

# **Aivokäyttöliittymät**

Susanna Kallonen

Pro gradu -tutkielma  
Helsinki 14.01.2013  
HELSINGIN YLIOPISTO  
Tietojenkäsittelytieteen laitos

HELSINGIN YLIOPISTO - HELSINGFORS UNIVERSITET – UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty/Section		Laitos Institution Department
Matemaattis-luonnontieteellinen		Tietojenkäsittelytieteen laitos
Tekijä Författare Author		
Susanna Kallonen		
Työn nimi Arbetets titel Title		
Aivokäyttöliittymät - eläinkokeista ihmissovelluksiin		
Oppiaine Läroämne Subject		
Tietojenkäsittelytiede		
Työn laji Arbetets art Level	Aika Datum Month and year	Sivumäärä Sidoantal Number of pages
Pro gradu -tutkielma	14.01.2013	90 sivua
Tiivistelmä Referat Abstract		
<p>Aivokäyttöliittymätutkimus on nuori, poikkitieteellinen tutkimusala, jonka pyrkimyksenä on kehittää ajatuksen voimalla toimivia käyttöliittymiä lääketieteellisistä häiriöistä kärsiville apu- ja kuntoutusvälineiksi sekä terveille ihmisille viihde- ja hyötykäyttöön. Aivokäyttöliittymät mahdollistavat ihmisen aivojen ja tietokoneen välille aivan uudenlaisen, suoran viestinvälitysyhteyden, joka ei ole riippuvainen ääreishermostosta ja lihaksista. Tässä tutkielmassa kartoitetaan aivokäyttöliittymien aihealueesta tehtyä tutkimusta sekä perehdytään aivokäyttöliittymien sovellusalueisiin ja toteutusperiaatteisiin.</p> <p>Aivokäyttöliittymillä pystytään jo nykyään parantamaan vaikeasti liikuntakyvyttömien ihmisten elämänlaatua tarjoamalla heille tavan kommunikoida ympäristönsä kanssa. Aivokäyttöliittymän avulla he pystyvät kirjoittamaan virtuaalisella tietokoneen näppäimistöllä pelkästään ajatuksen voimalla. Tekniikan hyödyntämistä raajaproteesien liikuttamiseen, pyörätuolin ohjaamiseen, epilepsian oireiden lievittämiseen, tietokonepelien pelaamiseen ja lukuisiin muihin käytännön sovelluksiin tutkitaan parhaillaan.</p> <p>Aivokäyttöliittymien toiminnan perustana voi olla invasiivinen mittaustekniikka, jossa aivojen toimintaa mitataan kallon sisältä, tai ei-invasiivinen mittaustekniikka, jossa mittausta tehdään päänahan ulkopuolelta. Tutkielmassa selviää, että sekä invasiivisella että ei-invasiivisella tekniikalla pystytään toteuttamaan toimivia aivokäyttöliittymiä. Invasiiviset menetelmät soveltuvat parhaiten sovelluksiin, joiden toiminta vaatii hyvää signaalin tarkkuutta ja joiden kohderyhmänä ovat sairast tai vammautuneet henkilöt. Ei-invasiiviset menetelmät sopivat sovelluksiin, joissa pienempi mittaustarkkuus riittää.</p> <p>Tutkielmassa todetaan, että aivokäyttöliittymät soveltuvat sekä terveille ihmisille että erilaisista lääketieteellisistä häiriöistä kärsiville. Lisäksi otetaan kantaa siihen, minkälaisille käyttäjäryhmille aivokäyttöliittymäsovelluksia kannattaa kehittää perustaen käsitys esitellyyn tutkimustietoon. Tätä tulosta verrataan haastatteluun, jossa on kartoitettu aivokäyttöliittymien kohderyhmään kuuluvan henkilön suhtautumista aivokäyttöliittymiin.</p>		
ACM Computing Classification System (CCS):		
C.3 [Special-Purpose and Application-Based Systems],		
G.4 [Mathematical Software],		
H.5.2 [User Interfaces],		
I.2.6 [Learning],		
I.5 [Pattern Recognition],		
J.3 [Life and Medical Sciences],		
J.4 [Social and Behavioral Sciences],		
J.7 [Computers in Other Systems]		
Avainsanat – Nyckelord Keywords		
aivokäyttöliittymä, kuntoutustekniikka, avustava käyttöliittymäteknologia		
Säilytyspaikka Förvaringställe Where deposited		
Muita tietoja Övriga uppgifter Additional information		

# Sisältö

1	Johdanto .....	1
2	Aivokäyttöliittymien sovellusalueet .....	5
2.1	Lääketieteelliset sovellukset.....	5
2.2	Hyötysovellukset.....	26
2.3	Viihdesovellukset.....	29
3	Aivojen rakenteesta.....	36
3.1	Hermosolun rakenne ja hermoimpulssin kulku.....	36
3.2	Aivokuoren rakenne ja erikoistuneisuus .....	36
3.3	Hermosolujen yhteistyön periaatteet .....	36
4	Aivokäyttöliittymien toteutusperiaatteet.....	37
4.1	Erilaiset aivosignaalityypit.....	37
4.2	Aivotoiminnan mittaaminen.....	37
4.3	Mittaustulosten käsittely ja tulkinta .....	37
4.4	Käyttäjän ja koneen rooli aivokäyttöliittymien toiminnassa.....	38
4.5	Hybridiaivokäyttöliittymät .....	38
5	Aivokäyttöliittymien kohderyhmät .....	38
5.1	Potentiaaliset kohderyhmät .....	38
5.2	Eriasteisesti vammautuneet henkilöt käyttäjinä .....	38
5.3	Terveet ihmiset käyttäjinä .....	38
5.4	Aivokäyttöliittymien sopivuus eri käyttäjäryhmille.....	38
6	ALS-potilaan haastattelu.....	38
6.1	Haastattelun tavoite .....	38
6.2	Haastattelun toteutus .....	38
6.3	Haastatteluaineiston sisältöanalyysi .....	38
6.4	Tulosten merkitys ja jatkotutkimuskohteet .....	39
7	Yhteenveto .....	39
	Lähteet.....	42

## 1 Johdanto

Perinteiset tietokoneiden ja muiden laitteiden käyttöliittymät ovat sellaisia, että niiden hallitseminen edellyttää erilaisia kehon fyysisiä toimintoja, kuten käden ja sormen liikkuttamista. Aivokäyttöliittymällä tarkoitetaan käyttöliittymää, jota hallitaan fyysisten liikkeiden sijaan ajatuksen voimalla [Mil03]. Käyttäjän tietoisten ajatusten aiheuttama aivokuoren sähköinen aktiviteetti mitataan esimerkiksi EEG (electroencephalogram, aivosähkökäyrä) -päähineellä ja mittauksesta saadusta datasta suodatetaan pois ylimääräinen informaatio eli niin sanottu taustakohina. Suodattamisen jälkeen jäljelle jäävästä datasta muokataan matemaattisten mallien avulla tietokoneen "ymmärtämiä" käskyjä. Nämä käskyt voidaan taas valjastaa esimerkiksi ohjaamaan tietokoneen näyttöä tai konetta [Ike11].

Vaikka jo 1970-luvulta asti on elänyt ajatus käyttöliittymistä, jotka soveltuisivat erilaisille erityisryhmille, kuten liikuntarajoitteisille ihmisille, vasta viime vuosina eri tieteenalojen ja muun muassa aivojen kuvantamismenetelmien edistysten myötä on saatu toteutettua ensimmäisiä sovelluksia pelkästään ajattelun voimalla toimivista käyttöliittymistä. Aivokäyttöliittymiä on suunniteltu ja toteutettu esimerkiksi liikuntakyvyttömille tarkoitettuihin tietokoneohjelmiin, jotka mahdollistavat ajatuksen voimalla kirjoittamisen. Muita sovelluskohteita ovat muun muassa pyörätuolin liikuttamiseen ja tietokonepelien ohjailuun tarkoitetut aivokäyttöliittymät. Aivokäyttöliittymien kehittäminen on melko nuori tutkimusala, jonka käytännön sovellukset ovat vielä pääasiassa prototyyppeasteella. Aivokäyttöliittymätutkimus on luonteeltaan monitieteistä ja se sivuaa muun muassa tietojenkäsittelytiedettä, neurologiaa ja psykologiaa.

Aivokäyttöliittymätutkimuksen alkuaikoina asetettiin aivokäyttöliittymille määritelmä, joka pätee yhä tänä päivänä. Määritelmä sulkee ulkopuolelle kaikki sellaiset avustavat kommunikointiteknologiat, jotka tukeutuvat jonkinasteiseen lihaskontrolliin [Gen09]: "Aivokäyttöliittymä on kommunikointisysteemi, joka ei ole riippuvainen aivojen normaaleista - ääreishermostosta ja lihaksista muodostuvista - tulostuskanavista. [Wol99]".

Toisessa määritelmässä aivokäyttöliittymät määritellään sen kautta, että niiden tulee täyttää seuraavat neljä kriteeriä [Pfu10]: 1) Laitteen toiminnan on perustuttava signaaleihin, jotka mitataan suoraan aivoista. 2) On oltava ainakin yksi mitattava aivosignaali, jota käyttäjä voi tietoisesti muuntaa saavuttaakseen jonkin haluamansa toiminnon. 3) Signaalin prosessoinnin on oltava reaaliaikaista. 4) Järjestelmän tulee antaa käyttäjälle palautetta.

Yllä olevat määritelmät eivät ole toisensa poissulkevia vaan jälkimmäinen, uudempi määritelmä, täydentää vanhempaa määritelmää. Jälkimmäinen määritelmä ottaa kantaa aivokäyttöliittymän toteutukseen ja arkkitehtuuriin, koska siinä mainitaan käyttäjälle annettava palaute ja reaaliaikaisuus. Alkuperäinen määritelmä on tässä mielessä yleispätevämpi.

Ihmisen aivotoiminnan ja tietokoneen väliseen suoraan kommunikointikanavaan tähtäävän tutkimuksen alkujuuret ovat Vidalin 1970-luvulla tekemässä työssä [Gen09]. Tuohon aikaan oli jo tutkimusten avulla selvitetty, että ihmisen aivosähkökäyrästä pystytään tulkitsemaan hänen ajattelemiaan asioita [Vid73]. Perustaen oman tutkimuksensa tähän tietoon, Vidal kollegoineen teki aivokäyttöliittymätutkimuksen pioneerityötä esittelemällä ensimmäisen aivokäyttöliittymäsysteemin toteutusarkkitehtuurin, jolla pystyttäisiin mittaamaan ihmisen aivosignaaleja, tulkitsemaan niitä ja suorittamaan haluttuja toimintoja tulkitun signaalin perusteella. Malli sisälsi muun muassa aivosähkökäyrän mittauslaitteen, useita tietokoneita mitatun datan prosessointiin, monitoreita ja järjestelmän kontrollilaitteita. Vidal muun muassa visioi, että tietokoneen ja aivojen välistä suoraa yhteyttä voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää proteesien tai avaruusalusten ohjaamiseen.

Myös neurofysiologian tutkimustulokset, joita Fetz kollegoineen saivat aikaan nelisenkymmentä vuotta sitten, ovat osaltaan olleet perustana aivokäyttöliittymätutkimuksen etenemiselle [Mor10]. Fetz muun muassa osoitti reesusapinoilla tekemissään kokeissa, että kun apinoille annetaan ruokapalkinto aina tiettyjen yksittäisten aivojen hermosolujen aktivoituessa, apinat oppivat aktivoimaan kyseiset hermosolut itse tahdonalaisesti kun ruokapalkintojen antamista toistetaan tarpeeksi usein [Fet69]. Fetz

onnistui siis osoittamaan, että reesusapinat pystytään väline-ehdollistumisen avulla opettamaan hallitsemaan yksittäisten hermosolujen toimintaa aivoissaan. Väline-ehdollistuminen tarkoittaa sitä, että ihminen tai eläin oppii toimintansa seurauksia tarkkailemalla [NiL09]. Jos tiettyä käyttäytymistä palkitaan, sen esiintymisen todennäköisyys kasvaa. Suuri osa nykyisistä aivokäyttöliittymäsovelluksista perustuu tälle väline-ehdollistumisen periaatteelle, jossa eläin tai ihminen oppii harjoittelemalla ja positiivista palautetta saamalla aktivoimaan tahdonalaisesti aivojensa määrättyjä osia niin, että pystyy tuottamaan aivoillaan sellaisia signaaleja, joilla aivokäyttöliittymäsovelluksen ohjaus onnistuu.

Tapaturman tai sairauden aiheuttama liikuntakyvyn menetys lienee yksi ikävimmistä asioista, joita ihminen voi kohdata. Yhtenä keskeisenä motiivina aivokäyttöliittymien kehittämiseksi on liikuntarajoitteisten ihmisten elämänlaadun parantaminen ja riippumattomuuden lisääminen. Liikuntakyvyttömyydestä kärsivä, mutta kognitiivisilta kyvyiltään vahingoittumaton henkilö voi pahimmillaan olla myös puhekyvytön ja siten vailla keinoa kommunikoida ympäristönsä kanssa. Niin sanotut locked-in -potilaat ovat täysin liikuntakyvyttömiä ja pystyvät kommunikoimaan ainoastaan silmien liikkeillä ja silmäluomia räpsyttämällä [Ken00]. Maailmassa tällaisia ihmisiä on arviolta 500 000 [MoK00]. Kognitiivisilta toiminnoiltaan he ovat vahingoittumattomia ja omaavat samanlaisen tarpeen kommunikointiin kuin kuka tahansa liikuntakykyinen ihminen. Kommunikoinnin mahdottomuus eristää heidät yhteiskunnasta ja aiheuttaa heissä turhautumista. Tässä on jo riittävä motiivi erilaisten avustavien aivokäyttöliittymäteknologioiden kehittämiseksi.

Aivokäyttöliittymien toteutus voi perustua kahteen toisistaan eroavaan aivotoiminnan mittausmenetelmään. Invasiivinen menetelmä tarkoittaa elimistön sisäelimiin kajoavaa menetelmää eli aivokäyttöliittymien tapauksessa sitä, että aivojen toimintaa mitataan kallon sisään asetettavilla elektrodeilla. Ei-invasiivinen menetelmä taas tarkoittaa sellaista menetelmää, jossa ei kajota elimistön sisäosiin eli aivokäyttöliittymien kyseessä ollessa menetelmää, jolla aivojen sähköistä toimintaa mitataan kallon ulkopuolelta päänahan päälle asetettavien elektrodien avulla.

Tutkielman yhtenä painopisteenä on kuvata invasiivisten ja ei-invasiivisten aivokäyttöliittymien lupaavuutta niiden potentiaalisten käytännön sovellusten kautta. Lisäksi tutkielmassa keskitytään tarkastelemaan erityyppisten aivokäyttöliittymien ominaisuuksia ja soveltuvuutta eri kohderyhmille. Näihin kahteen näkökulmaan liittyvät seuraavassa kuvatut tutkimuskysymykset ja -hypoteesit.

Tutkimuskysymyksiä on kolme, joista ensimmäisessä selvitetään, ovatko invasiiviset aivosignaalien mittausmenetelmät lupaavampia kuin ei-invasiiviset menetelmät aivokäyttöliittymäsovellusten kehittämisen kannalta. Invasiivisuus vs. ei-invasiivisuus on yksi yleisimmin käytetyistä jaotteluista erilaisten aivokäyttöliittymien luokittelussa ja kiinnostavaa on selvittää, kumpi lähtökohta tällä hetkellä näyttää lupaavammalta ja onko tässä eroa eri käyttäjäryhmille suunnatuissa aivokäyttöliittymäsovelluksissa. Kummallakin tekniikalla on omat hyvät ja huonot puolensa liittyen muun muassa aivotuiminnan mittauksen tarkkuuteen ja turvallisuuteen. Tutkielmassa hypoteesina on se, että invasiiviset menetelmät mahdollistavat lupaavimmat käytännön sovellukset aivokäyttöliittymille. Hypoteesi perustuu kirjoittajan, aiemman tutkimustiedon valossa, muodostamaan käsitykseen siitä, että invasiiviset menetelmät ovat mittaustarkkuudeltaan parempia ja mahdollistavat siten myös toimintavarmuudeltaan parempien ja käytännöllisempien aivokäyttöliittymäsovellusten kehittämisen.

Toisessa tutkimuskysymyksessä tarkastellaan, millaisille käyttäjäryhmille aivokäyttöliittymät soveltuvat ja kolmannessa selvitetään, kenelle aivokäyttöliittymiä kannattaa kehittää. Mahdollisia kohderyhmiä ovat terveet ja eriasteisesti vammautuneet ja jopa täysin halvaantuneet henkilöt. Edellä mainittu invasiivisuus - ei-invasiivisuus -jaottelu liittyy myös näihin jälkimmäisiin kysymyksiin sitä kautta, että invasiivisia laitteita tuskin terveille ihmisille tullaan koskaan asentamaan. Toisaalta, jos aivokäyttöliittymäsovelluksia haluttaisiin kehittää ns. ”suurille ihmismassoille”, tämä edellyttäisi luultavasti käytännön sovellusten ei-invasiivisuutta. Ensimmäistä tutkimushypoteesia tukien hypoteesi toiseen ja kolmanteen tutkimuskysymykseen on, että aivokäyttöliittymät kyllä soveltuvat sekä terveille että ei-terveille, mutta lupaavimmat sovellusalueet ovat sellaisia, joiden kohderyhmänä ovat jonkin vakavan aisti- tai liikevamman omaavat henkilöt, koska kyseinen kohderyhmä on ainoa, jolle invasiivisia aivokäyttöliittymiä voidaan ajatella. Tutkielmassa näkökulmaa ei kuitenkaan rajata pelkästään

tähän kohderyhmään.

