Ian Barner-Rasmussen, Matti Hakkarainen, Emilia Siponen, Simo Mattila, Georgios Pierides ja Eero Waris

Kehittyvä kirurgia ja proteesiteknologia yläraaja-amputaatioissa

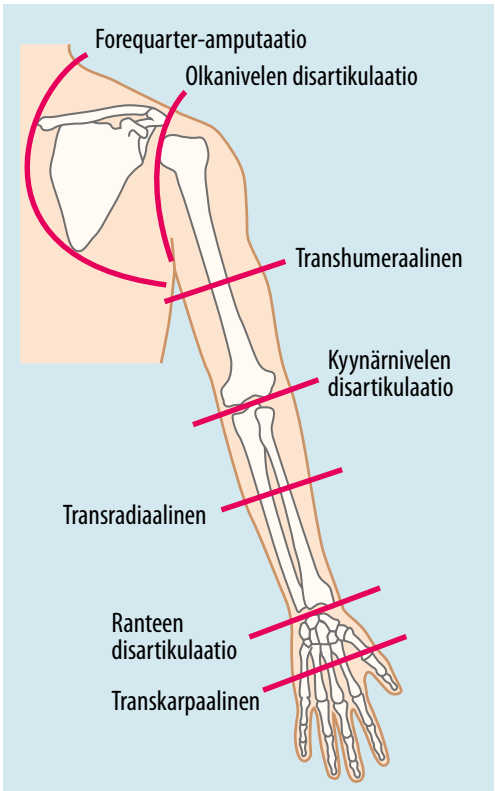
Käden menetykseen johtaa useimmiten tapaturma, jossa kudokset ovat vaurioituneet niin vaikeasti, ettei rakenteiden korjaaminen tai raajan takaisinistutus ole joko mahdollista tai oletettavan toiminnallisen lopputuloksen kannalta järkevää. Tällöin yläraajan amputaatio tulee toteuttaa huolella, jotta tynkään voidaan valmistaa yksilöllinen proteesi. Uuden teknologian myötä proteesit ovat sekä toiminnallisesti että kosmeettisesti entistä parempia. Myoelektrisiä proteeseja ohjataan amputaatiotyngän lihassignaaleilla. Lihasten kohdennettu uudelleenhermotus on toimenpide, jossa tyngän hermoja liitetään säästyneisiin lihaksiin ja jolla voidaan parantaa myoelektrisen yläraajaproteesin toiminnallisuutta sekä vähentää tyngän kipua.

Yläraajojen amputaatioista valtaosa on tapaturmaperäisiä ja kohdistuu sormiin. Ranne- ja sitä proksimaalisemman tason amputaatiot ovat harvinaisia. Esiintyvyyden arvioitiin olevan norjalaisessa väestöpohjaisessa tutkimuksessa 11,6 amputaatiota 100 000:ta henkilöä kohden (1).

Vaikka ihminen selviääkin päivittäisistä toiminnoista varsin hyvin vain yhdellä toimivalla yläraajalla (2), vaikuttaa yläraajan menetys merkittävästi toimintakykyyn, tasapainon hallintaan, kehon hahmottamiseen, sosiaaliseen elämään ja työelämään. Harvinainen molempien yläraajojen menetys johtaa dramaattiseen muutokseen potilaan omatoimisuudessa.

Yläraajan amputoitumiset

Syyt. Yläraajan amputoitumiset ovat pääosin (yli 80 %) tapaturmaperäisiä (3). Miehet (yli 90 %) ja alle 60-vuotiaat ovat alttiimpia näille tapaturmille (4). Muita syitä ovat vaikeat palo- ja paleltumavammat, infektiot, syöpäkasvaimet ja itseaiheutetut amputaatiot. Myös synnynnäiset kehityshäiriöt voivat olla yläraajan puuttumisen taustalla. Valtimonkovettumistaudin



KUVA 1. Amputaatiotasot yläraajassa. Amputaatiotyngässä tulee yleensä säilyttää maksimaalinen pituus.



KUVA 2. Kosmeettiset proteesit ovat ulkonäöltään hyvin aidon näköisiä.

pohjalta kehittyvä kudosiskemia on yläraajassa selvästi harvinaisempi kuin alaraajassa. Maailmanlaajuisesti sotavamma on yleinen syy yläraajan amputoitumiselle.

