA 5. Potilaan istuvassa asennossa kirurgi leikkaa potilaan takaraivon puolelta. Mikroskooppiin (A) verrattuna eksoskoopin (B) pienempi koko ja jalkapoljinohjaus mahdollistavat vapaamman ja ergonomisemman asennon sekä työskentelytavan.

Mikäli eksoskooppi on leikkaussalihenkilöstölle vielä uusi laite, kirurgin rooli korostuu laitteiston oikeanlaisessa asettelussa leikkaussalissa (20). Ensisijaista on miettiä, miten kamerayksikön ja näytön halutaan asettuvan suhteessa potilaaseen, leikkaustapaan ja muuhun välineistöön, kuten anestesiaalaitteisiin, avustavan hoitajan pöytiin, neuronavigaattoriin ja kuvantamislaitteisiin (21). Lattialla liikuteltavat tai kattoon kiinnitetyt näytöt antavat kirurgille mahdollisuuden myös leikkauksenaikaiseen liikkumiseen tai rintamasuunnan vaihtoon. Leikkaussalihenkilöstön kokemuksen karttuesa ja laitteiston oletussijaintien hienosäädön avulla koko eksoskoopin valmisteluvaihe nopeutuu eikä poikkea vastaavasta mikroskoopin valmisteluajasta (7,21,22).

Katselu ja koulutuskäyttö

Leikkauksissa avustamisessa eksoskooppien olennainen hyöty liittyy siihen, että osallistuvat henkilöt näkevät näytöllä aina täsmälleen saman kolmiulotteisen kuvan kuin varsinainen leikkaava kirurgi, kun taas leikkausmikroskooppia käytettäessä rakenteiden aidot syvyys-suhteet välittyvät kunnolla vain kirurgille itselleen. Leikkausten seuraamisessa ja koulutuskäytössä katselijalla on mahdollisuus ymmärtää muun muassa leikkaustekniisiä ratkaisuja ja instrumenttien käsittelyn haasteita paremmin, jolloin oppitapahtuma on mukaansatempaavampi

(23,24). Eksoskoopin liikuteltavia tai kattorakenteisiin nivellettyjä varsinäyttöjä voi sijaita leikkaussalissa useampia, ja tällöin kahden tai jopa kolmen kirurgin suorittamat yhteisleikkaukset ovat mahdollisia (22,25). Leikkauksivideo voidaan tallentaa tai lähettää reaaliaikaisesti leikkaussalista suoraan esimerkiksi koulutus-tilaisuuteen.

Laboratorioharjoitteet eksoskooppiavusteisesti

Visualisointiin liittyvissä koeasetelmissä sekä anatomisen simulaatiomallin että vainajan kal-lonsisäisten rakenteiden hahmottamisessa ja tunnistamisessa eksoskoopin käyttö vertautui vähintäänkin mikroskooppiin, ja parempaa ergonomiaa kehuttiin (26,27). Tarkkaa mikroki-rurgista käden työtä mittaavissa koeasetelmissä käytetty aivovaltimo-ohitteen ompelu ekso-skooppiavusteisesti hyvin syvissäkin kohteissa oli laadullisesti mikroskoopilla tehdyn veroinen (28–30). Ylipäätään eri valmistajien hieman toisistaan eroavat eksoskoopit soveltuvat hyvin ohiteharjoitteluun, ja erot ovat usein käyttäjä-mielitymyksiin liittyviä ja edellyttävät siten lai-tekohtaista harjoittelua (3). Eksoskooppia on suotavaa kokeilla ensin laboratorio-olosuhteis-sa, jolloin käyttöliittymään ja liikuteltavuuteen voidaan tutustua rauhallisessa ja riskittömässä ympäristössä ilman aika- tai toistorajoitteita (5).

TAULUKKO. Potilassarjoja, joissa on hyödynnetty eksoskooppeja sekä selkä- että kallon sisäisessä neurokirurgiassa (1,4,5,7,10,13,20,22,31–33,35,36).