Tämän tutkielman avulla lukija pystyy muodostamaan kuvan aivokäyttöliittymien ajankohtaisista tutkimussuunnista, haasteista ja tuloksista. Käsittelyn ulkopuolelle jätetään aivokäyttöliittymien toteutukseen liittyvien matemaattisten mallien ja erilaisten aivosignaalityyppien syvälinen tarkastelu.

Tutkielmassa selvitetään ensin luvussa 2, mitä eri sovellusalueita ovat aivokäyttöliittymillä on. Luvussa 3 annetaan lukijalle lyhyt perehdytys aivojen niihin ominaisuuksiin, jotka ovat oleellisia aivokäyttöliittymien toiminnan ymmärtämiseksi. Sen jälkeen luvussa 4 kartoitetaan periaatteita ja tekniikoita, joilla aivokäyttöliittymiä toteutetaan sekä käsitellään niihin liittyviä, toteutusta vaikeuttavia, ongelmia. Tämän lisäksi etsitään vastausta edellä asetettuun ensimmäiseen tutkimuskysymykseen liittyen invasiivisiin ja ei-invasiivisiin mittausten menetelmiin. Luvussa 5 erotellaan aivokäyttöliittymien erilaisia käyttäjäryhmiä ja pohditaan eri sovellusalueiden sopivuutta erilaisille käyttäjille sekä pyritään vastaamaan toiseen ja kolmanteen tutkimuskysymykseen. Lopuksi luvussa 6 kuvataan tulokset haastattelusta, jossa selvitettiin aivokäyttöliittymien kohderyhmään kuuluvan henkilön näkemyksiä aivokäyttöliittymistä ja verrataan tuloksia esiteltyyn teoreettiseen viitekehukseen.

## **2 Aivokäyttöliittymien sovellusalueet**

Tässä luvussa kuvataan, mihin eri sovellusalueisiin aivokäyttöliittymätutkimuksen tuloksia on hyödynnetty ja mihin niitä voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää. Eri sovellusalueiden lähtökohdat ja tavoitteet ovat erilaiset ja niissä painotetaan erilaisia aivokäyttöliittymiltä vaadittuja ominaisuuksia. Sovellusalueet on tässä jaettu lääketieteellisiin sovelluksiin, hyötysovelluksiin ja viihdekäyttöön tarkoitettuihin sovelluksiin.

### ***2.1 Lääketieteelliset sovellukset***

Aivokäyttöliittymiä hyödyntävät lääketieteelliset sovellukset voivat parantaa monien eriasteisista liikuntarajoitteista tai vammoista kärsivien ihmisten elämänlaatua anta-



malla heille väylän ilmaista itseään sekä tehden heistä vähemmän riippuvaisia muista ihmisistä. Tällaisia sovelluksia ovat muun muassa aivokäyttöliittymät, jotka mahdollistavat täysin liikuntakyvyttömiä henkilöiden kommunikoinnin ympäristönsä kanssa ja sovellukset, joilla voidaan helpottaa fyysisesti vammautuneiden henkilöiden liikumista tai vuorovaikutusta ympäristönsä kanssa. Aivokäyttöliittymien lääketieteelliset sovellusalueet ovat kirjallisuuden perusteella toistaiseksi eniten tutkittuja ja koestettuja.

### **Aivokäyttöliittymät kommunikoinnin mahdollistajina**

On olemassa sairauksia ja vammoja, jotka johtavat motorisen kontrollikyvyn puutteeseen. Tällaisia ovat esimerkiksi etenevään liikehermosolujen rappeutumiseen johtava amyotrofinen lateraaliskleroosi (ALS), aivoinfarktien ja selkäydinvammojen vaikeimmat muodot sekä vakava-asteiset CP-vammat (cerebral palsy) [LeN06]. Näiden sairauksien vaikeimmat muodot aiheuttavat sen, että henkilö on kaikissa arkipäivän toiminnoissaan riippuvainen muista ihmisistä ja täysin liikuntakyvytön. Esimerkiksi ALS-taudissa tahdonalaisia lihaksia ohjaavat liikehermosolut tuhoutuvat vähitellen, mikä johtaa vaikeaan invalidisoitumiseen kun tahdonalaisten lihasten liikkeiden, nielämisen ja puheen tuottamisen kyky menetetään [HUS07]. Sairaus on etenevä ja johtaa lopulta kuolemaan [Li11].

Aivokäyttöliittymäsovellukset antavat erittäin vaikeasti vammautuneille ihmisille mahdollisuuden kommunikoida ympäristönsä kanssa ilman tarvetta vartalon liikkeiden käyttöön, mikä on tärkeää henkilöille, jotka kärsivät täydellisestä tai lähes täydellisestä tahdonalaisten liikkeiden kontrollikyvyn puutteesta [PNC11]. Aivokäyttöliittymän avulla liikuntakyvytön käyttäjä voi esimerkiksi liikuttaa tietokoneen näytöllä näkyvää osoitinta, tuottaa tekstiä tietokoneen ruudulle [Ken00] tai selata Internetiä pelkästään ajattelemalla [Kar06]. Tavoitteena tällaisissa käyttöliittymissä on helpottaa sellaisten ihmisten kommunikointia ja osallistumista yhteiskuntaan, jotka eivät siihen muuten kykene.

Eräässä vuonna 2000 raportoidussa tutkimuksessa toteutettiin virtuaalinen näppäimistö, jonka avulla käyttäjä voi kirjoittaa siirtämällä kursoria ajatuksen voimalla haluamansa kirjaimen kohdalle tietokoneen näytöllä [Ken00]. Tutkimuksessa oli mukana

kolme liikuntakyvyttöä koehenkilöä, joiden aivokuorelle asennettiin elektrodi-implantteja aivojen aktiviteetin mittaamista varten (invasiivinen mittausmenetelmä). Koehenkilöistä edistynein, JR, ylsi parhaimmillaan kolmen kirjaimen kirjoittamiseen minuutissa. Tutkimuksen alussa hän joutui käyttämään apunaan tiettyjä fyysisiä liikkeitä, kuten kulmakarvojen nostamista ja kielen liikuttamista, saadakseen aikaan sellaista aivokuoren aktiviteettia, jolla kursori liikkui ruudulla. Kuitenkin viiden kuukauden harjoittelujakson jälkeen JR oppi liikuttamaan kursoria pelkästään ajattelemalla kursorin liikettä, eikä mitään fyysisiä kehon liikkeitä tai edes niiden ajattelua enää tarvittu. Tutkimus osoittaa sen, että ihmisen on mahdollista oppia hallitsemaan tiettyjä aivoimpulsseja säännöllisen harjoittelun avulla ja saada aikaan tilanne, jossa tietty aivokuoren alue erikoistuu kursorin liikuttamiseen.

Kuvatun oppimisen mahdollistaa sama johdannossa kuvattu väline-ehdollistumisen periaate, jonka Fetz kollegoineen osoitti omissa apinakokeissaan [Fet69]. Ruokapalkinnon sijaan JR:n palkintona oli kursorin liike, joka toimi kannustavana palautteena eli niin sanottuna biopalautteena oppimiselle. Kun ihminen saa toiminnastaan (yritys liikuttaa kursoria ajattelemalla sen liikettä) halutun tuloksen (kursorin liike), tämän liikkeen muodostanut aivojen hermosolukytkentä vahvistuu ja sen aktivoitumisen todennäköisyys kasvaa (väline-ehdollistumisen periaate).

Useita vastaavanlaisia kommunikointia helpottavia käyttöliittymiä on toteutettu ja testattu yllä kuvatun tutkimuksen jälkeen ja monesti niissä on käytetty invasiivisen mitaustekniikan sijaan ei-invasiivista tekniikkaa. Ei-invasiivista, kirjoittamiseen tarkoitettua, aivokäyttöliittymää tutkittiin muun muassa koehenkilöillä, joiden tehtävänä oli kirjoittaa aivokäyttöliittymällä viiden merkin mittainen sana [Gug09]. Tehtävän suoritusta edelsi viiden minuutin harjoittelujakso, jonka jälkeen käyttäjille asennettiin EEG-lakki päähän ja he asettuivat istumaan kannettavan tietokoneen eteen, jonka ruudulla näkyi 36 kirjaimen taulukko. Heitä neuvottiin olemaan mahdollisimman paikallaan, etteivät vartalon liikkeistä aiheutuvat aivosignaalit aiheuttaisi häiriösignaalia mitattuun aivosähkökäyrään. Käyttäjien tehtävänä oli kirjoittaa sana "LUCAS" kirjainkerrallaan siten, että he keskittyivät katsomaan kulloinkin haluamaansa kirjainta kirjainruudukossa. Kyseisen aivokäyttöliittymän toiminta perustuu siihen, että kirjainruudukolla jokainen kirjainsarake ja kirjainrivi välähtelevät vuorotellen satunnaisessa

järjestyksessä nopeaan tahtiin. Käyttäjän aivoissa tapahtuu aktivaatio aina kun sellainen rivi tai sarake välähtää, jossa sijaitsee se kirjain, jota käyttäjä on keskittynyt katsomaan. Aivokäyttöliittymä pystyy tästä aktivoitumisesta päättelemään, mitä kirjainta käyttäjä katsoo.

Kuvatun testin suorittaneista 81 koehenkilöistä 89 % ylsi tehtävässä 80 - 100 % tarkkuustasoon eli he onnistuivat kirjoittamaan viiden kirjaimen sanasta oikein 4 - 5 kirjainta. Koehenkilöistä 1,2 % ei onnistunut kirjoittamaan yhtään kirjainta oikein. Tutkimus osoitti, että testattua aivokäyttöliittymää käyttäen suuri osa koehenkilöistä onnistui lyhyen harjoittelun jälkeen kirjoittamaan sillä melko luotettavasti lyhyen sanan.

Mielenkiintoisena vertailukohtana yllä kuvattuihin tuloksiin näyttäytyy hieman vanhempi tutkimus, jossa 99 koehenkilön tehtävänä oli siirrellä tietokoneen kursoria vasemmalle tai oikealle, mutta jossa toimintaperiaatteena oli edellä kuvatusta poiketen käyttäjän ajattelemien kehon liikkeiden aiheuttaman aivoaktivaation mittaaminen [Gug03]. Tässä tutkimuksessa koehenkilöillä oli noin 6 minuutin harjoittelujakso, jonka jälkeen he suorittivat kursorin siirtelytehtävän. Siirtäminen vasemmalle tapahtui ajattelemalla kummankin jalan liikuttamista ja siirtäminen oikealle ajattelemalla oikean käden liikuttamista. Tässä koeasetelmassa vain 6,2 % koehenkilöistä onnistui saavuttamaan 90 - 100 % tarkkuustason tehtävän suorituksessa. Tämä osoittaa, että aivokäyttöliittymällä päästiin vain hieman sattumanvaraisen valinnan tulosta (50 % tarkkuustaso) parempaan suoritustasoon. Yhden siirron tekoon kuluu tällä tekniikalla noin 8-10 sekuntia eli kirjoitusnopeus on noin 6 kursorin siirtoa minuutissa ja jos vaaditaan 100 % tarkkuutta, niin tämä johtaa noin yhden kirjaimen kirjoitusnopeuteen minuutissa 36 kirjaimen ruudukolla [Gug09]. Välähdyksiin perustuvalla tekniikalla yllätään puolet parempaan nopeuteen eli yhden kirjaimen kirjoittamiseen menee noin 28,8 sekuntia.

Ei-invasiiviset kirjoittamiseen tarkoitetut aivokäyttöliittymät voisivat perustua motorisia ajattelutehtäviä hyödyntävälle tekniikalle, mutta tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että kyseinen tekniikka on melko epäluotettava ja hidas väline kirjoittamiseen. Kun ajatellaan 36 kirjainta sisältävää ruudukkoa ja mietitään, kumpi yllä kuvatuista ei-invasiivisista tekniikoista olisi toimivampi virtuaalisen aivokäyttöliittymänäppäimistöön käyttöön, valinta kääntyy välähdystekniikkaan perustuvalla sovelluksella. Se on

sekä huomattavasti nopeampi että luotettavampi. Vähäinen virheiden määrä nopeuttaa kirjoittamista edelleen kun korjauksiin ei mene aikaa.

Tätä tukee myös ALS-sairaudesta saadut käyttäjäkokemukset. Vaughan tutkimusryhmineen on raportoinut 47-vuotiaasta ALS-tautia sairastavasta miehestä, joka on käyttänyt vastaavaa välähdystekniikkaan perustuvaa kirjoittamiseen tarkoitettua aivokäyttöliittymää kotonaan usean vuoden ajan 4 - 6 tuntia päivittäin [Vau06]. Hän on hoitanut sillä sähköpostien kirjoittamista ja muuta kommunikointia. Käyttö vaatii EEG-päähineen, jonka hänen henkilökohtainen hoitajansa asettaa tarvittaessa. Laitekokoonpanoon kuuluu tämän lisäksi kannettava tietokone sekä erillinen näyttö, jossa kirjainruudukko esitetään. Käyttäjä on kokenut käyttöliittymän toimivaksi, mistä kertoo käyttäjän itse esittämien arvioiden lisäksi myös aktiivinen ja säännöllinen käyttömäärä. Kyseisellä käyttäjällä silmiä liikuttavat lihakset toimivat ja hän on aiemmin käyttänyt kirjoituslaitetta, jonka toiminta perustuu pelkkään katseen kohdistamiseen ilman aivoista mitattavaa signaalia. Käyttäjän kokemusten perusteella aivokäyttöliittymä on käytännössä osoittautunut toimivammaksi (tarkempaa selostusta käyttökokemuksista ei raportoitu).

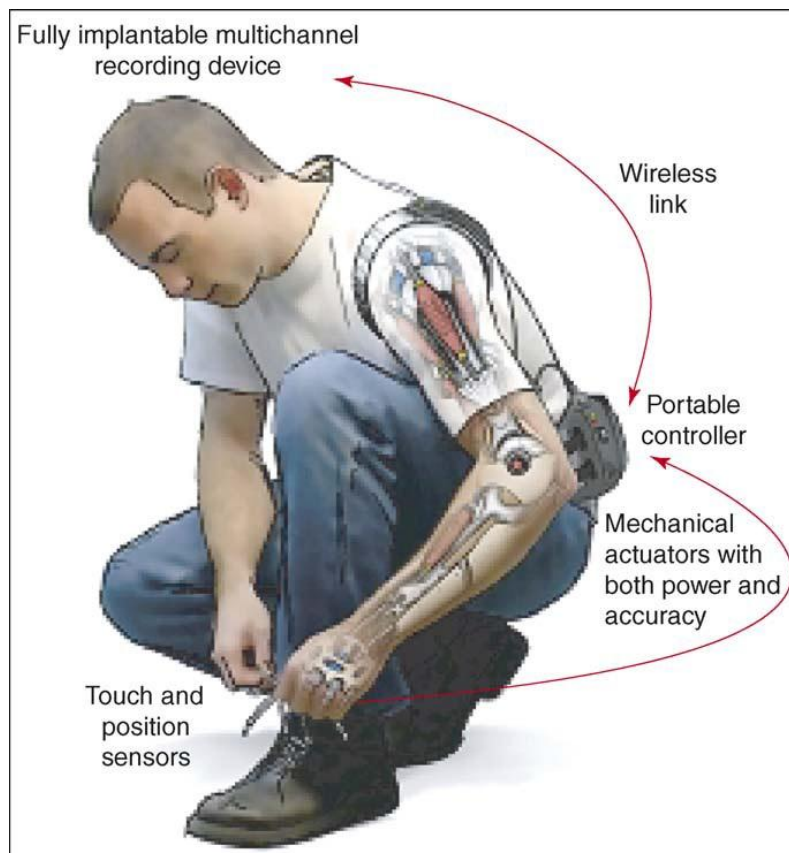
Oma lukunsa on edellä kuvattu invasiivinen menetelmä, jolla potilas JR ylsi kolmen kirjaimen minuuttivauhtiin. Asetelma oli kyseisessä tutkimuksessa hyvin erilainen verrattuna kahteen muuhun, eivätkä tulokset ole siksi vertailukelpoisia. Esimerkiksi koehenkilöiden terveydentila ja kokeeseen osallistujien määrä oli tutkimuksissa täysin erilainen, mikä estää luotettavien vertailujen tekemisen esimerkiksi tekniikoiden tehokkuudesta. Invasiivista menetelmää vastaan puhuu kuitenkin se, että jos kerran käyttäjäkokemusten perusteella ei-invasiiviset menetelmät tyydyttävät käyttäjien tarpeet ja niillä päästään käytännössä toimivaan kirjoitusnopeuteen, ei ole syytä käyttää invasiivisia menetelmiä, jotka vaativat leikkaustoimenpiteitä.