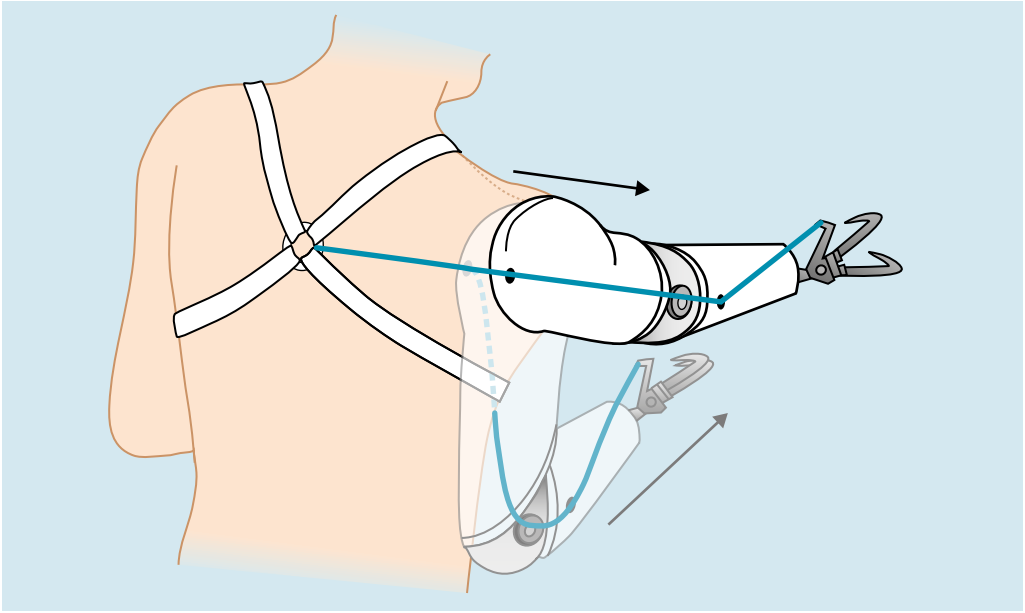
Amputaatio vai replantaatio? Yläraajan amputoiduttua tapaturmaisesti pyritään ensisijaisesti irronneen raajan takaisinistutukseen eli replantaatioon. Kyynärnivelen ja sitä distaalisemman tason takaisinistutuksen jälkeen toiminnalliset tulokset ja potilastyytyväisyys ovat parempia kuin amputaation ja protetisoinnin jälkeen (4–6). Potilaat ovat takaisinistutuksen jälkeen useimmiten hyvin tyytyväisiä (4), mihin vaikuttavat myös psykologiset tekijät ja ruumiinkuvan palautuminen. Toiminnallinen tulos on huonompi iäkkäämmillä ja proksimaalisemmissa tasoissa (4,5). Amputaatioon päädytään, mikäli replantaatio ei ole teknisesti mahdollinen, potilas ei sovellu raskaaseen leikkaukseen ja sen jälkeiseen kuntoutukseen tai oletettava toiminnallinen lopputulos proteesilla tai pelkällä amputaatiotyngällä arvioidaan muuten paremmaksi vaihtoehdoksi. Päätöksenteon tueksi ei ole laadukkaita tutkimuksia, joten päätös tehdään tapauskohtaisesti huomioiden vamman taso, laajuus, tyyppi, iskemia-aika sekä potilaan muut vammat ja potilaskohtaiset tekijät, kuten ikä, kätisyys, perussairaudet, tupakointi, ammatti ja harrastukset sekä potilaan toive.