Viite	Vuosi	Toimenpiteitä (n)	Selkäkirurgiaa (n)	Kallon sisäistä kirurgiaa (n)	Sairausryhmä	Ekso-skooppi	Kritiikki (usein alkuvaiheen käyttöönottoon liittyvää)
(1)	2017	16	11	5	Sekalaista	Vitom	Syvät kohteet, vuoto häiritsevää
(20)	2019	10	10	–	Selkäkirurgiaa	ORBEYE	Oppimisnopeus, laitteiston sijoittelu
(5)	2019	8	4	4	Sekalaista	Modus V	3D:n puute (ensimmäinen Modus-versio)
(35)	2020	26	–	26	Glioblastoomia	Modus V	–
(10)	2020	14	–	14	Takakuoppa-avauksia ¹	ORBEYE	Kudoskontrasti suurella suurennoksella
(33)	2021	296	–	296	Hypofyysikirurgiaa	ORBEYE	–
(31)	2021	21	21	–	Selkäkirurgiaa	Kestrel View II	Oppimisnopeus
(32)	2022	16	4	12	Sekalaista	Aeos	Yksittäisissä tapauksissa kuvanlaatu
(21)	2022	17	17	–	Sekalaista	Aeos	Laitteiston asettelu
(36)	2022	44	–	44	Kallon sisäistä kirurgiaa	ORBEYE	Integroidun navigaation puute, avustaminen
(22)	2023	10	–	10	Epilepsiakirurgiaa	Modus V	–
(7)	2023	155	44	111	Sekalaista	Modus V	–
(4)	2023	27	–	27	Aivoaltimopullistumia	Aeos/ORBEYE	–
(13)	2023	13	–	13	Kuulohermokasvaimia	Aeos/ORBEYE	Oppimisnopeus, pieniä teknisiä seikkoja

¹Retrosigmoid approach

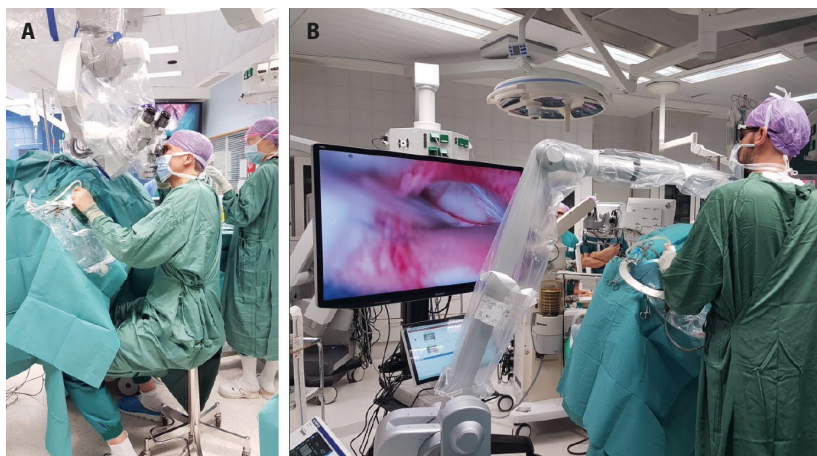
Selkäkirurgiaa ryhdikkäästi

Moderni selkäkirurgia on kehittynyt mini-invasiiviseksi, jolloin ihoavaukset ovat pieniä ja kohdennettuja sekä näkymät leikkauskohteen tunnelimaisia ja kapeita. Selkäkirurgian voi ajatella ensivaiheessa soveltuvan paremmin kokemattomallekin eksoskoopin käyttäjälle, koska kameran liikuttelutarve on tunnelinäkymissä rajatumpaa ja oppiminen tapahtuu nopeasti (20,21). Leikkausnäkömän syvyysvaikutelma ja pienten rakenteiden erotuskyky on raportoitu mikroskoopeihin nähden paremmaksi samoin kuin työergonomia (5,7,20,21,31).

Esimerkiksi yleisimmässä kaularankaleikkauksessa, jossa hermoa lähestytään edestäpäin, eksoskooppi voi sallia kirurgille paremman katselukulman ja miellyttävän asennon muun muassa juurikanavien avartamiseen erittäin viistoissa työskentelykulmissa (**KUVA 3 B**)

(31). Instrumentoidussa luudutusleikkauksessa eksoskooppi voi tarjota myös vapaaman työskentelytilansa puolesta jatkuvan leikkauskohteen havainnoinnin ilman laitteiston syrjään siirtämistä toimenpiteen eri vaiheissa (1,20,21). Lisääntynyt tila sallii myös esteettömämmän leikkauskohteen tarkastelun paljaalla silmällä (**KUVA 4 A**) (20). Selkätoimenpiteissä kahden kirurgin on luontevaa työskennellä vastakkaisilla puolilla kahden näytön avulla (20,21). Eksoskoopeilla toimittaessa kaularankaleikkaukset voivat nopeutua mikroskoopeihin verrattuna pienissä potilasaineistoissa (31).