### **Aivokäyttöliittymät avustavien laitteiden hallintaan**

Tietokoneiden käyttöliittymien hallinnan lisäksi aivokäyttöliittymiä on suunniteltu ja toteutettu helpottamaan vammautuneiden henkilöiden liikkumista sekä vuorovaikutusta ympäristönsä kanssa. On esimerkiksi tutkittu mahdollisuutta kehittää aivokäyttöliit-

tymiä neuroproteesien hallintaan [NiL09]. Neuroproteesilla tarkoitetaan esimerkiksi sellaista raajaproteesia, jossa hyödynnetään keskushermoston vahingoittumattomista osista mitattavia hermosignaaleja proteesien liikuttamiseen siten, että raajansa menettäneet tai halvaantuneet henkilöt voivat saada takaisin menettämiään motorisia kykyjä.

Kuvassa 1 on Lebedevin ym. visio tulevaisuuden neuroproteesista ja sen toimintaperiaatteista [LeN06]. Tässä esimerkissä kyse on menetetyn käden korvaavasta neuroproteesista, jota ohjataan aivokäyttöliittymän avulla kuin se olisi henkilön vartaloon kuuluva aito raaja. Kuvassa henkilön kallon sisään on asennettu mittauslaite (fully implantable multichannel recording device), joka keskustelee langattomasti vyötäröllä sijaitsevan virta- ja tarkkuussäätimen (portable controller) kanssa. Neuroproteesin pinnalla on tunto- ja asentotunnistimia (touch and position sensors), jotka mahdollistaisivat kosketuksen sekä käden asennon aistimisen.



Kuva 1: Visio tulevaisuuden aivokäyttöliittymällä toimivasta neuroproteesista [LeN06].

Lebedevin mukaan samaa periaatetta voitaisiin hyödyntää proteesien lisäksi myös liikekyvyn palauttamiseen halvaantuneisiin raajoihin. Tämä tapahtuisi niin, että toimintakyvyttömiin raajojen lihaksiin ja hermoihin asennettaisiin stimuloijia, joita ohjattaisiin aivokäyttöliittymän avulla [LeN06]. Stimuloijien aktivointi aiheuttaisi liikkeen kyseisessä lihaksessa ja mahdollistaisi raajojen liikuttamisen.

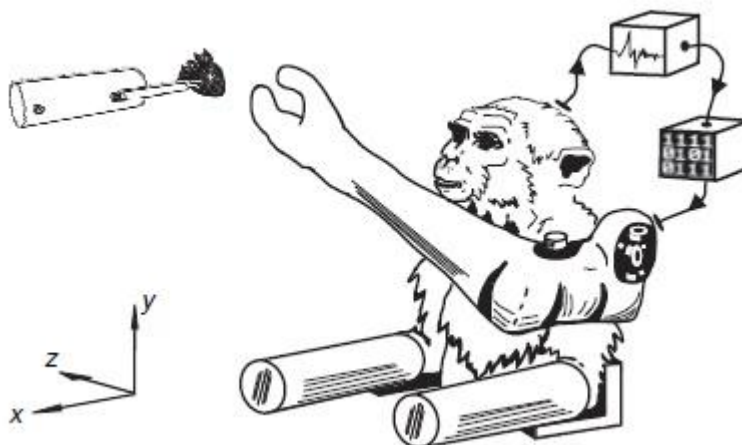
Reesusapinat ovat todistetusti pystyneet ohjaamaan neuroproteesiin verrattavissa olevaa mekaanista robottikättä aivokäyttöliittymällä [Vel08]. Tutkimuksessa kahden reesusapinan aivoihin asennettiin useita elektrodeja sisältäviä elektroditaulukkoimplantteja, jotka mittasivat aivojen toimintaa sellaisilta aivojen alueilta, jotka ovat vastuussa liiketiedon käsittelystä (esimerkiksi raajojen liikkeiden aikaansaamisesta). Implanteista lähti ohuet piuhat apinan kalloon tehdyn pienen reiän läpi, joka suljettiin elektrodien asennuksen jälkeen sementtimassalla. Kallon ulkopuolelle tuodut piuhat pystyi tällä tavoin yhdistämään aivokäyttöliittymäsovellukseen kuuluneeseen tietokoneeseen, jolla signaalin prosessointi ja käskyjen anto robotille tapahtui.

Elektrodien asennuksen jälkeen apinat opetettiin ensin ohjaamaan robottikättä joystickin avulla [Vel08]. Joystick-ohjauksen aikana aivokäyttöliittymä mittasi ja prosessoi robottikäden ohjaamisen aiheuttamaa aktivaatiota aivoista ja "opetteli" analysoidaan apinoiden aivojen signaaleja. Aivokäyttöliittymä oppi tässä vaiheessa tunnistamaan, millaisia signaaleja kunkin apinan aivot tuottavat kun se ohjaa robottikättä ojentumaan ja toisaalta millaisia signaaleja esimerkiksi tarttumisliike aiheuttaa. Kun apina oli oppinut käyttämään käsillä ohjausta, joystickin yhteys aivokäyttöliittymään katkaistiin. Tämän jälkeen robottikäden ohjaus oli kokonaan apinan aivosignaalien varassa. Ajatuksena oli, että kun aivokäyttöliittymä oli oppinut tulkitsemaan apinoiden aivosignaaleja joystick-ohjauksen aikana, se pystyisi nyt tunnistamaan tilanteen, jossa apina ajattelee makupalaan tarttumista tai robottikäden liikuttamista tiettyyn suuntaan.

Tutkijoiden iloksi kävikin niin, että apinat jatkoivat robottikäden ohjailua ilman joystickia pelkästään ajatusten voimalla [Vel08]. Apinat osasivat aivosignaaliensa avulla liikuttaa robottikättä niin, että ne pystyivät viemään sen esillä olevan makupalan

(vaahtokarkki) lähelle, tarttumaan kiinni siihen ja tämän jälkeen ohjaamaan robottikäden suunsa lähelle saadakseen syötyä makupalan. Apinat kykenivät siis robottikäden karkeiden liikkeiden muodostamisen lisäksi tekemään sillä hienomotorisia tehtäviä, kuten käden asettamisen 5 - 10 millimetrin tarkkuudella oikeaan kohtaan makupalan tarttumista varten sekä käden päädyssä olleiden pihtimäisten "sormien" sulkemisen tarttuakseen makupalaan. Näin ne saivat syötettyä itseään niin nopeaan tahtiin, että edellinen makupala oli vielä suussa pureskeltavana kun toinen oli jo tulossa suuhun. Apinat myös suorittivat robottikädellä tehtävään kuulumattomia liikkeitä spontaanisti. Toinen apinoista esimerkiksi päätti viedä robottikäden sormet suuhunsa nuollakseen niiden pinnalla olleen sokerin vaikka tarjolla olisi ollut makupala tehtävän suorittamiseksi. Apinat siis omaksuivat robottikäden liikuttamisen aivosignaaleillaan luontevaksi tavaksi toimia myös sellaisissa tilanteissa, jotka eivät suoranaisesti liittyneet tehtävän suorittamiseen.

Kuvassa 2 on nähtävissä koeasetelma, jossa aivokäyttöliittymän käytön oppinut apina istuu tuolilla ja sen omat kädet on sijoitettu putkiin, jotta se ei käyttäisi niitä makupalaan tarttumiseen. Robottikäsi on asetettu apinan vasemman olkapään viereen. Kuvan vasemmassa yläkulmassa on makupala, johon apina tarttuu robottikädellä ja vie tämän jälkeen suuhunsa. Oikeassa yläkulmassa sijaitsevat neliöt kuvastavat aivokäyttöliittymälaitteistoa.



Kuva 2: Koeasetelma, jossa reesusapina ohjaa robottikättä aivokäyttöliittymällä viedäkseen makupalan suuhunsa (muokattu lähteestä [Vel08]).

Kokeessa robottikäden liike ei rajoittunut horisontaaliseen ja vertikaaliseen liikkeeseen, kuten sellaisissa koeasetelmissa, jossa tehtävänä on liikuttaa kursoria tietokoneen ruudulla. Käytetty tekniikka vaikuttaa potentiaaliselta myös ihmisille suunnattujen neuroproteesien kehityksen kannalta. Sitä voitaisiin soveltaa ihmisille tarkoitettuihin sovelluksiin niin, että esimerkiksi kätensä menettänyt tai halvaantuneesta kädestä kärsivä henkilö pystyisi aivosignaaleillaan ohjaamaan käsiproteesia kuten aitoa kättä ja hallitsemaan sen liikkeitä aivoillaan kuten aidon biologisen käden liikkeitä hallitaan aivoilla. Tästä olisi suurta apua monissa arkipäivän toiminnoissa kuten syömisessä, oven avaamisessa, esineisiin tarttumisessa tai autolla ajamisessa. Monen vammautuneen henkilön työ- ja harrastusmahdollisuudet ja sitä kautta elämänlaatu paranisi tällaisen laitteen myötä.

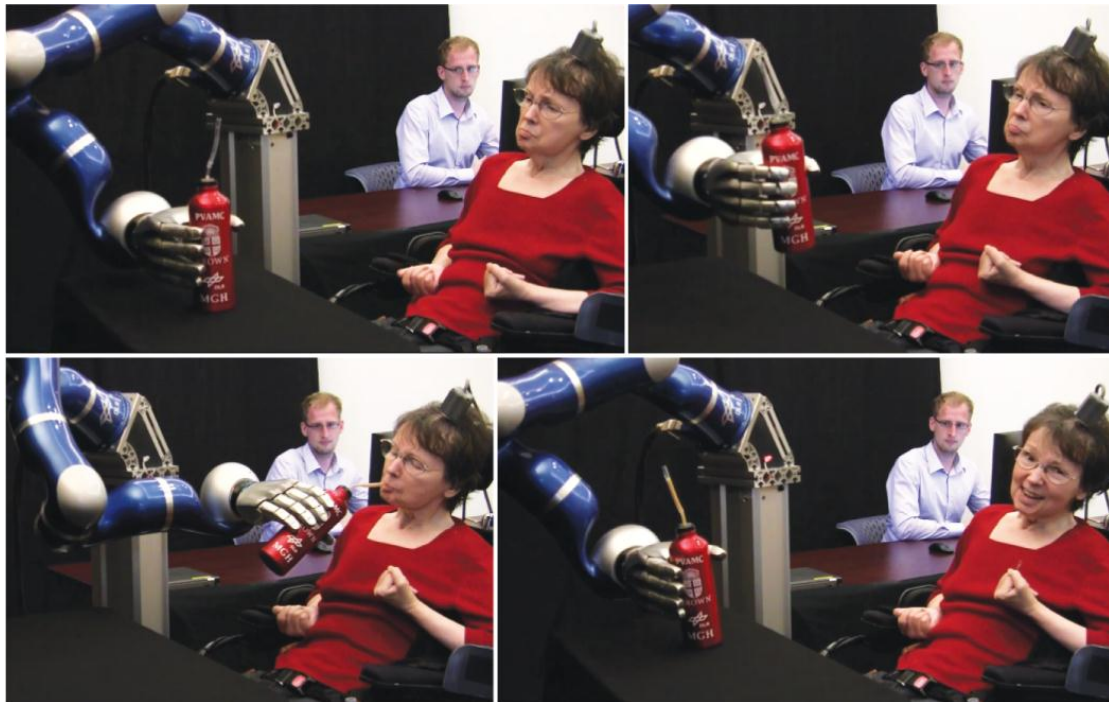
Hiljattain vuoden 2012 alussa vastaava robottikäden liikuttaminen on saatu toistettua ihmisellä [Hoc12]. Koehenkilönä oli 58-vuotias nainen, joka oli ollut 15 vuoden ajan neliraajahalvaantuneena aivoinfarktin seurauksena. Kokeessa käytettiin invasiivista mittaustekniikkaa ja koehenkilölle asennettiin aivoihin elektrodeja, joilla aivosignaalien mittausta tehtiin.

Potilas pystyi aivokäyttöliittymän avulla liikuttamaan hänen oikealle puolelleen sijoitettua robottikättä, jonka liikkeitä hän ohjasi aivosignaaleillaan [Hoc12]. Hän onnistui viemään robottikäden kahvitermospullon luokse, tarttumaan siihen kiinni, tuomaan pullon suunsa eteen ja juomaan siitä. Tämän jälkeen hän vei pullon takaisin pöydälle robottikäden avulla. Nainen ei ollut 15 vuoteen kyennyt tekemään mitään vastaavaa.

Apuvälineellä tehtävät yksinkertaiset toimet kuten juominen tai syöminen saattavat terveen ihmisen mielestä vaikuttaa alkeellisilta. Liikuntakyvyttömälle ihmiselle sen sijaan jo pelkästään itsenäisen syömisestä ja juomisen mahdollistuminen voisi nostaa heidän tyytyväisyyttään elinoloihinsa. Tämä on tavoittelun arvoinen päämäärä.

Kuvassa 3 on kuvasarja koetilanteesta. Naisen pääläella on nähtävissä mittalaitteistoa, josta menee piuhat hänen aivoihinsa.





Kuva 3: Neliraajahalvaantunut koehenkilö juo kahvia aivokäyttöliittymän avulla ohjattavalla robottikädellä.

Esimerkkinä ihmisillä tehdystä ei-invasiivisesta tutkimuksesta on koe [HaE10], jonka tavoitteena oli selvittää, pystyvätkö koehenkilöt lyhyen opetteluun jälkeen hallitsemaan virtuaalista kättä reaaliaikaisesti tutkimuksessa esiteltä aivokäyttöliittymää käyttäen. Kokeessa käytettiin EEG-signaaleja hyödyntävää aivokäyttöliittymäsovellusta, joka oli tehty niin, että aivokäyttöliittymän sisältämät, aivosignaalia tulkitsevat algoritmit osasivat mukautua käyttäjän aivosignaaleihin, jolloin aivokäyttöliittymän toiminta optimoituu käytön aikana.

Koetilanteessa virtuaalinen käsi näkyi tietokoneen ruudulla ja se edusti tutkimuksessa mekaanista proteesikättä [HaE10]. Koehenkilöitä oli kymmenen ja heidän tehtävänä oli yrittää aivosignaaliensa avulla sulkea ja avata virtuaalista kättä aivokäyttöliittymän avulla. Kukaan koehenkilöistä ei ollut käyttänyt aivokäyttöliittymiä aikaisemmin. Aluksi he näkivät ruudulla auki olevan käden ja heidän piti yrittää pitää se auki muutamana sekunnin ajan. Tämän jälkeen he näkivät ruudulla pallon, joka tippui kohti kättä ja heidän tuli tarttua palloon sulkemalla käsi oikeaan aikaan. Virtuaalikäden sulkeminen tapahtui kuvittelemalla oman käden sulkemista. Koetilanteen lopussa pallo muutti väriään, jolloin koehenkilön tuli avata virtuaalikäsi kuvittelemalla oman käten-

sä avaamista.

Yksittäinen koetilanne kesti 17 sekuntia. Yhteensä kaikki kokeeseen osallistuneet suorittivat 5000 koetilannetta [HaE10]. Tutkimuksessa seurattiin, kuinka tarkasti aivokäyttöliittymäsovellus osasi tulkita käyttäjän aikomuksia eli kuinka usein käyttäjän ajattelemaa toimintoa (käden sulkeminen tai avaaminen) seurasi vastaava virtuaalikäden toiminto. Kolmen minuutin harjoittelun jälkeen ensimmäisessä koetilanteessa saavutettiin keskimäärin 68 - 83 % suoritustarkkuus, ja tutkimuksen viimeisessä koetilanteessa päästiin keskimäärin 77,2 - 87,4 % tarkkuuteen.

Koe osoitti, että ainakin yksinkertainen motorinen tehtävä eli virtuaalisen käden puristaminen nyrkkiin ja sen avaaminen onnistuu vähäisellä opettelulla ja käden liikkeitä ajattelemalla ei-invasiivista menetelmää käyttäen kun aivokäyttöliittymässä on käytössä henkilön aivosignaaleihin mukautuvat tulkitsija-algoritmit.

Toisena esimerkkinä ei-invasiivisesta laitteiden hallintaan tarkoitettu aivokäyttöliittymäsovelluksesta ovat niin sanotut ulkoiset luurangot tai vartaloproteesit (exoskeleton), joita on suunnitella ihmisten käyttöön [NiL09]. Ne on tarkoitettu liikuttamaan laajempia osia vartalosta kuin yksittäisen raajan liikutteluun tarkoitettuja neuroproteesit. Tällaisessa sovelluksessa proteesi ympäröi henkilön liikuntakyvyttöntä vartaloa muodostaen vartalon ympärille kehon, joka kannattelee henkilöä. Kehikkoa on tarkoitus liikuttaa aivokäyttöliittymän avulla. Kehikko muodostaa siten liikuntakyvyttömän vartalon ympärille robottikuoren, jota henkilö pystyy liikuttamaan kuin omaa vartaloaan ja esimerkiksi kävelemään liikuttamalla mekaanisia jalkoja.

Kuvassa 4 on Twenten yliopistossa MINDWALKER-projektissa kehitteillä oleva vartaloproteesi, joka toimii EEG-päähineen avulla. Siinä halvaantuneen henkilön rintakehän, lantion ja jalkojen ympärillä on hänen omia vartalon osiaan ympäröivä neuroproteesi, jota käyttäjä ohjaa aivoista mitattavilla signaaleilla [Exo12]. Tavoitteena on, että vammautuneiden henkilöiden on tulevaisuudessa mahdollista saada liikuntakykynsä takaisin proteesin avulla.