Amputaation kirurgiset periaatteet. Yleisimmät amputaatiotasot esitellään KUVASSA 1. Amputaatiotaso valitaan niin, että tyngässä on riittävä verenkierto paranemista varten ja yläraajan syövissä kasvain on radikaalisti poistettu. Toiminnallisuuden säilyttämiseksi pyritään valitsemaan proteesia varten ihanteellinen tyngän pituus. Tyngässä tulee olla hyvä kudospeitto ja tunto. Amputaatio tehdään yleensä verityhjiössä (lukuun ottamatta iskemiatilanteita), joka helpottaa pehmytkudosten erottelua ja vähentää verenvuotoa. Ihoavauksena käytetään yleensä kalansuumaista avausta. Suuret suonet ligeerataan ja hermot katkaistaan pienessä vedossa, jotta ne vetäytyvät pehmytkudosten suojaan ja täten vähentävät kivuliaan neurooman riskiä. Lihaksia jätetään riittävästi niin, että ne saadaan käännettyä luun kärjen päälle pehmytkudospeitoksi. Luuta typistetään riittävästi ja reunoja pyöristetään, jotta sulku onnistuu kiristyksettä. Tyngän pehmytkudospeitto ei toisaalta saa jäädä liian löysäksi, koska tämä hankaloittaa proteesin sovitusta. Myoelektrisen proteesin käyttöä varten on tärkeää, että amputaatiotyngän lihakset säilyttävät supistumiskykynsä.

Komplikaatiot. Jopa 90 % yläraaja-amputaation läpikäyneistä potilaista kärsii kivusta (3). Tyngän hermojen neuroomat ovat usein paikallisen tynkäkivun syy (7). Aavesärkyä esiintyy 56–85 %:lla potilaista (3,8,9) ja ei-kivuliaita aavetuntemuksia jopa 80 %:lla (3). Aavesärkyjen ja -tuntemusten etiologia on epäselvä, mutta sekä paikallisilla tyngän tekijöillä että keskushermoston plastisilla muutoksilla vaikuttaa olevan osuus sen syntyyn (10). Lisäksi potilailla voi esiintyä amputaation jälkeen heterotooppista ossifikaatiota ja nivelkontraktuuria.

Yläraajaproteesit

Historia. Vanhin kuvaus yläraajaproteesin käyttäjästä tulee antiikin Roomasta. Varhaiset proteesit olivat staattisia tai passiivisilla nivelillä varustettuja yksinkertaisia apuvälineitä. Vuon-



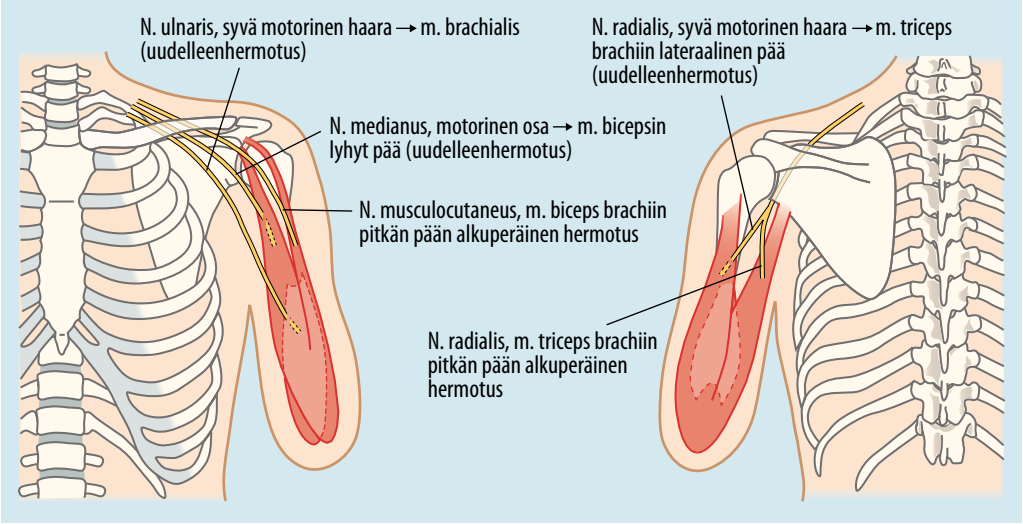
KUVA 3. Esimerkki mekaanisesta proteesista. Toimintoja ohjataan hartioiden liikkeellä, joista se välittyy valjaiden ja vaijereiden välityksellä proteesin nyrkki/koukkuosaan.

na 1818 esiteltiin ensimmäinen lihasvoimalla toimiva aktiivinen mekaaninen yläraajaproteesi. Myoelektristen proteesien kehitys alkoi vuonna 1948, kun oivallettiin, että tyngän ihon pinnasta rekisteröityjä EMG (elektromyografi) -signaaleja voidaan käyttää ohjaamaan moottoroitua proteesia. Myoelektriset proteesit olivat pitkään liian kömpelöitä kliiniseen käyttöön, mutta materiaalien, komponenttien ja prosessorien kehittyessä niiden käyttö on yleistynyt (11).