Menestyksellistä eksoskooppiavusteista selkäkirurgiaa on raportoitu muun muassa kulumaperäisten selkäsairauksien ja vaativien luudutusleikkausten sekä selkäydinkanavan kasvaimien ja verisuoniepämuodostumien hoidossa (**TAULUKKO**) (1,5,7,19–21,31,32).



KUVA 6. Potilaan korvan taakse tehtävä takakuoppa-avaus (retrosigmoid approach). Potilas on tuettu kylkiasentoon. Leikkauksenvaihe mikroskoopilla (A) ja eksoskoopilla (B).

Vaativaa kallonsisäistä hermostokirurgiaa

Aivovaltimopullistuma- tai kallonpohjakirurgiassa syvien kohteiden saavuttamiseksi pieni luuavaus on useimmiten riittävä (niin sanottu avaimenreikäkirurgia, keyhole surgery). Pinnallisemmat kasvaimet saattavat edellyttää laajojakin avauksia. Vastaavasti näissä tilanteissa korostuvat joko kohteen valaisun, suurennoksen, rajapintojen erotuskyvyn ja syvyysvaikutelman tärkeys tai sitten eksoskoopin liikuttamisen helppous ja jouhevuus sekä toiminta äärimmäisissä kulmissa. Kuten rankakirurgiassa, myös kallonsisäisessä hermostokirurgiassa kuvanlaatua, erityisesti syvyysvaikutelmaa, ja työergonomiaa on kehitetty eksoskoopeilla toimittaessa mikroskoopin veroisiksi tai paremmiksi (1,4,5,7,10,13,19,22,32–36). Vain yksittäisissä julkaisuissa tietyt kuvanlaadulliset ominaisuudet on mielletty yhä eksoskoopeissa huonommiksi, mikä voi olla laiteriippuvaista (esimerkiksi kudskontrasti suurella suurennoksella) (10,32).

Kudosvärjäykset kasvainkirurgiassa mielletään eksoskopiassa laadullisesti mikroskoopeja kirkaammiksi (fluoresenssi), ja digitaalinen kuvankäsittely mahdollistaa ympäryskudoksen paremman hahmottamisen, jolloin kasvainkudoksen poisto voi olla suoraviivaisempaa (8,32). Eksoskoopeja mikroskooppiin vertailevia tutkimuksia kudonsvärjäyksistä tarvitaan kuitenkin lisää laitekohtaisesti.

Ergonomian kannalta vaikeissa lähestymi-

sissä, kuten takakuoppa-avauksissa (”retrosigmoid approach”), kirurgin asento voi mikroskooppia käytettäessä muodostua epämiellyttäväksi leikkaussuuntiman vuoksi, mutta eksoskooppi mahdollistaa miellyttävämmän työskentelyn (KUVA 6) (10,13). Kokemuksemme mukaan eksoskoopit soveltuvat myös muihin teknisesti äärimmäisiin leikkausasentoihin, kuten ”potilaan istuvaan asentoon” (KUVA 5). Leikkaukokemuksen kertyessä eksoskoopin monipuolinen hallinta paranee, kameran liikuttamisesta tulee sujuvampaa ja liikkeen aikainen kaksikäinen leikkaaminen voi lyhentää kallonsisäisten hermostokirurgisten toimenpiteiden kokonaiskestoa (4,13).

Klinikassamme aivovaltimopullistumien sekä akustikusneurinoomien hoidossa eksoskoooppien käyttöönotto on todettu turvalliseksi sekä laadullisesti ja ajallisesti mikroskoopeilla toimimisen veroiseksi (4,13). Suotuisia kokemuksia on raportoitu maailmalta muidenkin aivoverisuonisairauksien (kavernoomat, aivovaltimo-laskimoepämuodostumat, aivovaltimo-ohitteet) ja kasvainten (glioomat, meningeoomat, käpyrauhan kasvaimet) hoidosta tai epilepsiakirurgiasta, hermopinnoireyhtymien hoidosta sekä kitaontelon kautta tehtävästä aivolisäkekirurgiasta (TAULUKKO) (1,5,7,10,19,22,32–36).