Kuva 4: Aivokäyttöliittymällä ohjattava vartaloproteesi [Exo12].

Kuvatuista tutkimuksista saadut tulokset ennustavat neuroproteeseille lupaavia tulevaisuudennäkymiä. Laboratorio-olosuhteissa tehdyissä eläinkokeissa terveillä apinoilla saatuja tuloksia esimerkiksi invasiivisista robottikättä ohjaavista aivokäyttöliittymistä ei voida kuitenkaan yleistää koskemaan motorisista häiriöistä kärsiviä ihmisiä [BiC07]. Myös tiettyjä teknisiä pullonkauloja pitää vielä voittaa muun muassa mikroelektrodien suunnittelun, virranhallinnan sekä reaaliaikaisen matemaattisen mallintamisen ja robotiikan osa-alueilla [Nic03].

Nämä pullonkaulana olevat tekijät vaikuttavat muun muassa laitteiden kokoon sekä aivosignaalien tulkinnan tarkkuuteen ja sitä kautta käytettävyyteen. Jos esimerkiksi saataisiin kehitettyä tarpeeksi pieni mittalaite ja sille virtalähde, voitaisiin toteuttaa invasiivinen mittari, joka olisi pysyvästi asennettu kallon sisään ja joka lähettäisi mitatut signaalit langattomasti kallon ulkopuolella olevalle signaalin vastaanottavalle laitteelle. Tämä lisäisi invasiivisen tekniikan turvallisuutta ja tekisi laitteesta käytännöllisemmän kun erillisiä piuhoja elektrodeista mittalaitteeseen ei tarvittaisi. Jos taas mitatun datan käsittelevä laite saataisiin pienemmäksi, ei aivokäyttöliittymän käyttäminen enää edellyttäisi kannettavan tietokoneen kaltaisen ison laitteen kantamista

mukana. Myös tämä toisi parannusta laitteen käytännöllisyyteen.

Tulevaisuuden haasteina ovat myös pitkäaikaisten (vuosia kestävien) mittausten tekeminen invasiivisesti ilman soluvaurioita sekä neuroproteesien integroiminen ihmiskehoon siten, että se tuntuu osalta omaa vartaloa [LeN06]. Vielä on ennen aikaista sanaa, onnistutaanko tulevaisuudessa kehittämään tarpeeksi käytännöllisiä ja vammautuneille ihmisille sopivia neuroproteeseja arkikäyttöön. Neuroproteeseihin liittyvä BCI-tutkimus on osaltaan lisännyt tietoa aivojen hermosolukokonaisuuksien yhteistoiminnan fysiologisista periaatteista ja näiden periaatteiden ymmärtäminen tulee olemaan tulevaisuuden neuroproteesien kehittämisen perustana [NiL09].

Liikkumisen mahdollistamiseen tähtäävät myös tutkimukset, joissa aivokäyttöliittymällä ohjattavana laitteena on proteesin sijaan pyörätuoli. Näiden tutkimusten avulla pyritään kehittämään aivokäyttöliittymiä, joiden avulla liikuntakyvyttömät ihmiset voisivat ohjata pyörätuolia ajatuksen voimalla. Tällaisten pyörätuolien kohderyhmänä ovat potilaat, jotka eivät pysty liikuntarajoitteensa takia käyttämään ohjailuun minäänlaista käsien tai suun liikkeillä ohjattavaa pyörätuolia.

Yhdessä tutkimuksessa testattiin simuloitun pyörätuolin liikuttamista virtuaalisessa ympäristössä aivokäyttöliittymän avulla [Gal08]. Sovellus perustui käyttäjän ja älykkään virtuaalisen pyörätuolin jaettuun kontrolliin siten, että tietyissä tilanteissa pyörätuolin liikuttamisen kontrolli siirtyi pyörätuolisovellukselle, johon oli toteutettu tarvittavat koneälyominaisuudet. Kahden terveen koehenkilön tehtävänä oli navigoida virtuaalisessa tilassa ennalta määriteltyjä reittejä, joissa reitti kulki yksinkertaisessa labyrintissa. Tällä tehtävällä simuloitiin tilannetta, jossa liikuntakyvytön ihminen ohjaa pyörätuolia aidossa käyttötilanteessa. Koehenkilöt oppivat yhden päivän aikana liikuttamaan virtuaalista pyörätuolia siten, että he saavuttivat keskimäärin 85 % asetetuista navigointitavoitteista eli liikkuiivat reitin loppuun saakka.

Astetta lähemmäs arkipäiväiseen käyttöön tarkoitettuja pyörätuoleja on päästy muun muassa Carrinon ym. kokeessa, jossa ei-invasiivista aivokäyttöliittymää hyödyntävän oikean mekaanisen pyörätuolin käyttämistä testattiin laboratorion ulkopuolisissa olosuhteissa kuntoutuskeskuksen käytävillä [Car12a]. Koetilanteen verrattavuutta aitoon

käyttötilanteeseen lisäsi myös se, että kokeeseen osallistui neljän terveen henkilön lisäksi myös yksi liikuntavammainen henkilö, joka kuuluu sovelluksen kohderyhmään. Kokeessa tehtävänä oli ohjata pyörätuolia aivokäyttöliittymällä ennalta määrätty 34 metrin matka rakennuksen käytävää pitkin. Matkalla piti suoriutua oviaukon läpi kulkemisesta sekä kahden eri paikoissa sijaitsevan pöydän luo menemisestä. Pyörätuolia ohjattiin motorisilla ajattelutehtävillä. Kaikki koehenkilöt suoriutuvat tehtävästä ja pystyivät ohjaamaan pyörätuolia turvallisesti. Ainoastaan yksi terveistä koehenkilöistä koki vaikeaksi olla antamatta kääntymiskäskejä pyörätuolille ja tämän vuoksi teki enemmän käännöksiä kuin olisi ollut tarve, mutta myös hän suoritti tehtävän loppuun. Koe osoittaa, että virtuaalisessa ympäristössä suoritettavia tehtäviä pystytään suorittamaan myös oikealla pyörätuolilla aidossa ympäristössä, mikä on tärkeä edistysaskel pyörätuoliaivokäyttöliittymien kehityksessä.

Carrino tutkimusryhmineen on hiljattain tutkinut myös sitä, pystytäänkö tämänhetkellä aivokäyttöliittymäteknikalla ja laitteistolla tekemään kaupallinen pyörätuolien ohjaukseen tarkoitettu aivokäyttöliittymä, joka olisi tarpeeksi helppokäyttöinen ja edullinen yksityisten ihmisten käyttöön ja ostettavaksi [Car12b]. Aivokäyttöliittymien yksityiskäytön esteenä ovat tällä hetkellä niiden korkea hinta, laitekoonpanon asennuksen vaikeus ilman ammattilaisen apua ja pääläelle asetettavan EEG-päähineen pukemisen vaikeus. Tutkimuksissa yleisimmin käytetyt EEG-päähineet vaativat sen, että niiden sisältämien elektrodien ja päänahan väliin pitää levittää geelimäistä ainetta, joka parantaa sähköisten signaalien kulkua elektrodiin. Päähineet eivät myöskään ole yleensä langattomia. Vasta viime vuosina on kehitetty langatonta tiedonsiirtotekniikkaa (Bluetooth) käytäviä EEG-päähineitä, joissa geeliä ei tarvita, mutta niiden varjopuolena on se, että geelittömyys huonontaa signaalin laatua ja vaikuttaa siten negatiivisesti koko aivokäyttöliittymän toimintaan. Tutkimuksessa käytettiin tällaista kaupallista EEG-päähinettä (Emotivin Epoch Headset -päähine) pyörätuolin ohjaamiseen. Siinä elektrodit sijaitsevat joustavien ulokkeiden päissä, jotka asetetaan päänahan pinnalle. Päähine maksaa 300 - 3000 dollaria riippuen sen kokoonpanosta.

Tutkimuksessa pyörätuolia ohjattiin motorisilla ajattelutehtävillä [Car12b]. Päätaavoitteena oli arvioida kaupallisen EEG-päähineen sopivuutta tehtävään ja sen luotettavuutta tosielämän käyttötilanteessa. Koetilanteessa käyttäjän tehtävänä oli kääntä-

mään pyörätuolin suuntaa vasemmalle ajattelella vasemman käden liikettä ja oikealle ajattelella oikean käden liikettä. Muita käskyjä ei koetilanteessa käytetty pyörätuolin ohjaukseen.

Muutaman tehtävän suorittamisen jälkeen kävi ilmi, että päähineen elektrodeja ei ollut mahdollista saada asetettua tarpeeksi tarkasti samaan kohtaan päälakea eri testikerroilla [Car12b]. Tästä syystä mitattavan signaalin laatu vaihteli kerrasta toiseen. Lisäksi yksikään laitteen 14 elektrodista ei sijainnut lähelläkään aivokuoren niitä alueita, jotka käsittelevät liiketietoa ja joita juuri olisi pitänyt pystyä mittaamaan, koska tehtävän suorituksessa käytettiin apuna motorisia ajattelutehtäviä. Tästä syystä tutkijat joutuivat muokkaamaan päähineen elektrodien sijaintia, jotta se soveltuisi käyttötarkoitukseen. Pyörätuoli myös liikkui ajoittain odottamattomasti, mikä häiritsi käyttäjien motoriseen tehtävään keskittymistä. Tästä syystä koeasetelmaa päätettiin muuttaa niin, että pyörätuolin ohjaaminen tapahtui liikkeen ajatteleminen sijaan siten, että käyttäjä todella liikutti joko vasenta tai oikeaa kättä, jolloin tehtävän suorittaminen ei vaatinut samanlaista keskittymistä kuin motoristen ajattelutehtävien kautta tapahtuva ohjaus. Kokeessa 60 % käyttäjän antamista käskyistä tulkittiin oikein kun vastaava luku perinteisiä EEG-päähineitä käyttämällä on keskimäärin 80 % luokkaa.

Tuloksista on tulkittavissa, että kohtuuhintaisia ja tarjolla olevia EEG-päähineitä käyttämällä ei pystytä tällä hetkellä saamaan aikaan luotettavaa aivokäyttöliittymää pyörätuolin ohjaukseen. Koetulokset paljastivat ongelmia nykyisissä EEG-päähineissä ja auttavat niiden jatkokehityksessä. Tuotteita voitaisiin esimerkiksi parantaa sijoittamalla elektrodit erilailla, jolloin ne kattaisivat tarvittavan osan aivokuoresta. Voitaisiin myös lisätä elektrodien määrää, jolloin mittauksesta saataisiin enemmän prosessoitavaa dataa. Pähineen asettelua helpottamaan voitaisiin kehittää jonkinlainen yksilöllisesti muokattavat säätimet, jotka takaisivat päähineen tarkan sijoittamisen paikalleen.

Aivokäyttöliittymäteknikkaa on suunniteltu ja kokeiltu käyttää myös kodin laitteiden hallintaan. Esimerkkinä tällaisesta aivokäyttöliittymästä mainittakoon testiympäristö, jossa käyttäjä navigoi kolmiulotteisessa virtuaalisessa tilassa ja toteuttaa siellä erilaisia toimintoja, kuten kytkee virtuaalisia valaisimia päälle ja pois, tai säätää sitä, mil-

lä korkeudella verhot ovat [Goo05]. Tässä virtuaalisessa tilassa annetut käskyt säätelivät prototyyppiin toteutetun, todellisen, pienoiskodin lamppuja ja verhoja. Kyseisen prototyypin toteuttaneiden tutkijoiden tavoitteenaan on luoda käyttöliittymä, jolla liikuntarajoitteiset voivat hallita kotiympäristöään.

Kodinomaisessa laboratorioympäristössä on tehty myös tutkimus [Cin08], jossa koehenkilöt opetettiin käyttämään prototyyppiä, joka mahdollisti robotin ohjailun kodinomaisessa kalustetussa ympäristössä. Robottia oli mahdollista ohjata sekä perinteisillä ohjaimilla (hiiri, näppäimistö, joystick, puheentunnistus) että aivokäyttöliittymällä. Robottiin asennetun kameran avulla oli mahdollista nähdä huoneisiin ja robotille oli mahdollista antaa käskyjä, joiden seurauksena se sanoi lauseita kuten "Olen janoinen.". Tutkimuksen tavoitteena oli osoittaa, että on mahdollista toteuttaa aivokäyttöliittymäsovelluksia arkipäiväiseen käyttöön vakavista motorisista häiriöistä kärsiville henkilöille käyttämällä helposti saatavilla olevia teknisiä komponentteja. Tällä pyrittiin siihen, että tutkimusta vastaava kokoonpano olisi mahdollista rakentaa uudelleen helposti esimerkiksi jonkun potilaan kotiin. Tutkimuksessa neljätoista tervettä ja neljä liikuntarajoitteisesta koehenkilöä oppi ohjaamaan robottia aivokäyttöliittymän avulla. Keskimääräinen ohjaustarkkuus oli yli 75 % luokkaa.

Tällainen robottisovellus voisi olla hyödyllinen kotiolosuhteissa silloin kun henkilö ei halua käyttää pyörätuolia. Robotti toimisi eräänlaisena sijaiskehona, jonka avulla henkilö voisi liikkua ja vuorovaikuttaa ympäristönsä kanssa. Ylävartalostaan liikuntakyvytön tarvitsee avustajan päästäkseen pyörätuoliin istumaan. Aivokäyttöliittymällä käytettävä robottilaite olisi pyörätuolia parempi vaihtoehto tilanteissa, joissa käyttäjä haluaa esimerkiksi hakea juotavaa jääkaapista, nähdä eri huoneisiin asunnossaan tai ylipäätään toimia kotonaan, mutta ei haluaisi käyttää tähän avustajaa. Tällöin robotti toimisi oman kehon korvaajana eikä aina olisi tarve käyttää pyörätuolia. Tekniikan kehittyessä olisi ehkä mahdollista hoitaa asiointeja kodin ulkopuolellakin esimerkiksi eri virastoissa tai asioida ruokakaupassa. Virallisten asioiden hoitaminen ja ostoksien tekeminen sijaiskehon avulla vaatii varmaankin lakimuutoksia sen suhteen, kuka tai mikä saa edustaa henkilöä erilaisissa asioissa kuten lainan ottamisessa, joten lähitulevaisuudessa tällaisen sovelluksen realistisena käyttöpaikkana ovat muut kuin julkiset tilat.

## **Kuntoutus omien aivosignaalien hallinnan avulla**

Avustavien laitteiden kehittämisen lisäksi erilaisista sairauksista kärsivien kuntouttaminen on yksi osa-alue, jolla aivokäyttöliittymien hyödyntämistä on tutkittu. Tällöin lähtökohtana on, että potilas opetetaan itse lievittämään sairauden oireita opettamalla hänet aivokäyttöliittymän avulla hallitsemaan omia aivosignaalejaan tietyillä aivojen alueilla, jotka ovat yhteydessä sairauteen [BiC07].

Eräässä tutkimuksessa [Roc93] on esimerkiksi saatu hyviä tuloksia vaikea-asteisen lääkeresistentin epilepsian oireiden hoitamisesta opettamalla potilaat hallitsemaan sellaista aivokuoren toimintaansa, joka on yhteydessä epileptiskohtausten syntyyn. Tutkimukseen osallistui 25 epilepsiaa sairastavaa henkilöä, joiden keskimääräinen epileptisten kohtausten määrä viikossa oli 11,5 vaihteluvälin ollessa 1 - 60.

Harjoitteluistuntoja oli kullakin koehenkilöllä 28 ja istuntojen aikana heidän aivosignaalejaan mitattiin EEG-päähineellä [Roc93]. Harjoittelutilanteessa koehenkilö näki edessään tietokoneen ruudun, jossa oli visualisoituna avaruusalue. Aina jos koehenkilö onnistui saamaan mitattavalla aivojensa alueella tutkijoiden haluaman aivosignaalin aikaiseksi, avaruusalue alkoi liikkua vasemmalta oikealle. Tämä näköpalaute kertoi siis koehenkilölle, että hän onnistui aktivoimaan halutun aivoalueen eli näköpalaute toimi positiivisena kannustimena eli positiivisena biopalauteena aivoalueen hallinnan oppimisessa. Harjoittelun ja visuaalisen näköpalauteen seurauksena aluksi sattumanvaraisista aivoalueen aktivoitumisista tuli vähitellen tahdonalaisia eli koehenkilö oppi aktivoimaan aivoalueen tietoisesti. Tässä hyödynnettiin siis väline-ehdollistumisen periaatetta. Tavoitteena oli, että kun koehenkilö oppii hallitsemaan niitä aivosignaalejaan, jotka synnyttävät epileptisen kohtauksen, hän pystyy jatkossa estämään kohtausten ilmenemistä tietoisella aivosignaalien kontrolloinnilla.