Proteesityypit. Nykyiset yläraajaproteesit jaotellaan kolmeen pääryhmään. Puhtaasti kosmeettiset proteesit muistuttavat raajaa ainoastaan ulkonäöltään (**KUVA 2**). Mekaanisissa proteeseissa ylävartalon liikkeet välittyvät valjaiden ja vaijereiden välityksellä proteesin kyynärniveleen tai nyrkki- tai koukkuosaan (**KUVA 3**). Myoelektrisiä proteeseja ohjataan amputaatiotyngän EMG-signaaleja rekisteröimällä (**KUVA 4**, **INTERNETOHEISAINEISTON VIDEO**). Mekaaniset proteesit ovat toiminnaltaan yksinkertaisia ja varmoja. Myoelektristen proteesien toiminnot ovat usein monipuolisempia, mutta korkea teknologia heijastuu hintaan ja huoltotarpeeseen. Myoelektrisen proteesin hinta on yleensä kymmeniä tuhansia euroja, ja kosmeettiseen proteesiin verrattuna monikymmenkertainen.



KUVA 4. Esimerkki myoelektrisesta proteesista. (Kuva: Tiina Rossi/Respecta Oy).



KUVA 5. Amputaatiotyngän lihaksen kohdennetun uudelleenhermotuksen periaatteet. Olkavarsitasoisissa amputaatioissa luonnollisia myoelektrisen proteesin ohjaukseen valjastettavia EMG-signaaleja on yleensä löydettävissä vain kaksi (m. biceps brachii ja m. triceps brachii). Lihaksen kohdennetussa uudelleenhermotuksessa kaksipäisen haiuslihaksen lyhyt pää (caput breve m. biceps brachii) uudelleenhermotetaan keskihermolla (n. medianus), kolmipäisen olkalihaksen lateraalinen pää (caput lateralis m. triceps brachii) värttinähermon syvällä liikehaaralla (ramus profundus n. radialis) ja olkavarsilihas (m. brachialis) kyynärhermon syvällä liikehermolla (ramus profundus n. ulnaris). Toimenpiteen seurauksena alkuperäiset kaksi EMG-signaalia saadaan lisättyä viideksi, kun kaksipäisen hauislihaksen pitkän pään ja kolmipäisen olkavarsilihaksen pitkän pään hermotus säilytetään alkuperäisinä. Tämä mahdollistaa myoelektrisen proteesin kyynärnivelen, rannenivelen ja tarttumisotteen yhtäaikaisen ja isoloidun käytön: kyynärnivelen koukistusliikkeen EMG-signaali rekisteröidään hauislihaksen pitkän pään kohdalta, kyynärnivelen ojennusliike kolmipäisen olkalihaksen pitkän pään kohdalta, käden tarttumaotteen sulkeutuminen hauislihaksen lyhyen pään kohdalta, käden tarttumaotteen avautuminen olkavarsilihaksen lateraalipään kohdalta ja rannenivelen liike olkavarsilihaksen kohdalta. Proteesin ohjaaminen on potilaalle intuitiivista, sillä esimerkiksi potilaan ajatellessa amputoituneen käden sormien koukistamista (keskihermon liiketoiminta) jännittyy keskihermon uudelleenhermottama kaksipäisen hauislihaksen lyhyt pää, josta EMG-signaali rekisteröidään proteesin tarttumisotteen sulkeutumiseen.

Kirjallisuuden mukaan 20–40 % yläraajaamputoiduista luopuu kokonaan proteesin käytöstä. Kyynärvarsitason ja sitä proksimaalisemmissa amputaatioissa osuus on jopa 60 % (3,9,12). Yleisimmät syyt käytön lopettamiselle ovat proteesin huono istuvuus, epämukavuus, liiallinen huollon ja korjaamisen tarve, riittämätön toiminnallinen hyöty ja tyngän kivut (4,13). Potilasvalinta onkin tärkeää harkittaessa potilaalle kalliimpia proteesiratkaisuja. Hankintaprosessissa käydään yleensä läpi testijakso, jossa kokeillaan erilaisia proteesivaihtoehtoja ja valitaan yksilölliseen tarvearvioon perustuen lopullinen proteesi. Myoelektrisen proteesin käyttö vaatii motivaatiota intensiiviseen harjoitteluun, tasapainoisen elämäntilanteen, hyvää kognitiota, kykyä hallita tyngän lihaksia lihassignaalien saamiseksi sekä kykyä ottaa vastuuta proteesin huollosta.