Tulevaisuus

Modernit 3D-eksoskoopit ottavat yhä enemmän jalansijaa neurokirurgiassa, vaikka valta-

osin vielä käytetään tavanomaisia mikroskooppeja. Tuoreessa kansainvälisessä kyselytutkimuksessa alle neljäsosa (n = 21, 22 %) haastelluista verisuonineurokirurgeista oli joskus käyttänyt eksoskooppia (37). Ensikäyttäjät, niin kutsutut varhaiset omaksujat (early adopters), ovat yleensä uudesta teknologiasta kiinnostuneita, sen kanssa helposti toimeen tulevia ja siten myös avoimia uusille toimintatavoille. He myös pääsevät keskimääristä helpommin yli alun teknisistä haasteista (**TAULUKOSSA** mainittu kritiikki).

Pitkä kokemus neurokirurgiasta auttaa toisaalta teknisten leikkaustaitojen siirtämisessä eksoskoopin alle mutta edellyttää alkuun astumista epämukavuusalueelle ja poisoppimista mikroskoopeista suokappaleohjauksineen (11). Nuorempien erikoistuvien kirurgien voikin olla otollisempaa koulututtua jo alkuvaiheessa vahvemmin myös eksoskooppien käyttäjiksi.

Leikkausmikroskoopit eivät ole perusominaisuuksiltaan tai fyysiseltä kooltaan merkittävästi kehittyneet enää viime vuosikymmenen aikana. Mikroskooppien optiikan rakentaminen pienempään kokoon ja kuvanlaadun parantaminen on vaativaa. Eksoskoopit ovat tarjonneet täysin uudenlaisen lähestymistavan, ja pelkän liikuteltavuuden lisäksi mahdollisuuksia lisäkehittämiseen on yhä muun muassa kamerayksikön koon, kuvanlaadun sekä ohjelmiston ominaisuuksien ja älykkyyden saralla. Uutuudestaan huolimatta eksoskooppien hankintahinta jää yleensä selvästi leikkausmikroskooppeja halvemmaksi, jolloin taloudelliset seikat eivät muodostu esteeksi yleisesti leikkaussalitoimintaa palvelevan uuden teknologian osalta.

Klinikkamme edeltävä professori tapasi kuvailla neurokirurgiaa ”kovaksi kontaktiurheiluksi”. Voidaankin kysyä, tuovatko nykypäivän eksoskoopit lajiin myös ”elektronisen urheilun” piirteitä. Kirurgille esitettävän informaation määrä leikkausnäkyvässä lisääntyy tulevaisuudessa muun muassa lisätyn todellisuuden sovelusten kautta, ja käyttöliittymä älylaseineen voi lähestyä videopelien tai futurististen elokuvien skenaarioita (38,39). Visioissa kaikista digitaalisten katselulaitteista yhdessä kehittyvä vastavuoroinen assistentti, joka aktiivisesti myös

Ydinasiat

- » 3D-eksoskoopit ovat uusi digiajan kirurgian visualisoinnin teknologia.
- » Leikkausmikroskooppeihin verrattuna eksoskoopit tuovat neurokirurgiassa etuja kuvanlaatuun ja työergonomiaan.
- » Eksoskoopit soveltuvat laaja-alaisesti neurokirurgisten sairauksien hoitoon.
- » Todennäköisesti eksoskoopit syrjäyttävät tulevaisuudessa leikkausmikroskoopit.

analysoi kuvainformaatiota (leikkauksen vaihe, anatomiset rakenteet) ja antaa neuvoja kirurgille tai varoittaa uhkaavista vaaranpaikoista, siten jopa helpottaen kouluttavien seniorien työtä ja parantaen potilasturvallisuutta (40).

Lopuksi

Eksoskooppien käyttöönotto on suhteellisen nopean oppimisjakson jälkeen suoraviivaista. Osin subjektiiviset muuttujat, kuten hyvä kuvanlaatu ja parantunut työergonomia, on raportoitu eksoskoopin eduiksi. Kliinisissä potilas-sarjoissa leikkaustulokset vertautuvat laadullisesti ja turvallisuuden kannalta mikroskoopilla toimimiseen, mutta tutkimusta tarvitaan lisää. Jatkossa eksoskooppeja hyödynnetään yhä enemmän neurokirurgiassa ja muillakin kirurgian aloilla. ■

VILLE NURMINEN, LKT, erikoislääkäri
HUS neurokirurgia, Neurokeskus; Helsingin yliopisto

RAHUL RAJ, dosentti, erikoislääkäri
HUS neurokirurgia, Neurokeskus; Helsingin yliopisto

MARTIN LEHECKA, dosentti, osastonylilääkäri
HUS neurokirurgia, Neurokeskus; Helsingin yliopisto

SIDONNAISUUDET
Kirjoittajilla ei ole sidonnaisuuksia.