Harjoittelujakson jälkeen koehenkilöiden epileptiskohtausten määrään seurattiin vuoden kestävässä seurantatutkimuksessa [Roc93]. Koehenkilöistä seitsemän lopetti kohtausten seurannan kesken seurantajakson, joten analysoitavaksi jäi 18 henkilön tulokset. Kuuden koehenkilön kohtaukset loppuivat kokonaan, seitsemän koehenkilön koh-



taukset vähenivät keskimäärin puoleen aloitustasosta ja viiden henkilön kohtausten ilmenemistiheydessä ei tapahtunut muutosta. Kaikki ne, joiden kohtaukset loppuivat kokonaan, olivat nuoria verrattuna muihin koehenkilöihin ( $22 \pm 3$  vs.  $36 \pm 3$  ja  $35 \pm 5$ ).

Kahdessa 2000-luvulla tehdyssä tutkimuksessa [Fuc03, Str06] sen sijaan on saatu tuloksia tarkkaavaisuushäiriöistä kärsivien potilaiden kuntoutuksessa. Myös näissä tutkimuksissa potilaat opetettiin säätelemään aivokuoren aktivaatiotaan siten, että he onnistuivat vähentämään oireitaan.

ADHD (attention deficit/hyperactivity disorder) on tarkkaavaisuus häiriö, jonka oireita ovat mm. huono tarkkaavaisuuden kohdentamisen ja keskittymisen kyky, impulsivisuus ja hyperaktiivisuus. Fuchs ym. vertasivat tutkimuksessaan, minkälaisia tuloksia aivokäyttöliittymän avulla tehtävä aivosignaalien hallinnan opettelu antaa ADHD-potilaiden oireiden hoidossa verrattuna lääkehoitoon [Fuc03]. Tutkimukseen osallistui 34 ADHD-diagnoosin saanutta lasta, jotka olivat 8 - 12 -vuotiaita. Kokeeseen osallistuneista lapsista 22 kuuluivat ryhmään, jotka opettelivat hallitsemaan aivosignaalejaan vähentääkseen sairauden oireita ja 12 kuuluivat ryhmään, jotka saivat lääkehoitoa. Hoitajakso kesti 12 viikkoa, jonka aikana yksi lääkehoitoryhmään kuulunut lapsi lopetti lääkekuurin sivuoireiden takia eli osallistujia oli tämän jälkeen 33.

Istuntoja, joissa aivosignaalien hallintaa opeteltiin, oli kullakin kokeeseen osallistujalla kolme kertaa viikossa 12 viikon ajan [Fuc03]. Harjoittelun apuna käytettiin biopalautea samaan tapaan kuin aiemmin kuvatussa epilepsiatutkimuksessa sillä erotuksella, että visuaalisen palautteen lisäksi koehenkilöt saivat myös äänipalautetta. Koehenkilöiden aivosignaaleja mitattiin EEG-päähineellä ja heidän tehtävänä oli liikuttaa tietokoneen ruudulla näkyvää hahmoa labyrintissä. Mitä paremmin koehenkilöt onnistuivat hallitsemaan haluttuja aivosignaaleja, sitä kirkkaammaksi hahmo muuttui ja sitä nopeammin se liikkui. Toisaalta huonon suorituksen seurauksena hahmo pysähtyi ja muuttui mustaksi. Jos koehenkilö onnistui hallitsemaan signaaleja pitkän aikaa, hänet palkittiin pisteillä, joiden yhteydessä kuului onnistumisesta kertova äänimerkki. Hahmon ominaisuudet sekä onnistumisesta kertovat pisteet ja äänimerkki toimivat siten biopalautteena aivosignaalien hallinnan opettelua tukemaan. Sekä aivosignaalien

opettelua harjoitelleen että lääkehoitoa saaneen ryhmän ADHD-oireet vähenivät selvästi. Kokeessa saavutettu oireiden vähenemisen aste oli samaa luokkaa kuin lääkehoidolla saavutettu aste.

Strehl tutkimusryhmineen selvitti aivosignaalien hallinnan opetteluun vaikutusta ADHD-oireisiin [Str06]. Tutkittavana oli 23 ADHD-diagnoosin saanutta 8 - 13 - vuotiasta lasta, jotka harjoittelivat aivosignaaliensa hallintaa 30 harjoitusistunnossa. Osallistujia kehoitettiin katsomaan tietokoneen ruutua ja tarkkailemaan siellä näytettävää palautetta. Aivosignaalien hallinnan onnistumisesta annettiin biopalautetta sekä visuaalisessa että auditorisessa muodossa kuten Fuchsin ym. tutkimuksessa. Onnistuneen aivosignaalien hallinnan seurauksena ruudulla näytettiin hymynaama sekä annettiin äänimerkki. Hyvään suoritukseen kannustettiin myös siten, että tietystä määrästä onnistuneita suorituksia lapselle annettiin palkinnoksi pieni lahja kuten tarra tai lelu. Mitään ohjetta siihen, miten aivosignaaleja voi hallita, ei Strehlin ym. tutkimuksessa lapsille annettu. Heitä kehoitettiin ainoastaan tarkkailemaan tietokoneen ruudulla näytettävää palautetta ja etsimään itse paras strategia positiivisen palautteen aikaansaamiseksi. Lapsia seurattiin puolen vuoden ajan harjoittelujakson jälkeen ja heillä todettiin merkittävää ADHD-oireiden lieventymistä, joka kesti koko seurantajakson ajan.

Kuten Fuchsin ym. tutkimuksessa, myös tässä tutkimuksessa oppiminen perustui pelkästään siihen, että kun koehenkilöt onnistuvat aluksi vahingossa hallitsemaan aivosignaalejaan halutulla tavalla ja kun tätä onnistumista palkitaan aivokäyttöliittymän avulla visuaalisella ja auditorisella biopalautteella, niin vähitellen kyseisten aivosignaalien hallinta muuttui tahdonalaiseksi. Sama väline-ehdollistumisen ilmiö on nähtävissä esimerkiksi pienillä vauvoilla, jotka eivät vielä lainkaan hallitse käsiensä liikkeitä. Hekin oppivat vähitellen huomaamaan käsiään seuraamalla, että käskyttämällä niitä tietyllä tavalla, he saavat aikaan tietynlaisen liikkeen. Tässä tapauksessa biopalautteena toimii käden liikkeen näkeminen ja harjoittelun sekä palautteen saamisen kestäessä tarpeeksi monta viikkoa tai kuukautta, käsien liikkeiden hallinta automatisoituu ja vaikkapa tarttumisen esineisiin onnistuu ilman liikkeiden tietoista miettimistä.

On positiivista jos lapsille ja nuorille pystytään tarjoamaan lääkehoidon tilalle muita hoitovaihtoehtoja. Lääkehoidon vaikutukset eivät esimerkiksi ADHD:n hoidossa ole

pysyviä vaan oireet palaavat kun lääkkeiden syönti loppuu. Omien aivosignaalien hallinnan oppiminen ja oireiden lieventäminen sitä kautta tuo henkilölle voimavaran, jota ei voi viedä pois ja joka kulkee mukana ainakin jos taitoa ylläpitää harjoittelulla. Useita vuosia kestävien seurantatutkimusten avulla voitaisiin selvittää, voisivatko muutokset jäädä pysyviksi eli muuttuuko aivojen toiminta harjoittelun seurauksena esimerkiksi niin, että ADHD-oireet häviävät kokonaan aivosignaalien hallinnan muuttuessa automaattiseksi, kuten edellä kuvattu vauvan käden liikkeiden hallinta.

Ideatasolla olevista sovelluskohteista mainittakoon vielä psykopaattisten piirteiden muuttamiseen tähtäävät aivokäyttöliittymät. Psykopaattisten henkilöiden käyttäytymistä leimaa kyvyttömyys tuntea empatiaa muita kohtaan [Bir05]. Heiltä näyttää myös puuttuvan kyky ennakoida tai pelätä rangaistusseuraamuksia teoista, jotka yleisesti koetaan muiden oikeuksia loukkaaviksi eivätkä he reagoi uhkaaviin tilanteisiin samanlaisella pelkoreaktiolla kuin terveet ihmiset. Psykopaattisia piirteitä omaavilta saattaa esimerkiksi puuttua terveille ihmisille tyypillinen hikoilun lisääntyminen pelottavassa tilanteessa. He eivät myöskään näytä ehdollistuvan pelolle, toisin kuin terveet ihmiset. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka he kokisivat samanlaisen uhkaavan ja negatiiviseen lopputulokseen johtavan tilanteen toistuvasti, he eivät opi pelkäämään kyseistä tilannetta. Tästä syystä heidän käytöstään eivät usein ohjaa yhteiskunnassa vallitsevat normit vaan heidän on keskimääräistä helpompaa käyttäytyä sosiaalisesti tuomittavalla tavalla ja päätyä tekemään rikoksia. Birbaumerin ym. mukaan ilmiö johtuu siitä, että näiden ihmisten aivoissa on puutteellista aktivaatiota niillä aivojen alueille, jotka vastaavat pelkotuntemusten muodostumisessa. Aivokäyttöliittymäteknikkaa voitaisiinkin käyttää siihen, että psykopaattisia piirteitä omaavia opetettaisiin aivokäyttöliittymän avulla lisäämään aktivaatiota niillä aivojen alueilla, joilla toiminta on puutteellista ja näin pyrkiä estämään psykopaattisten käyttäytymispiirteiden ilmenemistä [BiC07].

Kuvatut esimerkit kertovat siitä, että tällä aivokäyttöliittymien sovellusalueella on lupaavia tutkimussuuntia ja niistä on myös saatu hyviä tuloksia sairauksien hoidossa. Esimerkiksi epilepsian hoitoa tutkittaessa on kuitenkin havaittu, että tällaisen kuntoutusmuodon tehokkuus saattaa riippua esimerkiksi henkilön iästä eli voi olla, että siitä voivat hyötyä eniten nuoret henkilöt.

Tämä sovellusalue eroaa laitteiden hallintaan tähtäävien sovellusten kehittämisestä tavoitteiltaan. Laitteiden hallintaan tarkoitettujen aivokäyttöliittymien tärkeinä ominaisuuksina ovat muun muassa korkea aivosignaalien tiedonvälityskapasiteetti, signaalien luotettava tulkinta, jotta laitteiden ohjaamiseen saadaan tarpeeksi dataa, ja jotta laitteiden ohjaus olisi tarpeeksi tarkkaa. Omien aivosignaalien hallinnan opettamisessa aivokäyttöliittymän roolina on tarjota potilaalle palautetta, josta hän voi nähdä, milloin halutun aivoalueen aktivointi on onnistunut. Tällöin aivokäyttöliittymän tärkeimpänä ominaisuutena on mittauksen onnistuminen tietyltä aivojen alueelta sekä sopivan palautetavan valinta. Näissä sovelluksissa aivokäyttöliittymältä ei vaadita niin monimutkaista toimintaa kuin esimerkiksi proteesin liikuttamiseen tarkoitettulta aivokäyttöliittymältä.

### **Sähköstimulaatiohoito**

Aivokäyttöliittymiä pystytään hyödyntämään myös niin sanotussa sähköstimulaatiohoidossa, jossa henkilön aivosignaalit ohjaavat elektrodeja, jotka saavat aikaan sähköimpulsseja. Näitä sähköimpulsseja voidaan käyttää esimerkiksi halvaantuneen raajan lihasten aktivoimiseen. Tämän kaltaista kuntoutusmuotoa on ehdotettu ja kokeiltu muun muassa selkärankavaurioiden aiheuttamien motoristen häiriöiden kuntouttamiseen. On saatu tuloksia siitä, että selkärankavaurion halvaannuttaman henkilön on mahdollista opetella tiettyjen aivosignaaliensa hallintaa siten, että halvaantumisesta huolimatta esimerkiksi raajojen liikuttaminen onnistuu rajoitetusti.

Pfurtscheller tutkimusryhmineen selvitti, pystyisivätkö he saamaan 28-vuotiaan selkärankavauriosta kärsivän neliraajahalvaantuneen miehen käteen liikekyvyn osittain takaisin aivokäyttöliittymäteknikkaa hyödyntämällä [Pfu03]. Tavoitteena oli saada kädessä aikaan tarttumisote. He asensivat potilaan käteen ihon päälle elektrodeja kuuheen eri kohtaan. Elektrodien tarkoituksena oli stimuloida sähköisesti ihon alla olevia lihaksia. Potilaan aivosignaaleja mitattiin EEG-päähineellä ja hänen tuli suorittaa motorisia ajattelutehtäviä (esimerkiksi oikean jalan liikkeen ajattelu). Kun potilas suoritti motorisen tehtävän, sen seurauksena kädessä oleviin elektrodeihin lähetettiin sähköistä stimulaatiota (FES, functional electrical stimulation), jotka aiheuttivat ihon alla

olevien halvaantuneiden lihasten supistumisen. Hän onnistui tällä tekniikalla tarttumaan sylinterin muotoiseen esineeseen halvaantuneella kädellään.

Pfurtscheller toteaa, että ihon pinnalle asetettavat elektrodit ovat ongelmallisia, koska ne eivät pysy paikoillaan, eikä niitä pysty kohdentamaan syvemmällä oleviin lihaksiin. Siksi lopulliset kotikäyttöön tarkoitetut laitteet tulisi tehdä invasiivisiksi eli elektrodit tulisi asentaa ihon sisään lihakseen kiinni. Kuvatussa tutkimuksessa pystyttiin kuitenkin osoittamaan, että aivokäyttöliittymää hyödyntämällä pystytään kiertämään selkärankavaurio sekä sen aiheuttama raajojen halvaus ja käskyttämään lihaksia suoraan aivoista. Tätä tekniikkaa kannattaa kehittää edelleen, koska sen mahdollisesti tuoma hyöty halvaantuneille henkilöille on mittaamattoman suuri. Jo pelkkä käsien tai ylävartalon toimintakyvyn palautuminen mullistaisi neliraajahalvaantuneen elämän. Se mahdollistaisi huomattavan toimintakyvyn nousun jokapäiväisissä toiminnoissa ja voisi jopa palauttaa työkykyisyyden.

On myös esitetty toiveita sähköstimulaatiotekniikan käytöstä Parkinsonin taudin kuntoutuksessa [Vau03]. Kyseiseen sairauteen liittyy vaikeus saada esimerkiksi kävellessä jalkojen liike alulle. Tällaisten oireiden hoidossa sähköstimulaatio voisi auttaa potilaita vartalon liikkeiden alullepanemisessa ja stimulaation aktivoiminen voisi tapahtua aivokäyttöliittymän avulla.

## **2.2 Hyötysovellukset**

Yhtenä aivokäyttöliittymien kehityssuuntana on suunnitella sovelluksia, jotka parantavat ihmisen ja laitteiden välistä vuorovaikutusta esimerkiksi ennaltaehkäisemällä ja estämällä työtapaturmia [Ven10]. Tällaisissa sovelluksissa aivokäyttöliittymätekniikan roolina on toimia eräänlaisena mittausvälineenä, joka mahdollistaa tarkkaavaisuuden, keskittyneisyyden tai mielen tilan mittaamisen reaaliaikaisesti [Mül08].

Eräässä tutkimuksessa [Ven10] testattiin neuroteknologian hyödyntämistä työolosuhteiden optimointiin teollisuusympäristössä. Tutkimusraportissa käytetään termiä neuroergonomia, jolla tarkoitetaan sitä, että teknologisten välineiden toteutuksessa hyö-

dynnetään tietoa ihmisen käyttäytymisen ja kognition hermostollisesta perustasta. Tutkimuksessa pyrittiin erityisesti tunnistamaan sellaisia koehenkilöiden mielentiloja, jotka todennäköisesti vaikuttavat häiriöihin annettujen tehtävien suorittamisessa. Tutkimusta varten luotiin aitoa teollisen tuotantolaitoksen työympäristöä jäljittelevä tila, jonka äänimaailma oli meluisa ja jossa koehenkilöiden tuli suorittaa pitkäkestoista, monotonista työtä. Kokeessa koehenkilön tehtävänä oli muun muassa valvoa kontrollipaneelia ja reagoida kolmenlaisiin viesteihin (status, varoitus, hälytys), joita ilmestyi kyseiseen paneeliin. Jokainen eri viestityyppi edellytti koehenkilöltä erilaista toimintaa. Statusviestiin ei tarvinnut reagoida mitenkään, varoitusviestin nähdessään koehenkilön tuli painaa nappia ja hälytysviestin ilmetessä tuli siirtyä kokonaan toiselle työpisteelle suorittamaan toinen tehtävä ja palata tämän jälkeen takaisin. Hälytystyyppinen viesti edellytti koehenkilöltä siten enemmän toimenpiteitä kuin status- tai varoitus-tyyppiset viestit. Kokeessa tutkittiin aivosignaalien eroja näiden kolmen erilaisen viestityypin kohdalla. Tutkimuksessa pystyttiin erottelemaan edellä kuvattujen eri viestityyppien aiheuttamat piirteet aivosignaaleissa. Käytännössä pystyttiin siis tulkitsemaan aivosignaaleista, minkä viestin koehenkilö näki ruudulla. Selkein erot mitattiin status-tyyppisen ja kahden muun tyyppisen viestin aiheuttamassa aivosignaalien muutoksessa. Tätä selitettiin sillä, että varoitus- ja hälytys-tyyppisten viestien näkeminen edellytti koehenkilön reagointia kun taas statusviestin näkeminen ei. Kuitenkin myös varoitus- ja hälytys-tyyppisten viestien näkeminen pystyttiin erottelemaan. Tutkijat odottivat, että koehenkilöiden tehtävien suoritukseen liittyvien virheiden määrä kasvaisi tehtävän edetessä ja tarkkaavaisuuden tason laskiessa. Tuloksista selvisi kuitenkin, että virheiden määrä ei tehtävän aikana kasvanut merkittävästi. Sen sijaan reaktioajassa oli havaittavissa tasainen kasvu tehtävän edetessä.