Kohdennettu lihaksen uudelleenhermotus

Kohdennettu lihaksen uudelleenhermotus (targeted muscle reinnervation, TMR) on vuonna 2007 fysiatri Todd Kuikenin ja kirurgi Gregory Dumanianin kuvaama menetelmä, jossa amputaatiotyngän säilyneitä lihaksia hermotetaan uudelleen amputoitua raajaa aiemmin hermottaneilla liikehermoilla (14). Proksimaalisten amputaatioiden (kyynärnivel-, olkavarsi- ja olkaniveltaso) ongelmana on, että myoelektrisen proteesin ohjaukseen valjastettavia EMG-signaaleja on luonnostaan löydettävissä

amputaatiotyngästä vain muutamia. Kohdennettua lihaksen uudelleenhermotusta voidaan tällöin käyttää EMG-signaalien lukumäärän lisäämiseksi. Tällä tavoin näillä potilailla kyynärnivelen, rannenivelen ja tarttumisotteen aktivointi onnistuu proteesissa yhtäaikaisesti (KUVA 5). Uudelleenhermotettujen lihasten saadessa hermoimpulssinsa proteesin toimintoja vastaavista amputoidun raajan liikehermoista, myoelektrisen proteesin käyttö tulee potilaalle intuitiivisemmaksi (15,16). Menetelmä on ollut viimeisen vuosikymmenen aikana intensiivisen tutkimuksen kohteena, ja tulokset ovat lupaavia (17).

Kuntoutus. Kohdennettua lihaksen uudelleenhermotusta seuraa aktiivinen kuntoutus. Ensimmäiset lihassupistukset ilmaantuvat uudelleenhermotettuihin lihaksiin muutaman kuukauden kuluessa. Potilas harjoittelee EMG-signaalien tunnistamista ja erottelua ensin tietokoneen ääressä, jolloin potilas voi näytöltä seurata lihassupistuksen voimakkuutta ja kestoa. Kun tynkä on parantunut ja optimaalisten signaalien alueet on tunnistettu, potilaalle valmistetaan yksilöllinen elektrodeilla varustettu proteesiholkki, ja aloitetaan toiminnalliset harjoitukset.

Tulokset. Lihaksen kohdennetun uudelleenhermotuksen jälkeen potilaat onnistuivat siirtämään palikoita laatikosta toiseen (box and blocks -testi) jopa 323 % enemmän kuin ennen leikkausta. Useamman nivelen liikettä vaativa pyykkipoikien siirtäminen (clothespin relocation -testi) onnistui puolestaan 49 % nopeammin (18). Toisessa tutkimuksessa kohdennetun lihaksen uudelleenhermotuksen jälkeen potilaat onnistuivat toistamaan luotettavasti jopa kymmenen eri yläraajan liikettä myoelektrisellä proteesilla. Tulokset ovat parhaimmillaan lähellä terveiden verrokkien tuloksia (15).

Kohdennettu lihaksen uudelleenhermotus kivun hoidossa. Kohdennetun lihaksen uudelleenhermotuksen on huomattu vähentävän tai jopa ehkäisevän kivuliaiden neuroomien syntyä (19). Menetelmän käyttö onkin tutkimuksen kohteena ja nousemassa uudeksi käyttöaiheeksi neuroomakivun hoidossa. Proteesin aktiivinen käyttö ja toiminnallisuus vähentävät amputoidun raajan aavesärkyä (20).

Ydinasiat

- Yläraajan amputaatio on rekonstruktiivinen toimenpide eikä yksinomaan raajan typistys.
- Yläraajan amputoinnissa on säästettävä kaikki hyödyllinen pituus.
- Lihaksen kohdennetulla uudelleenhermotuksella voidaan lisätä amputaatiotyngän EMG-signaaleja.
- Lihaksen kohdennettu uudelleenhermotus lisää myoelektrisen yläraajaproteesin ohjattavuutta, parantaa intuitiivista toimintaa ja ehkäisee neuroomakipua.