VASTUUTOIMITTAJA
Tuomas Mirtti

KIRJALLISUUTTA

- Oertel JM, Burkhardt BW. Vitom-3D for exoscopic neurosurgery: initial experience in cranial and spinal procedures. *World Neurosurg* 2017;105:153–62.
- Langer DJ, White TG, Schulder M, ym. Advances in intraoperative optics: a brief review of current exoscope platforms. *Oper Neurosurg* 2020;19(1):84–93.
- Hafez A, Haeren R, Huhtakangas J, ym. 3D exoscopes in experimental microanastomosis: a comparison of different systems. *Life* 2023;13:584.
- Rossmann T, Veldeman M, Nurminen V, ym. 3D Exoscopes are noninferior to operating microscopes in aneurysm surgery: comparative single-surgeon series of 52 consecutive cases. *World Neurosurg* 2023;170:e200–13.
- Muhammad S, Lehecka M, Niemelä M. Preliminary experience with a digital robotic exoscope in cranial and spinal surgery: a review of the Synaptive Modus V system. *Acta Neurochir (Wien)* 2019;161:2175–80.
- Abramovic A, Demetz M, Kriger A, ym. Surgeon's comfort: the ergonomics of a robotic exoscope using a head-mounted display. *Brain Spine* 2021;2:100855.
- Schupper AJ, Eskandari R, Kosnik-Infinger L, ym. A multicenter study investigating the surgeon experience with a robotic-assisted exoscope as part of the neurosurgical armamentarium. *World Neurosurg* 2023;173:e571–7.
- Della Pepa GM, Mattogno P, Menna G, ym. A Comparative analysis with exoscope and optical microscope for intraoperative visualization and surgical workflow in 5-aminolevulinic acid-guided resection of high-grade gliomas. *World Neurosurg* 2023;170:133–7.
- Lavé A, Gondar R, Demetriades AK, ym. Ergonomics and musculoskeletal disorders in neurosurgery: a systematic review. *Acta Neurochir (Wien)* 2020;162:2213–20.
- Shimizu T, Toyota S, Nakagawa K, ym. Retrosigmoid approach in the supine position using ORBEYE: a consecutive series of 14 cases. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 2020;61:55–61.
- Gabrovsky N, Petrov M, Ilkov P, ym. Subjective workload measurement of the transition from a conventional operative microscope to a robotic digital microscope. A pilot study. *Brain Spine* 2022;2:100928.
- Murakami T, Toyota S, Nakagawa K, ym. Midline suboccipital approach to a vertebral artery-posterior inferior cerebellar artery aneurysm from the rostral end of the patient using ORBEYE. *Surg Neurol Int* 2022;13:87.
- Veldeman M, Rossmann T, Huhtakangas J, ym. Three-dimensional exoscopic versus microscopic resection of vestibular schwannomas: a comparative series. *Oper Neurosurg* 2023;24:507–13.
- Haeren R, Hafez A, Lehecka M. Visualization and maneuverability features of a robotic arm three-dimensional exoscope and operating microscope for clipping an unruptured intracranial aneurysm: video comparison and technical evaluation. *Opera Neurosurg* 2022;22:28–34.
- Muscas G, Battista F, Boschi A, ym. A single-center experience with the Olympus ORBEYE 4K-3D exoscope for microsurgery of complex cranial cases: technical nuances and learning curve. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg* 2021;82:484–9.
- Layard Horsfall H, Mao Z, Koh CH, ym. Comparative learning curves of microscope versus exoscope: a preclinical randomized crossover noninferiority study. *Front Surg* 2022;9:920252.
- Datta R, Chon SH, Dratsch T, ym. Are gamers better laparoscopic surgeons? Impact of gaming skills on laparoscopic performance in "Generation Y" students. *PLoS One* 2020;15:e0232341.
- Read JCA, Bohr I. User experience while viewing stereoscopic 3D television. *Ergonomics* 2014;57:1140–53.
- Montemurro N, Scerrati A, Ricciardi L, ym. The exoscope in neurosurgery: an overview of the current literature of intraoperative use in brain and spine surgery. *J Clin Med* 2021;11:223.