Tutkimuksen tekijät toivovat, että saaduista tuloksista on hyötyä jatkotutkimukselle, kun kehitetään avustavia sovelluksia, joiden tavoitteena on estää tai vähentää työtapaturmia. Tällaiset työympäristöön upotetut sovellukset ottaisivat huomioon esimerkiksi työntekijän vireystilan muutokset ja työympäristö muokkautuisi tai reagoisi tarvittaessa sopivalla tavalla näihin muutoksiin. Voitaisiin esimerkiksi huomata viivästyneet reaktiot hälytystilanteessa ja automaattisesti pyrkiä nostamaan työntekijän vireystilaa tai voitaisiin tunnistaa tilanne, jossa hälytys-tyyppistä viestiä ei seuraa odotettu muutos aivosignaalissa, mistä voitaisiin edelleen päätellä, että työntekijä ei ole huomannut

hälytystä. Kuvatun kaltaisia sovelluksia visioitaessa on hyvä muistaa kysyä, olisiko tällainen jatkuva aivotoimintojen reaaliaikainen seuranta työolosuhteissa laillista tai eettisesti hyväksyttävää.

Vaikka yllä kuvatun kaltaisia, jatkuvaan mittaamiseen tähtäviä sovelluksia ei työelämän tilanteisiin kehitettäisikään, voitaisiin tuloksia hyödyntää muilla tavoin. Voitaisiin esimerkiksi kartuttaa tietoa siitä, miten nopeasti vireystila tai tarkkaavaisuus keskimäärin laskee ja käyttää tätä tietoa työvuorojen ja -taukojen suunnittelussa. Vastaavaa systeemiä voisi myös ajatella hyödynnettävän esimerkiksi autoissa tarkkailemaan kuljettajan väsymystilaa, jolloin uniselle kuskille voitaisiin antaa hälytys tai jokin piristävä ärsyke.

Yllä mainittiin vain joitain laitteiden hallintaan tarkoitettuja aivokäyttöliittymäsovelluksia, mutta ei ole vaikeaa keksiä aivokäyttöliittymäteknikkaa hyödyntäviä lukuisia uusia laitteita eri käyttötarkoituksiin. Nicolesis ja Lebedev ovat esimerkiksi esittäneet tulevaisuuden visioita aivokäyttöliittymällä toimivista laitteista, jotka hyödyttäisivät liikuntakykyisiä henkilöitä laajentamalla heidän omia motorisia kykyjään yli inhimillisten rajojen [NiL09]. Heidän mukaansa tällaisia laitteita voisivat olla esimerkiksi nanotyökalut, jotka pienen kokonsa ansiosta mahdollistaisivat toimintoja, joihin ihminen ei kykene tai vaihtoehtoisesti suuret laitteet, joiden voima tai ulottuvuus olisi moninkertainen ihmisen biologisiin kykyihin nähden.

Esimerkkeinä tällaisista voisivat olla aivokäyttöliittymän avulla hallittavat nanorobotit, joita kirurgit voisivat käyttää potilaiden verisuonten tutkimiseen ja puhdistamiseen tai suuret laivan ahtaajille kehitetyt aivokäyttöliittymänosturit, joiden tarkkuus ja tehokkuus laivan lastauksessa voitaisiin nostaa nykyistä korkeammalle tasolle. Myös vaarallisissa tehtävissä kuten sotatilanteessa olisi hyödyksi, jos voitaisiin kehittää ihmisen korvaavia robotteja, joita voisi ohjailla aivokäyttöliittymällä esimerkiksi pelastustehtävissä monimutkaisissa tiloissa ikään kuin ohjaaja olisi itse paikalla. Robotit toimisivat niiden ohjaajan ajatusten mukaan, mutta ohjaajan henki ei olisi vaarassa. Toisaalta sotilaiden ympärille voitaisiin pukea vartaloproteesi, joka kantaisi raskaat varustukset ja auttaisi sen käyttäjää esimerkiksi juoksemaan nopeammin tai kävelemään pitempiä matkoja. Yksi vartaloproteesia käyttävä sotilas voisi tällöin vastata

voimiltaan ja marssikestävyydeltään useaa tavallista sotilasta. Rauhanomaisempaan tarkoitukseen samaa sovellusta voisi hyödyntää pitkiin vaellusmatkoihin. Jos tämänkaltaiset sovellukset saataisiin toimimaan luontevasti kuin osana ihmisen omaa kehoa, tuloksena olisi kyvyiltään vaikuttavia kyborgisysteemejä.

### **2.3 Viihdesovellukset**

Aivokäyttöliittymät tuovat uusia keinoja myös muun muassa peli- [NBR09] ja elokuvakokemusten [Mar11] kehittämiseen. Tällä tutkimusalueella kehitetään aivokäyttöliittymiä, jotka mahdollistavat pelien pelaamisen pelkästään ajattelemalla tai käyttäjän mielentiloihin mukautuvien pelien ja elokuvien toteuttamisen. Pyrkimys erilaisten viihdyttävien kokemusten rikastuttamiseen onkin yksi perustelu aivokäyttöliittymien kehittämiselle.

#### **Pelien pelaaminen aivokäyttöliittymällä**

Tähän mennessä toteutetut aivokäyttöliittymäpelit ovat peliominaisuuksiltaan pääasiassa melko yksinkertaisia ja niissä on usein ideana esimerkiksi liikuttaa hahmoa tietokoneen ruudulla paikasta toiseen [FLR09]. Esimerkkinä tällaisesta on MindGame-niminen peli, jossa pelialueena toimii shakkiruudun näköinen pelialue, jonka ruuduissa sijaitsee 12 puuta sattumanvaraisessa järjestyksessä. Käyttäjän tehtävänä on liikuttaa aivokäyttöliittymän avulla pelihahmoa niin, että se käy jokaisen puun luona. Hahmon siirtäminen tapahtuu siten, että käyttäjä keskittyy katsomaan sitä puun sisältävää ruutua, jonka luo hän haluaa hahmon siirtyvän. Yhden siirron aikana jokainen ruutu, jossa sijaitsee puu, välkähdyttää peräkkäin. Vain se ruutu, jota käyttäjä on keskittynyt katsomaan, aiheuttaa aivoissa aktivaation. Aivokäyttöliittymäsovellus pystyy tämän tiedon perusteella päättelemään, mihin puuhun käyttäjä on keskittynyt ja osaa siirtää hahmon oikeaan paikkaan.

Kuvatussa pelissä käytetty tekniikka eroaa aiemmin esitellystä tekniikasta, jossa käyttäjä itse aktiivisesti tuottaa käskyn aivokäyttöliittymälle ajattelemalla esimerkiksi eri raajojensa liikuttamista. MindGame-pelissä käyttäjän ei tarvitse tietoisesti tuottaa aivoissa tietynlaista aktivaatiota, vaan ärsykkeeseen eli välkkyvään pelialueen ruutuun



keskittyminen aiheuttaa automaattisesti aivokäyttöliittymälle sen toimintaan tarvittavan syötedatan. Kumpaakin mainituista tekniikoista voi soveltaa aivokäyttöliittymäpeleihin. Käyttäjän aktiivisesti tuottamia aivosignaaleja voidaan esimerkiksi käyttää siten, että käyttäjän halutessa liikuttaa pelihahmoa vasemmalle, hän ajattelisi vasemman käden liikuttamista ja vastaavasti oikean käden liikuttamista kun haluaisi hahmon liikkuvan oikealle.

Aivokäyttöliittymän käytön vaikutusta pelikokemukseen on arvioitu muun muassa peliin uppoutumisen (immersion) astetta sekä tunnereaktioita (affect) mittaamalla yksinkertaisen tietokonepelin pelaajilta [Hak11]. Kyseisessä tutkimuksessa koehenkilöt pelasivat Mind the sheep! -nimistä peliä, jossa tehtävänä oli saada koottua niityllä laiduntavat lampaat aitaukseen käyttäen lampaiden paimentamiseen kolmea koiraa. Käyttäjä pystyi ohjaamaan koiria sekä aivokäyttöliittymällä että tavallisella käsin käytettävällä käyttöliittymällä. Käyttäjä sai itse valita haluamansa ohjaustavan ja vaihtaa ohjaustapaa pelin kuluessa mielensä mukaan.

Kuvassa 5 on nähtävissä pelin ulkoasu, jossa valkoiset hahmot ovat lampaita ja mustat hahmot koiria. Keskellä on aitaus, johon lampaat tulee kerätä.



Kuva 5: Kuvakaappaus Mind the sheep! -pelistä [Hak11].

Jokaisen pelin lopuksi koehenkilöt vastasivat kyselyyn, joka mittasi heidän kokemaansa uppoutumisen astetta ja kokemiaan tunnereaktioita [Hak11]. Tutkimuksen

lopuksi pelaajilta kysyttiin myös, kumman ohjaustavan he valitsisivat jos saisivat pelata peliä uudestaan. 17 koehenkilöstä 5 valitsi käsiohjauksen ja 12 aivokäyttöliittymäohjauksen. Kyselyn vastausten sekä ohjaustavan valintojen perusteella tutkijat päättelivät, että koehenkilöt kokivat uppoutumisen asteen jonkin verran syvemmäksi ja pelikokemuksen miellyttävämmäksi aivokäyttöliittymäohjausta käytettäessä. Kuvausta tutkimuksesta ei ilmene esimerkiksi se, vääristikö tuloksia aivokäyttöliittymän uutuuden viehätys ja hiipuisiko sen suosio pitkään jatkuvassa käytössä. Tämän häiriötekijän pois rajaamiseen tarvittaisiin pitkäaikaistutkimuksia.

Nykyiset peleihin tarkoitetut aivokäyttöliittymien prototyypit ovat tiedonvälityskapasiteetiltaan niin vaatimattomia, ettei näytä todennäköiseltä, että ne ainakaan kovin pian valtaisivat markkinoita perinteisiltä käyttöliittymiltä ainakaan kun kyse on monimutkaisista ja nopeatempoisista peleistä. Käsillä käytettävillä ohjaimilla pelihahmon liikuttaminen on nopeampaa ja tarkempaa kuin aivokäyttöliittymällä ja ne mahdollistavat kymmenien eri käskyjen antamisen pelitilanteessa toisin kuin aivokäyttöliittymät [Hak11]. Aivokäyttöliittymät eivät siten voi nykyisellään korvata esimerkiksi näppäimistöä tai hiiriohjainta ilman, että tällä olisi merkittävää negatiivista vaikutusta pelin pelattavuuteen.

Ei välttämättä olekaan tarkoituksenmukaista pyrkiä kehittämään täysin ajatuksen avulla ohjattavia pelejä. Yhtenä lähtökohdana on esitetty, että erilaisia pelien pelaamiseen käytettyjä ohjausvälineitä yhdistellään ja aivoimpulssien mittaaminen ja hyödyntäminen on vain yksi osa pelin hallintaan tähtäävää käyttöliittymäkokonaisuutta [NBR09]. Aivo-ohjailu voisi tuoda lisää haastetta ja mielenkiintoisuutta peliin, mutta samalla pelitilanteessa pystyisi hyödyntämään myös perinteisiä ohjaustekniikoita sellaisiin toimintoihin, jotka vaativat nopeiden peräkkäisten käskyjen suorittamista.

Merkittäviä sovelluskehitystä tekeviä yrityksiä on viime vuosina tullut mukaan aivokäyttöliittymäpelien alalle (muun muassa IBM, Microsoft, Sony, NeuroSky) [NBR09], joten alan kehitykselle näyttää olevan tällä hetkellä hyvät lähtökohdat. Tätä tukee myös se, että parhaillaan on kehitteillä ja prototyypiaasteella edellä kuvattuja monimutkaisempia aivokäyttöliittymäpelejä. Esimerkkinä tästä on Brainloop-aivokäyttöliittymä Google Earth -sovelluksen käyttämiseen, joka mahdollistaa kysei-

sen sovelluksen kaikkien toiminnallisuuksien (esimerkiksi kohteen valinta kartalla, zoomaus, liikkuminen haluttuun suuntaan) käyttämisen ei-invasiivisella aivokäyttöliittymällä [Sch07]. Sovelluksen toiminta perustuu käyttäjän itse tuottamien ajatusten aiheuttamien aivosignaalien mittaukseen EEG-päähineellä. Käyttäjä näkee ruudulla komentopainikkeita, joiden avulla sovellusta käytetään. Käyttäjä pystyy esimerkiksi valitsemaan listasta, mitä maanosaa hän haluaa tarkastella ja sen jälkeen mihin maahan ja kaupunkiin hän haluaa zoomata näkymän. Sen sijaan, että käyttäjä tekisi nämä valinnat käyttäen hiirtä ohjaimenaan, hän tekeekin valinnat siirtämällä ruudulla näkyvää kursoria haluamansa komentopainikkeen kohdalle. Jos hän haluaa esimerkiksi siirtyä maanosalistassa eteenpäin, hänen tulee ajatella jalkojensa liikuttamista. Kun kursori on listassa halutun maanosan kohdalla, tulee käyttäjän ajatella vasemman käntensä liikuttamista, jolloin kamera zoomautuu valittuun maanosaan.

Kartan selailu kuvatunlaisella aivokäyttöliittymällä vaikuttaa vaivalloiselta verrattuna käsiohjattavaan versioon. Tällaisenaan sovellus olisikin mielekäs henkilöille, jotka eivät pysty käyttämään hiirtä tai näppäimistöä. Sovellus voisi olla kiinnostava laajemmalle käyttäjäkunnalle jos sitä pystyttäisiin kehittämään niin, että käyttäjän ei tarvitsisi tehdä zoomausta viemällä kursoria jonkin tätä varten olemassa olevan toimintopainikkeen päälle. Jos zoomaus voisi tapahtua luonnollisemmin esimerkiksi pelkäämään ajatteleamalla maanosaa kuten Afrikka, käytön sujuvuus parantuisi. Tällä hetkellä ei kuitenkaan pystytä aivosignaaleista erottelemaan näin hienovaraisia ajatuksia.

Toinen esimerkki tavallista monimutkaisemmasta aivokäyttöliittymäpelistä on aivokäyttöliittymäteknikkaa hyödyntävä versio suositusta The World of Warcraft -roolipelistä [Sch11], jolla pelaaja voi käyttää ei-invasiivisen aivokäyttöliittymän avulla rajattua määrää pelin toiminnoista kuten navigointia pelin virtuaalimaailmassa. Pelaaja pystyy liikuttamaan pelihahmoaan, vuorovaikuttamaan virtuaaliympäristön kanssa, suorittamaan erilaisia peliin liittyviä tehtäviä ja kehittämään hahmonsa ominaisuuksia aivokäyttöliittymän avulla. Normaalin näppäimistö- ja hiiriohjauksen sijaan käyttäjä liikuttaa hahmoa vasemmalle, oikealle tai eteen ajatteleamalla vasemman käden, oikean käden tai jalkojen liikuttamista. Tietyt toiminnot, kuten toisen pelaajan hyväksyminen pelikaveriksi, tapahtuvat pysähtymällä kyseisen toiminnon suorituspaikalle hetkeksi, jolloin toiminto suoritetaan automaattisesti.

Tutkijat eivät tuo artikkelissaan esiin, mitä lisäarvoa aivo-ohjaus heidän mielestään tuo peliin esimerkiksi terveen käyttäjän näkökulmasta vaan tyytyvät toteamaan, että kehitystyö jatkuu. Tutkimuksen arvona näyttäytyy lähinnä se, että pystyttiin osoittamaan aivokäyttöliittymän soveltuvan tietyn pelin pelaamiseen rajatuin osin. Liikuntarajoitteisille henkilöille käyttöliittymän hyöty on ilmeinen: aivokäyttöliittymän avulla he voivat päästä pelaamaan, mikä ei muuten olisi mahdollista. Liikuntakykyiselle ihmiselle pelin haastavuuden lisääntymistä voi pitää yhtenä positiivisena piirteenä, jonka aivokäyttöliittymä tuo pelikokemukseen. Uusi ohjaustapa mahdollistaa myös sen, että pelitilanteessa pystyy tekemään enemmän rinnakkaisia toimintoja kuin aiemmin. Aivo-ohjaus tuo pelin hallintaan ikään kuin "yhden käden lisää", jolloin myös pelitilanteessa hallittavia tekijöitä voidaan lisätä. Esimerkiksi taistelupelissä käytettävän aseiden vaihtaminen voisi hoitua aivo-ohjauksella, minkä ansiosta kädet vapautuisivat tästä tehtävästä johonkin muuhun. Tällöin haasteeksi tulee se, miten valitaan aivo-ohjauksessa käytettävät ajatukset siten, etteivät esimerkiksi näppäimistön käytöstä aiheutuvat aivosignaalit sotke niitä. Ongelman voisi kiertää esimerkiksi niin, että aivokäyttöliittymää käytettäisiin ajattelemalla jalkojen liikuttamista, jolloin samaan aikaan suoritettavat käsien liikkeet eivät sotkisi signaalia.