Rekonstruktiiviset vaihtoehdot

Amputoidun yläraajan käytettävyyttä voidaan parantaa myös ilman proteesia erilaisilla rekonstruktiivisilla menetelmillä. Kyynärvarsitason amputaatiossa voidaan värttinä- ja kyynärluun tynkiä sekä niihin kiinnittyviä lihaksia muovaamalla rakentaa yksinkertainen saksimainen tarttumistynkä (niin sanottu Krukenbergin toimenpide) (21). Kyynärvarsitynkään voidaan istuttaa myös vapaa mikrovaskulaarinen varvassiirre yksinkertaisen pinsettiotteen saamiseksi (22).

Ensimmäinen onnistunut kädensiirto tehtiin Ranskassa vuonna 1998, ja nyt kädensiirtoja on tehty maailmalla jo yli sata (23). Kaikkiaan 24 niistä on menetetty infektion, hoitomyöntyvyyteen liittyvän ongelman tai iskeemisen komplikaation vuoksi (23,24). Allogeenisia kädensiirtoja rajoittavat erityisesti hyljinnänestolääkityksen haitat (25). Suomessa kädensiirtoja ei ole tehty, mutta HUS:n kädensiirtotyöryhmällä on valmius ja luvat yläraajansiirtotoiminnan aloittamiseen (25). Vertailevassa kliinisessä tutkimuksessa motorisissa toiminnoissa ei esiintynyt eroa kädensiirto- ja proteesipotilaiden välillä kyynärpäätason alapuolisissa amputaatioissa (26), mutta kädensiirron etuja on parempi ruumiinkuvan palautuminen ja mahdollinen suojatunnon kehittyminen.

Uudet teknologiat

Yläraajaproteesin tulisi toimia normaalin yläraajan tavoin ja integroitua luonnolliseksi osaksi potilaan päivittäisiä toimia. Proteesin komponentteja ja algoritmeja kehittämällä sen liikkeistä pyritään saamaan entistä fysiologisempia. Proteesien istuvuutta on pyritty parantamaan osseointegraatiolla, jolloin proteesi kiinnitetään titaaniruuvilla ihon läpi suoraan amputaatiotyngän luuhun (27). Teknologiaan liittyy kuitenkin ihon lävistävän kohdan infektioalttius. Myös kyynärvarsitason amputaatiossa proteesin hienomotoriikkaa voidaan parantaa kohdennetulla lihaksen uudelleenhermotuksella (28). Suoraan lihakseen tai hermoon asennettavilla langattomilla elektrodeilla pyritään entistä herkemmin rekisteröimään signaaleja (29,30). Suorassa aivo-ohjauksessa anturit lukevat aivojen signaaleja, ja ne voidaan välittää proteesin toiminnoiksi (31).

Tällä hetkellä yläraajaproteeseja ohjataan näkökontrollilla tunnon puuttumisen vuoksi, mikä on yksi merkittävimmistä käyttöä rajoittavista tekijöistä. Kehittyvän teknologian avulla proteesien paineantureiden tieto voidaan välittää amputaatiotyngän iholle värinänä tai paineena (32) Kohdennetulla ihotunnon uudelleenhermotuksella (targeted sensory reinnervation) proteesi voi tuottaa intuitiivisen kosketustunnon vastaavalla mekanismilla kuin edellä kuvatussa lihasten uudelleenhermotuksessa. Tuntohermojen suorat stimulaatioteknologiat ovat kehitteillä (32).

Lopuksi

Moderneilla myoelektrisillä yläraajaproteeseilla voidaan palauttaa menetetyn yläraajan toimintoja ja helpottaa erityisesti kaksikätisyyttä vaativia tehtäviä. Potilasta hoitavien tahojen yhteistyö (kirurgit, fysiatri, fysio- ja toimintaterapeutit, apuvälineteknikot) ja elinikäinen potilaan seuranta ovat yläraajaproteesipotilaiden hoidon kulmakiviä. Myoelektrisen proteesin hyödyntäminen vaatii potilaalta motivaatiota, kykyä omaksua proteesin ominaisuuksia ja realistiset odotukset toiminnallisuudesta. Yläraaja-amputaatiopotilaita on melko vähän, proteesit ovat kalliita, ja hoito vaatii erityisosaamista. Myoelektristen proteesien arviointi ja hoito tuleekin keskittää yliopistollisiin sairaaloihin. HUS:ssa toimii vaativaan yläraajaprotetisaatioon ja kohdennettuun lihaksen uudelleenhermotukseen keskittynyt työryhmä. Suomen ensimmäinen kohdennettu lihaksen uudelleenhermotus tehtiin elokuussa 2018, ja potilaan myoelektriseen protetisointiin päästäneen alkuvuodesta 2019. ■