- Kwan K, Schneider JR, Du V, ym. Lessons learned using a high-definition 3-dimensional exoscope for spinal surgery. *Oper Neurosurg* 2019;16:619–25.
- Motov S, Bonk MN, Krauss P, ym. Implementation of a three-dimensional (3D) robotic digital microscope (AEOS) in spinal procedures. *Sci Rep* 2022;12:22553.
- Hines K, Hughes LP, Franco D, ym. Exoscope improves visualization and extent of hippocampal resection in temporal lobectomy. *Acta Neurochir* 2023;165:259–63.
- Ricciardi L, Chaichana KL, Cardia A, ym. The exoscope in neurosurgery: an innovative "point of view": A systematic review of the technical, surgical, and educational aspects. *World Neurosurg* 2019;124:136–44.
- Calloni T, Roumy LG, Cinalli MA, ym. Exoscope as a teaching tool: a narrative review of the literature. *Front Surg* 2022;9:878293.
- Tamura R, Kuranari Y, Katayama M. A three-surgeon-six-hand operation using a 4K-3D Exoscope for neurological surgery: a case report. *Front Surg* 2022;9:866476.
- Calloni T, Antolini L, Roumy LG, ym. Exoscope and operative microscope for training in microneurosurgery: a laboratory investigation on a model of cranial approach. *Front Surg* 2023;10:1150981.
- Herlan S, Marquardt JS, Hirt B, ym. 3D Exoscope system in neurosurgery-comparison of a standard operating microscope with a new 3D exoscope in the Cadaver lab. *Oper Neurosurg* 2019;17:518–24.
- Hafez A, Elsharkawy A, Schwartz C, ym. Comparison of conventional microscopic and exoscopic experimental bypass anastomosis: a technical analysis. *World Neurosurg* 2020;135:e293–9.
- Hafez A, Haeren RHL, Dillmann J, ym. Comparison of operating microscope and exoscope in a highly challenging experimental setting. *World Neurosurg* 2021;147:e468–75.
- Zhang Z, Feng Y, Lu X, ym. Microvascular anastomosis in a challenging setting using a 4 K three-dimensional exoscope compared with a conventional microscope: an in vivo animal study. *Front Surg* 2022;9:1021098.
- Yao Y, Xiong C, Wei T, ym. Three-dimensional high-definition exoscope (Kestrel View II) in anterior cervical discectomy and fusion: a valid alternative to operative microscope-assisted surgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2021;163:3287–96.
- Keric N, Krenzlin H, Kurz E, ym. Evaluation of 3D robotic-guided exoscopic visualization in microneurosurgery. *Front Surg* 2022;8:791427.
- Rotermund R, Regelsberger J, Osterhage K, ym. 4K 3-dimensional video microscope system (orbeye) for transsphenoidal pituitary surgery. *Acta Neurochir* 2021;163:2097–106.
- Rösler J, Georgiev S, Roethe AL, ym. Clinical implementation of a 3D4K-exoscope (Orbeye) in microneurosurgery. *Neurosurg Rev* 2022;45:627–35.
- Baron RB, Lakomkin N, Schupper AJ, ym. Postoperative outcomes following glioblastoma resection using a robot-assisted digital microscope exoscope: a case series. *J Neurooncol* 2020;148:519–27.
- Pantel T, Drexler R, Götsche J, ym. Single-center experience using a 3D4K digital operating scope system for aneurysm surgery. *Oper Neurosurg* 2022;22:433–9.
- Srinivasan VM, Shlobin NA, Karahalios K, ym. Adoption of advanced microneurosurgical technologies: an international survey. *World Neurosurg* 2022;157:e473–83.
- Boaro A, Moscolo F, Feletti A, ym. Visualization, navigation, augmentation. The ever-changing perspective of the neurosurgeon. *Brain Spine* 2022;2:100926.
- Matsui C, Banda CH, Okada Y, ym. Shaping the future of microsurgery: combination of exoscope and smart glasses. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2022;75:893–939.
- Jumah F, Raju B, Nagaraj A, ym. Uncharted waters of machine and deep learning for surgical phase recognition in neurosurgery. *World Neurosurg* 2022;160:4–12.