### **Pelin ja elokuvan mukautuminen käyttäjän mielentiloihin**

On myös tutkittu mahdollisuutta hyödyntää aivokäyttöliittymäteknikka niin, että mittaamalla aivoista tietokonepelin pelaajan mielentilaa, voitaisiin pelin kulku muokata reaaliaikaisesti mielentilaan parhaiten sopivaksi [NiT07]. Käyttäjälle pystyttäisiin tällä tavalla luomaan yksilöllinen ja mahdollisimman miellyttävä pelikokemus, joka sopeutuisi henkilön kulloiseenkin mielentilaan.

Tätä tekniikkaa voisi hyödyntää esimerkiksi niin, että jos pelin pelaaja olisi tylsistynyt, voitaisiin pelin vaikeustasoa tai tempoa muuttaa siten, että pelaaja kokisi sen taas mielenkiintoiseksi. Mielentilan mittaamista ja hyödyntämistä on kokeiltu NeuroWander-nimisessä pelissä, jonka juoni perustuu Grimmin veljesten Hannu ja Kerttu -satuun [YKK10]. Ideana on liikkua ja suorittaa tehtäviä virtuaalisessa ympäristössä. Samalla pelaajan aivosignaalejaan mitataan EEG-päähineellä ja tulkitaan signaalin

perusteella tarkkaavaisuuden tasoaan. Pelaaja suorittaa tehtäviä muuntamalla tarkkaavaisuuden tasoaan. Esimerkiksi sadussa esiintyvä noita saadaan tönäistyä uuniin kun pelaajan tarkkaavaisuuden taso ylittää tietyn raja-arvon. Tämä pelitoteutus osoittaa sen, että ainakin tarkkaavaisuuden tasoa pystytään mittaamaan ei-invasiivisella menetelmällä.

Kiinnostavaa on myös kuvitella katsovansa elokuvaa, jonka juoni ja kulku kehittyvät reaaliajassa katselijan mielenliikkeiden mukaan. Jos hänen mielentilansa vajoaisi turhan surulliseksi tai masentuneeksi, voisi elokuvan loppu olla onnellinen. Jos kauhuelokuva ei näyttäisi tehoavan katsojaan, voitaisiin pelottavaa musiikkia tai tapahtumia lisätä tai toisaalta pelokkaan katsojan kohdalla saatettaisiin lieventää jännitystä niin, ettei hän kokisi oloaan liian epämukavaksi.

Mielentilaan mukautuvasta elokuvasta on esitetty prototyyppi, jossa lyhyt animaatioelokuva sisältää alkuosan ja kaksi vaihtoehtoista loppuosaa, joista aivokäyttöliittymäsysteemi valitsee jommankumman esitettäväksi [Mar11]. Valinta tapahtuu aivoista mitatun tarkkaavaisuuden asteen perusteella, kuten NeuroWader-pelissä. Käyttäjä tavallaan käsikirjoittaa elokuvan kulun alitajuisesti ja reaaliaikaisesti. Tutkijat esittävät, että tällainen elokuvaelämys toisi mielenkiintoista vuorovaikutusta katselijan ja elokuvan välille, ja että sitä voisi soveltaa tulevaisuudessa kokopitkiin elokuviin, tv-ohjelmiin ja videotaiteeseen.

Kuvatun prototyypin kuvauksen perusteella kyseessä on vielä kaupalliseen jakeluun soveltumaton malli ja enemmänkin tulevaisuuden mahdollisuuksien visiointi. Tämä näyttää pätevän yleisestikin mielentilan seurantaan perustuviin aivokäyttöliittymiin.

### **Toteutuksen haasteita**

Alan tutkijoiden tavoitteena on jatkaa kehitystyötä niin, että tulevaisuudessa pystyttäisiin toteuttamaan monimutkaisempia aivokäyttöliittymäteknologiaa hyödyntäviä pelejä, mutta käytännön toteutukseen liittyy monia ongelmia [NiT07]. Terveille henkilöille suunniteltavat aivokäyttöliittymät eivät voi perustua invasiivisiin menetelmiin, joissa mittalaitteita asennetaan kallon sisään [NBR09]. Ei-invasiiviset menetelmät taas

ovat mittaustarkkuudeltaan huonompia kuin invasiiviset, mikä tarkoittaa epätarkempaa signaalia aivoista aivokäyttöliittymäsovellukseen [LeN06]. Nykyisillä tekniikoilla toteutetut peliprototyypit pystyvät erottamaan aivoista korkeintaan muutaman eri tilan, kuten sen, että käyttäjä ajattelee vasemman tai oikean käden liikuttamista [Lot11]. Näin vähäisellä tietomäärällä ei pystytä suorittamaan kovin monimutkaisia käskyjä pelitilanteessa vaan käskyt ovat esimerkiksi yksinkertaisia valintoja kuten kävelysuunnan valitseminen (käännös vasemmalle/oikealle) tai taistelupelissä käytetyn aseiden vaihtaminen toiseen (valitaan aselistasta tietty vaihtoehto).

Ei myöskään ole tarkoituksenmukaista sitoa pelaajaa paikoilleen niin, ettei tämä pysty liikkumaan pelin aikana tai muutenkaan rajoittaa pelaajan liikkeitä ja ajatuksia. Kun käyttäjän pitää saada esimerkiksi liikuttaa päätään vapaasti, pään liikkeet saattavat aiheuttavat mitattuun signaaliin ylimääräisiä impulsseja, jota kutsutaan taustakohinaksi [LeN06]. Tämä taas vaikeuttaa käyttäjän sovellukselle antamien käskyjen tunnistamista. Nykyiset peliprototyypit vaativat toimiakseen sen, että käyttäjä istuu paikoillaan melko staattisessa asennossa [Lot11].

Kolmantena haasteena on aivokäyttöliittymän käyttäjäkohtaiseen kalibrointiin tarvittava aika [Lot11]. Nykyään peliprototyypit vaativat yleensä noin 5-20 minuutin kalibroinnin ennen kuin pelaaminen voidaan aloittaa. Kalibroinnissa aivokäyttöliittymä opetetaan tunnistamaan tietyn käyttäjän yksilölliset aivosignaalit, jotta se osaisi tulkita niitä mahdollisimman tehokkaasti. Näin pitkä kalibrointiaika saattaa olla käyttäjien mielestä turhauttava.

Neljäs huono puoli on mittalaitteiden epäkäytännöllisyys [Lot11]. Nykyisissä pelisovelluksissa aivosignaalin mittauksen suorittavan EEG-päähineen toiminta vaatii sen, että ihoa vasten sijoitettavat elektrodit pitää voidella geelimäisellä aineella sähkönjohtavuuden parantamiseksi. Arkikäytössä tämä on epäkäytännöllistä, koska päähän ja mittalaite pitäisi puhdistaa aina pelaamisen jälkeen.

Vaikka teknisiä haasteita on, hyötynä aivokäyttöliittymäpelien suunnittelussa verrattuna lääketieteellisten sovellusten suunnitteluun on se, että kohderyhmänä ovat terveet ihmiset eikä suunnittelussa siten tarvitse ottaa huomioon käyttäjien vakavia sairauk-

sia, kuten suunniteltaessa aivokäyttöliittymiä esimerkiksi ALS- tai aivohalvauspotilaille [Wol99]. Monet vammat ja sairaudet aiheuttavat aivotoiminnassa muutoksia, jotka pitää ottaa huomioon aivokäyttöliittymiä suunniteltaessa. Esimerkki tällaisesta muutoksesta on aivohalvauspotilaan aivoissa olevat kudosaauriot eli tuhoutuneet aivojen alueet. Signaalien mittaus tällaisilta alueilta tuottaa erilaista dataa kuin vastaava mittaus aivoista, jotka eivät ole vaurioituneet. Tällaisia muutoksia ei tarvitse huomioida, kun sovelluksia suunnitellaan terveille.

On myös hyvä huomata, että viihdekäyttöön suunnattujen aivokäyttöliittymäsovellusten päämäärät ja niille asetetut vaatimukset poikkeavat edellä kuvattujen lääketieteellisten sovellusten vaatimuksista ja tavoitteista. Liikuntarajoitteisille henkilöille suunnattujen, aivokäyttöliittymäteknikkaa hyödyntävien sovellusten on oltava pelkästään aivotoimintaan perustuvia "puhtaita" aivokäyttöliittymiä, koska käyttäjät eivät kykene tuottamaan kehon liikkeitä. Terveille suunnatuissa sovelluksissa ei ole pakko perustaa sovelluksen toimintaa pelkästään aivokäyttöliittymäteknikkaan, vaan samassa sovelluksessa voidaan käyttää hyödyksi useita eri tekniikoita kuten näppäimistöä tai hiihriohjainta, jolloin toimivan ja käytännöllisen sovelluksen toteuttaminen on helpompaa. Pelisovelluksissa korostuu siten aivokäyttöliittymän hyödyntäminen yhtenä monista pelitilanteesta käytettävistä modaaliteeteista ja toisaalta se, miten aivokäyttöliittymäteknikalla onnistutaan vaikuttamaan pelikokemukseen [Hak11].

### **3 Aivojen rakenteesta**

#### ***3.1 Hermosolun rakenne ja hermoimpulssin kulku***

#### ***3.2 Aivokuoren rakenne ja erikoistuneisuus***

#### ***3.3 Hermosolujen yhteistyön periaatteet***

**Hajautetun koodauksen periaate (the distributed coding principle)**

**Yksittäisen hermosolun riittämättömyyden periaate (the single-neuron in-**

sufficiency principle)

**Hermosolujen moniajoperiaate (the neuronal multitasking principle)**

**Hermosolujen massaefektiperiaate (the neuronal mass effect principle)**

**Hermosolujen rappeutumisperiaate (the neural degeneracy principle)**

**Plastisuuden periaate (the plasticity principle)**

**Impulssitaajuuden pysyvyyden periaate (the conservation of firing principle)**

**Asiayhteyden periaate (the context principle)**

## **4 Aivokäyttöliittymien toteutusperiaatteet**

### *4.1 Erilaiset aivosignaalityypit*

### *4.2 Aivotoiminnan mittaaminen*

**Ei-invasiiviset mittausmenetelmät**

**Invasiiviset mittausmenetelmät**

**Mittauksen haasteet**

**Invasiiviset vs. ei-invasiiviset aivokäyttöliittymät**

### *4.3 Mittaustulosten käsittely ja tulkinta*

**Mitatun datan suodatus**

**Piirteiden erottelu**

**Signaalin luokittelu**

**Käskyn anto kohdesovellukselle**



#### ***4.4 Käyttäjän ja koneen rooli aivokäyttöliittymien toiminnassa***

**Käyttäjän oppiminen ja mukautuminen aivokäyttöliittymään**

**Käyttäjän suoriutumiseen vaikuttavat tekijät**

**Aivokäyttöliittymän mukautuminen käyttäjän aivosignaaleihin**

#### ***4.5 Hybridiaivokäyttöliittymät***

### **5 Aivokäyttöliittymien kohderyhmät**

#### ***5.1 Potentiaaliset kohderyhmät***

#### ***5.2 Eriasteisesti vammautuneet henkilöt käyttäjinä***

#### ***5.3 Terveet ihmiset käyttäjinä***

#### ***5.4 Aivokäyttöliittymien sopivuus eri käyttäjäryhmille***

### **6 ALS-potilaan haastattelu**

#### ***6.1 Haastattelun tavoite***

#### ***6.2 Haastattelun toteutus***

#### ***6.3 Haastatteluaineiston sisältöanalyysi***

**Haastatteluvastausten analyysi**

## **Haastatteluvastausten ja teorian vertailu**

### ***6.4 Tulosten merkitys ja jatkotutkimuskohteet***

#### **Tulosten kriittinen tarkastelu**

#### **Uuden näkökulman esilletulo**

#### **Ehdotukset jatkotutkimukselle**

## **7 Yhteenveto**

Vuonna 1999 pidetyssä ensimmäisessä aivokäyttöliittymätutkijoiden kansainvälisessä tapaamisessa asetetun määritelmän mukaan aivokäyttöliittymä on kommunikointisysteemi, jonka toiminta ei ole riippuvainen ääreishermostosta ja lihaksista. Aivokäyttöliittymätutkimus on mahdollisuuksia täynnä oleva tutkimusala, jonka käytännön sovellukset voivat parantaa monien liikuntarajoitteisten tai erilaisista lääketieteellisistä häiriöistä kärsivien ihmisten elämänlaatua ja toisaalta voivat tuoda terveille ihmisille viihde- ja hyötykäyttöön tarkoitettuja uudenlaisia sovelluksia.

Aivokäyttöliittymäsovellukset voidaan luokitella muun muassa sen mukaan, tehdäänkö aivosignaalien mittaus kallon ulkopuolelta ei-invasiivisesti vai kallon sisältä invasiivisesti. Invasiiviset menetelmät ovat tiedonvälityskapasiteetiltaan ja mittaustarkkuudeltaan hyviä, mutta niiden käyttöön liittyy terveysriskejä. Ei-invasiivisten menetelmien tiedonvälityskapasiteetti ja mittaustarkkuus on invasiivisia huonompi, mutta ne ovat turvallisia ja edullisia ja tarjoavat puutteistaan huolimatta perustan toimivien aivokäyttöliittymien toteuttamiseen. Sopivimman mittaustavan valinta riippuu toteutettavalta sovellukselta vaadittavista ominaisuuksista samoin kuin kohderyhmästä, jolle sitä ollaan kehittämässä.

Aivokäyttöliittymäsovellusten käyttäjät voidaan luokitella kahteen ryhmään: terveisiin sekä jostain lääketieteellisestä häiriöstä kärsiviin henkilöihin. Invasiiviset aivokäyttöliittymät soveltuvat ainoastaan vakavasti sairaille tai vammautuneille, koska niiden

käyttöön liittyy terveysriskejä. Ei-invasiiviset menetelmät soveltuvat yleensä sekä terveille että vammautuneille.

Aivokäyttöliittymän määritelmää täysin noudattavia sovelluksia kannattaa suunnitella liikuntarajoitteista tai vakavista lääketieteellisistä häiriöistä kärsiville henkilöille. Nämä kohderyhmät pystyvät hyötymään invasiivisista menetelmistä ja ovat motivoituneita käyttämään myös sellaisia ei-invasiivisia menetelmiä, joiden ominaisuudet terveet ihmiset saattavat kokea riittämättömänä perinteisiin käyttöliittymiin nähden. Aivokäyttöliittymän määritelmän mukaisia terveille ihmisille sopivia sovelluksia ovat sellaiset, joissa käyttäjä on passiivinen eikä itse anna käskyjä aivokäyttöliittymän kautta. Tällaisissa sovelluksissa ainoastaan seurataan käyttäjän aivotoimintaa ja käytetään tätä tietoa hyödyksi.

Sen sijaan terveille käyttäjille suunnatuissa sovelluksissa, joissa käyttäjä on aktiivinen toimija ja antaa käskyjä, aivokäyttöliittymätekniikkaa ei ole kannattavaa hyödyntää ainoana käyttöliittymärajpintana, kuten määritelmä edellyttäisi. Perinteiset käyttöliittymätekniikat ovat toimivuudeltaan vielä ylivoimaisia eikä ei-invasiivista aivokäyttöliittymätekniikoista ole vielä niiden korvaajiksi. Sen sijaan aivokäyttöliittymätekniikkaa voidaan tällä sovellusalueella käyttää yhtenä modaaliteettina muiden käyttöliittymätekniikoiden rinnalla rikastamassa sovelluskokonaisuutta. Tällainen käyttöliittymä ei kuitenkaan noudata aivokäyttöliittymän määritelmää kirjaimellisesti.

Tämän tutkielman kartoittamat aivokäyttöliittymätutkimuksen osa-alueet eivät kata koko tutkimusalan ongelmakenttää. Esimerkiksi signaalien käsittelyn yksityiskohdat on rajattu käsittelyn ulkopuolelle. Tutkielma tarjoaa kuitenkin lähtökohdan tutkimusalaan tutustumiseen ja keskeisten aiheiden hahmottamiseen. Tutkimusalan monitieteisen luonteen ja sen nuoruuden vuoksi alan julkaistu materiaali on sirpaleista ja eri julkaisujen tulokset ovat vaikeasti vertailtavissa. Tutkijat painivat vielä perustutkimuksen äärellä. Ainakaan vielä ei voida tutkimustiedon perusteella lausua mustavalkoisia totuuksia eri tekniikoiden paremmuudesta tai kohderyhmien lupaavuudesta. Kuolleet tutkimussuunnat ovat vielä löytämättä tai niitä ei ainakaan tunnistettu tämän tutkielman aineiston perusteella.

Tutkijoiden tavoitteena on kehittää entistä tarkempia, tehokkaampia ja käyttäjäystävällisempiä aivokäyttöliittymiä. Vaikka tässä tutkielmassa kuvattujen tutkimusten tulokset ovat kannustavia jatkotutkimusta ajatellen, pitkittäistutkimukset, suuremmat otoskoot ja tutkimusten toistot ovat tarpeen, jotta alan tutkimustulosten luotettavuus ja yleistettävyyden varmistetaan. Tarvitaan myös kokeita, jotka sijoittuvat todelliseen käyttöympäristöön, jossa kuvaan astuvat erilaiset ympäristön häiriötekijät, joiden vaikutus käyttäjän suoriutumiseen tulisi kartoittaa.