IAN BARNER-RASMUSSEN, LT, plastiikkakirurgi
Hus Tukielin- ja plastiikkakirurgia

MATTI HAKKARAINEN, LL,
käsikirurgiaan erikoistuva lääkäri
Hus Tukielin- ja plastiikkakirurgia

EMILIA SIPONEN, FT, apuvälineteknikko
Hus Sisätaudit ja kuntoutus, Hus Apuvälinekeskus

SIMO MATTILA, LL, käsikirurgi
GEORGIOS PIERIDES, LT, käsikirurgi
EERO WARIS, dosentti, käsikirurgi
Hus Tukielin- ja plastiikkakirurgia

SIDONNAISUUDET
Ian Barner-Rasmussen: Ei sidonnaisuuksia
Matti Hakkarainen: Ei sidonnaisuuksia
Emilia Siponen: Ei sidonnaisuuksia
Simo Mattila: Luento-/asiantuntijapalkkio (Biomet)
Georgios Pierides: Luento-/asiantuntijapalkkio (Stryker)
Eero Waris: Luento-/asiantuntijapalkkio (Pfizer, Depuy-Synthes, Summed Finland Oy), korvaukset koulutus- ja kongressikuluista (AxoGen)

VASTUUTOIMITTAJA
Ville Sallinen

KIRJALLISUUTTA

1. Østlie K, Skjeldal OH, Garfelt B, ym. Adult acquired major upper limb amputation in Norway: prevalence, demographic features and amputation specific features. A population-based survey. Disabil Rehabil 2011;33:1636–49.
2. Bhaskaranand K, Bhat AK, Acharya KN. Prosthetic rehabilitation in traumatic upper limb amputees (an Indian perspective). Arch Orthop Trauma Surg 2003;123: 363–6.
3. Hanley MA, Ehde DM, Jensen M, ym. Chronic pain associated with upper-limb loss. Am J Phys Med Rehabil 2009;88:742–51.
4. Otto I, Kon M, Schuurman A, ym. Replantation versus prosthetic fitting in traumatic arm amputations: a systematic review. PLoS One 2015;10:e0137729.
5. Graham B, Adkins P, Tsai TM, ym. Major replantation versus revision amputation and prosthetic fitting in the upper extremity: a late functional outcomes study. J Hand Surg Am 1998;23:783–91.
6. Pet M, Morrison S, Mack J, ym. Comparison of patient-reported outcomes after traumatic upper extremity amputation: replantation versus prosthetic rehabilitation. Injury 2016;47:2783–8.
7. Soroush M, Modirian E, Soroush M, ym. Neuroma in bilateral upper limb amputation. Orthopedics 2008;31. pii: orthosupersite.com/view.asp?rID=32929.
8. Pinzur M, Angelats J, Light T, ym. Functional outcome following traumatic upper limb amputation and prosthetic limb fitting. J Hand Surg Am 1994;19:836–9.
9. Dudkiewicz I, Gabrielov R, Seiv-Ner I, ym. Evaluation of prosthetic usage in upper limb amputees. Disabil Rehabil 2004;26: 60–3.
10. Kuffler DP. Origins of phantom limb pain. Mol Neurobiol 2018;55:60–9.
11. Zuo KJ, Olson JL. The evolution of functional hand replacement: from iron prostheses to hand transplantation. Plast Surg (Oakv) 2014;22:44–51.
12. Østlie K, Lesjø IM, Franklin RJ, ym. Prosthesis rejection in acquired major upper-limb amputees: a population-based survey. Disabil Rehabil Assist Technol 2012;7: 294–303.
13. Biddiss EA, Chau TT. Upper limb prosthesis use and abandonment: a survey of the last 25 years. Prosthet Orthot Int 2007;31:236–57.
14. Kuiken TA, Miller LA, Lipschutz RD, ym. Targeted reinnervation for enhanced prosthetic arm function in a woman with a proximal amputation: a case study. Lancet 2007;369:371–80.
15. Kuiken TA, Li G, Lock BA, ym. Targeted muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artifcial arms. JAMA 2009;301:619–28.
16. Gart MS, Souza JM, Dumanian GA. Targeted muscle reinnervation in the upper extremity amputee: a technical roadmap. J Hand Surg Am 2015;40:1877–88.
17. Cheesborough JE, Smith LH, Kuiken TA, ym. Targeted muscle reinnervation and advanced prosthetic arms. Semin Plast Surg 2015;29:62–72.
18. Miller LA, Stubblefield KA, Lipschutz RD, ym. Surgical and functional outcomes of targeted muscle reinnervation. Kirjassa: Kuiken TA, Schultz Feuser AE, Barlow AK, toim. Targeted muscle reinnervation: a neural interface for artificial limbs. Boca Raton: CRC Press 2013, s. 149–64.
19. Souza JM, Cheesborough JE, Ko JH, ym. Targeted muscle reinnervation: a novel approach to postamputation neuroma pain. Clin Orthop Relat Res 2014;472: 2984–90.
20. Lotze M, Grodd W, Birbaumer N, ym. Does use of a myoelectric prosthesis prevent cortical reorganization and phantom limb pain? Nat Neurosci 1999;6:501–2.
21. Swanson AB, Swanson GD. The Krukenberg procedure in the juvenile amputee. Clin Orthop Relat Res 1980;148:55–61.
22. Vilkki SK, Kotkansalo T. Present technique and long-term results of toe-to-antebrachial stump transplantation. J Plast Reconstr Aesthet Surg 2007;60:835–48.
23. Shores JT, Brandacher G, Lee WP. Hand and upper extremity transplantation: an update of outcomes in the worldwide experience. Plast Reconstr Surg 2015;135: 351e-60e.
24. Hautz T, Engelhardt TO, Weissenbacher A, ym. World experience after more than a decade of clinical hand transplantation: update on the Innsbruck program. Hand Clin 2011;27:423–31.
25. Lassus P, Sommarhem A. Kehonosasiirrot – yksi tehty, lisää tulossa. Duodecim 2017; 133:2429–32.
26. Salminger S, Sturma A, Roche AD, ym. Functional and psychosocial outcomes of hand transplantation compared with prosthetic fitting in below-elbow amputees: a multicenter cohort study. PLoS One 2016;11:e0162507.
27. Tsikandylakis G, Berlin Ö, Brånemark R. Implant survival, adverse events, and bone remodeling of osseointegrated percutaneous implants for transhumeral amputees. Clin Orthop Relat Res 2014;472: 2947–56.
28. Morgan EN, Kyle Potter B, Souza JM, ym. Targeted muscle reinnervation for transradial amputation: description of operative technique. Tech Hand Up Extrem Surg 2016;20:166–71.
29. Pasquina PF, Evangelista M, Carvalho AJ, ym. First-in-man demonstration of a fully implanted myoelectric sensors system to control an advanced electromechanical prosthetic hand. J Neurosci Methods 2014;244:85–93.
30. Urbanchek MG, Kung TA, Frost CM, ym. Development of a regenerative peripheral nerve interface for control of a neuroprosthetic limb. Biomed Res Int 2016. DOI: 10.1155/2016/5726730.
31. Collinger JL, Wodlinger B, Downey JE, ym. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. Lancet 2013;381:557–64.
32. Zlotolow DA, Kozin SH. Advances in upper extremity prosthetics. Hand Clin 2012;28: 587–93.

SUMMARY

Progressive surgery and prosthetic technology in upper limb amputations

The loss of an upper extremity usually results from an accident where the tissues are so severely damaged that reparation of the structures or replantation of the limb is either not possible or not reasonable in regard of the assumed final outcome. In this case, upper limb amputation should be carried out carefully so that a unique prosthesis can be constructed on the stump. With the new technology, the prostheses are both functionally and cosmetically better. Myoelectric prostheses are controlled by muscle signals of the amputation stump. Targeted muscle reinnervation is a procedure in which nerves of the stump are reconnected to the residual muscles, whereby it is possible to improve the functionality of the myoelectric upper limb prosthesis and reduce pain in the stump.