Ihmisen solutason aivotoiminnan entistä syvempi ymmärrys on yhtenä tärkeänä haasteena alan tutkijoille. Kun aivojen toimintaa ymmärretään paremmin, sen monipuolisempi mittaaminen ja tulkitseminen tulee samalla mahdolliseksi. Haasteena ovat myös invasiivisten mittausten kehitys siten, että niistä saadaan täysin langattomia ja liikuteltavia sekä vuosia kestävästi käyttöön soveltuvia.

Yleistykseen ja saavuttaakseen laajan suosion ei-invasiivista mittauksista hyödyntäviä aivokäyttöliittymäsovelluksia taas olisi kehitettävä niin, että niiden käyttönopeus ja mittauksen tarkkuus lähenisivät invasiivisten menetelmien tasoa. Tällöin niiden potentiaalia erilaisten sovellusten perustaksi saataisiin kasvatettua. Tämän tavoitteen saavuttamisessa ratkaisevaa on onnistua kehittämään sellaisia aivosignaalien tulkinta-algoritmeja, joiden avulla signaalit on mahdollista erottaa toisistaan entistä tehokkaammin.

## Lähteet

- All10 Allison, B., Lüth, T., Valbuena, D., Teymourian, A., Volosyak, I. ja Gräser, A., BCI demographics: How many (and what kinds of) people can use an SSVEP BCI?. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* , 18, 2, huhtikuu 2010, sivut 107-116. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5382578>, 21.04.2012].
- BiC07 Birbaumer, N. ja Cohen, L.G., Brain-computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis. *The Journal of Physiology*, 579, 3, maaliskuu 2007, sivut 621-636. [Myös <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/jphysiol.2006.125633/pdf>, 29.04.2012].
- Bir05 Birbaumer, N., Veit, R., Lotze, M., Erb, M., Hermann, C., Grodd, W. ja Flor, H., Deficient fear conditioning in psychopathy. *Arch Gen Psychiatry*, 62, 7, heinäkuu 2005, sivut 799-805. [Myös <http://archpsyc.jamanetwork.com/data/Journals/Psych/5222/yoa40213.pdf>, 09.01.2013].
- BiS10 Birbaumer, N. ja Sauseng, P., Brain-computer interface in neurorehabilitation. *Brain-Computer Interfaces*, Springer Berlin Heidelberg, lokakuu 2010, sivut 155-169. [Myös <http://www.springerlink.com/content/17102147q008m625/fulltext.pdf>, 29.04.2012].
- Bla03 Blankertz, B., Dornhege, G., Schäfer, C., Krepki, R., Kohlmorgen, J., Müller, K.-R., Kunzmann, V., Losch, F. ja Curio, G., Boosting bit rates and error detection for the classification of fast-paced motor commands based on single-trial EEG analysis, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11, 2, kesäkuu 2003, sivut 127-

131. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1214700&tag=1>, 13.08.2012].
- Car12a Carlson, T., Leeb, R., Monnard, G., Al-Khodairy, A. ja Millan, J.R., Driving a BCI wheelchair: A patient case study. *TOBI Workshop III: Bringing BCIs to End-Users: Facing the Challenge*. Würzburg, Saksa, 2012, sivut 59-60. [Myös <http://infoscience.epfl.ch/record/174373/files/CarlsonLeMoAlMi12.pdf>, 09.01.2013].
- Car12b Carrino, F., Dumoulin, J., Mugellini, E., Khaled, O.A. ja Ingold, R., A self-paced BCI system to control an electric wheelchair: Evaluation of a commercial, low-cost EEG device. *2012 ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference: Biosignals and Robotics for Better and Safer Living*, Fribourg, Itävalta, sivut 1-6. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6222185>, 09.01.2013].
- Cin08 Cincotti, F., Mattia, D., Aloise, F., Bufalari, S., Schalk, G., Oriolo, G., Cherubini, A., Marciani, M. G. ja Babiloni, F., Non-invasive brain-computer interface system: Toward its application as assistive technology. *Brain research bulletin, Special Issue: Robotics and Neuroscience*, issue 6, elokuu 2008, sivut 769–803. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0361923008000142>, 06.05.2012].
- CuS02 Currana, E.A. ja Stokes, M.J., Learning to control brain activity: A review of the production and control of EEG components for driving brain-computer interface (BCI) systems. *Brain and Cognition*, 51, 3, huhtikuu 2003, sivut 326-336. [Myös, <http://hossein69.persianguig.com/sdarticle.pdf>, 11.04.2012].
- Exo12 Twenten yliopiston MINDWALKER-projektin internetsivusto, joka

- esittelee aivokäyttöliittymällä ohjattavien vartalo-protteesien tutkimusta. Twenten yliopisto, Alankomaat, lokakuu 2012. [<https://mindwalker-project.eu/>, 15.12.2012].
- Faz12 Fazli, S., Mehnert, J., Steinbrink, J., Curio, G., Villringer, A., Müller, K.-R. ja Blankertz, B., Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface. *NeuroImage*, 59, 1, tammikuu 2012, sivut 519-529. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811911008792>, 17.05.2012].
- Fet69 Fetz, E.E., Operant conditioning of cortical unit activity. *Science* 28, 163, 3870, helmikuu 1969, sivut 955-958. [Myös <http://e.guignon.free.fr/rsc/article/Fetz69.pdf>, 21.04.2012].
- FLR09 Finke, A., Lenhardt, A. ja Ritter, H., The Mind Game: A P300-based brain-computer interface game. *Neural Networks*, 22, 2009, sivut 1329–1333. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608009001579>, 11.04.2012].
- Fuc03 Fuchs, T., Birbaumer, N., Lutzenberger, W., Gruzelier, J. H. ja Kaiser, J., Neurofeedback treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder in children: A comparison with methylphenidate. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 28, 1, maaliskuu 2003, sivut 1–12. [Myös <http://www.springerlink.com/content/r431772151245355/fulltext.pdf>, 22.07.2012].
- GAG07 Graigmann, B., Allison, B. ja Gräser, A., New applications for non-invasive brain-computer interfaces and the need for engaging training environments. *ACE'07 Workshop of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, Salzburg, Itävalta, 2007, sivut 25-28. [Myös [http://hmi.ewi.utwente.nl/brainplay07\\_files/brainplay07\\_proceedings.pdf#p](http://hmi.ewi.utwente.nl/brainplay07_files/brainplay07_proceedings.pdf#p)

age=33, 29.04.2012].

- Gal08 Galán, F., Nuttin, M., Lew, E., Ferrez, P. W., Vanacker, G. ja Millán, J. del R., A brain-actuated wheelchair: asynchronous and non-invasive brain-computer interfaces for continuous control of robots. *Clinical Neurophysiology*, 119, 9, syyskuu 2008, sivut 2159-2169. [Myös [http://infoscience.epfl.ch/record/137245/files/millan\\_clin-neurophysiol08.pdf?version=2](http://infoscience.epfl.ch/record/137245/files/millan_clin-neurophysiol08.pdf?version=2), 06.05.2012].
- Gen09 Gentiletti, G.G., Gebhart, J. G., Acevedo, R. C., Yáñez-Suárez, O. ja Medina-Bañuelos, V., Command of simulated wheelchair on a virtual environment using brain-computer interface. *Ingénierie et Recherche BioMédicale*, 30, 2009, sivut 218-225. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1959031809001122#>, 27.09.2012].
- Goo05 Goo, J., Suh, D., Cho, H. S., Park, K. S. ja Hahn, M., A BCI based virtual control testbed for motion disabled people. *Proceedings of ACM Conference Augmented tele-existence*, Christchurch, Uusi-Seelanti, 2005, sivu 283. [Myös [http://portal.acm.org/ft\\_gateway.cfm?id=1152473&type=pdf&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=35872832&CFTOKEN=83254061](http://portal.acm.org/ft_gateway.cfm?id=1152473&type=pdf&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=35872832&CFTOKEN=83254061), 08.04.2012].
- Gug09 Guger, C., Daban, S., Sellers, E., Holzner, C., Krausz, G., Carabalona, R., Gramatica, F. ja Edlinger, G., How many people are able to control a P300-based brain-computer interface (BCI)?. *Neuroscience Letters*, 462, 1, syyskuu 2009, sivut 94-98. [Myös [http://etsu.edu/cas/bcilab/documents/Guger\\_etal\\_2009\\_.pdf](http://etsu.edu/cas/bcilab/documents/Guger_etal_2009_.pdf), 11.04.2012].
- HaE10 Hazrati, M.K. ja Erfanian, A., An online EEG-based brain-computer interface for controlling hand grasp using an adaptive probabilistic



- neural network. *Medical Engineering & Physics*, 32, 7, syyskuu 2010, sivut 730-739. [Myös <http://194.225.230.88/files/intc/pages/papers/walker4/1.pdf>, 06.05.2012].
- Hak11 Hakvoort, G., Gürkök, H., Bos, D. P.-O., Obbink, M. ja Poel, M., Measuring immersion and affect in a brain-computer interface game. *Proceedings of INTERACT 2011*, Lissabon, Portugali, syyskuu 2011, sivut 115-128. [Myös <http://www.springerlink.com/content/e42576731208168p/fulltext.pdf>, 05.05.2012].
- Ham12 Hammer, E. M., Halder, S., Blankertz, B., Sannelli, C., Dickhaus, T., Kleih, S., Müller, K.-R. ja Kübler, A., Psychological predictors of SMR-BCI performance. *Biological Psychology*, 89, 2012, sivut 80-86. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301051111002407>, 11.04.2012].
- Hoc06 Hochberg, L.R., Serruya, M. D., Friehs, G. M., Mukand, J. A., Saleh, M., Caplan, A. H., Branner, A., Chen, D., Penn, R. D. ja Donoghue, J. P., Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature*, 442, sivut 164-171, heinäkuu 2006. [Myös <http://www.nature.com/nature/journal/v442/n7099/pdf/nature04970.pdf>, 25.07.2012].
- Hoc12 Hochberg, L. R., Bacher, D., Jarosiewicz, B., Masse, N. Y., Simeral, J. D., Vogel, J., Haddadin, S., Liu, J., Cash, S. S., Smagt, P. ja Donoghue, H. P., Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. *Nature*, 485, sivut 372-375, toukokuu 2012. [Myös <http://211.144.68.84:9998/91keshi/Public/File/34/485-7398/pdf/nature11076.pdf>, 29.12.2012]
- HUS07 Helsingin ja uudenmaan sairaanhoitopiirin verkkosivu, jossa kuvataan

ALS-taudin taudinkuva. [[www.hus.fi/default.asp?path=1,32,660,548,2718,5928,16443](http://www.hus.fi/default.asp?path=1,32,660,548,2718,5928,16443), 30.07.2012].

- Ike11 Ikegami, S., Takano, K., Naokatsu, S. ja Kansaku, K., Operation of a P300-based brain-computer interface by individuals with cervical spinal cord injury. *Clinical Neurophysiology*, 122, 5, toukokuu 2011, sivut 991-996. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388245710006656>, 11.04.2012].
- Kal07 Kalat J. W., *Biological Psychology*. Thomson Wadsworth, Kanada, 2007.
- Kar06 Karim, A. A., Hinterberger, T., Richter, J., Mellinger, J., Neumann, N., Flor, H., Kübler, A. ja Birbaumer, N., Computer control using human intracortical local field potentials. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 20, 4, sivut 508–515. [Myös <http://www.rein-art.be/Images/Fmri/NeuralInternet.pdf>, 10.04.2012].
- Kau07 Kauhanen, L., Jylänki, P., Lehtonen, J., Rantanen, P., Alaranta, H. ja Sams, M., EEG-based brain-computer interface for tetraplegics. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2007, artikkeli-ID 23864, elokuu 2007, sivut 1–11. [Myös <http://www.hindawi.com/journals/cin/2007/023864/abs/>, 27.09.2012].
- KM13 KM, Sähköpostitse tehty haastattelu xx.xx.2013.**
- Ken00 Kennedy, P.R., Bakay, R. A. E., Moore, M. M., Adams, K. ja Goldwaithe, J., Direct control of a computer from the human central nervous system. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8, 2, kesäkuu 2000, sivut 198–202. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/86/18398/00847815.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=847815>, 11.04.2012].

- LeN06 Lebedev, M.A ja Nicoletis, M.A.L., Brain-machine interfaces: past, present and future. *Trends in Neuroscience*, 29, 9, syyskuu 2006, sivut 536–546. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166223606001470>, 15.04.2012].
- Li11 Li, K., Raju, V. N., Sankar, R., Arbel, Y. ja Donchin, E., Advances and challenges in signal analysis for single-trial P300-BCI. *Proceedings of Foundations of Augmented Cognition. Directing the Future of Adaptive Systems 6<sup>th</sup> International Conference, FAC 2011, Held as Part of HCI International 2011*, Orlando, FL, Yhdysvallat, Heinäkuu 2011, 6780/201 1, sivut 87–94. [Myös <http://www.springerlink.com/content/n1302838231852x2/fulltext.pdf>, 30.07.2012].
- Lot11 Lotte, F., Brain-computer interfaces for 3D games: hype or hope?. *Proceedings of the International Conference on the Foundations of Digital Games (FDG'2011)*, Bordeaux, Ranska, 2011, sivut 325–327. [Myös <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/59/15/74/PDF/fdg2011.pdf>, 13.08.2012].
- Lohko AllRefer.com: Health/Pictures & Images. Lääketieteellisen tiedon hakemistona toimiva verkkosivu. [<http://health.allrefer.com/pictures-images/lobes-of-the-brain.html>, 08.07.2012].
- Mar11 Marchesi, M., Farella, E., Riccò, B. ja Guidazzoli, A., MOBIE: a movie brain interactive editor. *Proceedings ACM SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies*, Hong Kong, Kiina, joulukuu 2011. [Myös <http://delivery.acm.org/10.1145/2080000/2073385/a16-marchesi.pdf?ip=128.214.2.140&acc=ACT>

IVE%20SERVICE&CFID=78395330&CFTOKEN=13805845&\_\_acm\_\_=1335033170\_2c25525162a0a8e891f9813533cfb4e8, 27.09.2012].

- Mil03 Millán, J. R., Adaptive brain interfaces. *Communications of the ACM*, 46, 3, maa-liskuu 2003, sivut 74–80. [Myös [http://delivery.acm.org/10.1145/640000/636773/p74-millan.pdf?ip=128.214.2.139&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=96645445&CFTOKEN=27245992&\\_\\_acm\\_\\_=1334081936\\_619c1beaebc8c251badf5a4310631d53,](http://delivery.acm.org/10.1145/640000/636773/p74-millan.pdf?ip=128.214.2.139&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=96645445&CFTOKEN=27245992&__acm__=1334081936_619c1beaebc8c251badf5a4310631d53,) 10.04.2012].
- MiM03 Millán, J.R. ja Mouriño, J., Asynchronous BCI and Local Neural Classifiers: An Overview of the Adaptive Brain Interface Project. *IEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 11, 2, kesäkuu 2003. [Myös <https://www.vpn.helsinki.fi/~tanjaja/BCI/,DanaInfo=www-2.cs.cmu.edu,SSO=U+ABI2003.pdf,> 09.01.2013].
- MoK00 Moore, M. M. ja Kennedy, P. R., Human factors issues in the neural signals direct brain-computer interface. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International ACM Conference on Assistive Technologies*, Arlington, Virginia, Yhdysvallat, 2000, sivut 114–120. [Myös [http://delivery.acm.org/10.1145/360000/354351/p114-moore.pdf?ip=128.214.2.139&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=96645445&CFTOKEN=27245992&\\_\\_acm\\_\\_=1334081597\\_12c3a4100d470bb58637fd39a9924b51,](http://delivery.acm.org/10.1145/360000/354351/p114-moore.pdf?ip=128.214.2.139&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=96645445&CFTOKEN=27245992&__acm__=1334081597_12c3a4100d470bb58637fd39a9924b51,) 10.04.2012].
- Mor10 Moran, D., Evolution of brain-computer interface: action potentials, local field potentials and electrocorticograms. *Current Opinion in Neurobiology*, 20, 6, joulukuu 2010, sivut 741-745. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pi>

i/S0959438810001789, 06.05.2012].

- Mül08 Müller, K.-B., Tangermann, M., Dornhege, G., Kraudelat, M., Curio, G. ja Blankertz, B., Machine learning for real-time single-trial EEG-analysis: From brain-computer interfacing to mental state monitoring. *Journal of Neuroscience Methods*, 167, 2008, sivut 82-90. [Myös <http://www.arscerebri.com/ucsd/useful/Articles/BCI-Neuroprosthetics/BCI-MentalStateMonitoring.pdf>, 14.04.2012].
- NBR09 Nijholt, A., Bos, D. P.-O. ja Reuderink, B., Turning shortcomings into challenges: Brain-computer interfaces for games. *Entertainment Computing*, 1, 2, huhtikuu 2009, sivut 85-94. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187595210900010X>, 05.05.2012].
- Nic03 Nicolesis, M. A. L., Brain-machine interfaces to restore motor function and probe neural circuits. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, toukokuu 2003, sivut 417-422. [Myös <http://alice.nc.huji.ac.il/~icnc/PhysiologyB/9-vaadia/nicolelis-review-2003.pdf>, 29.04.2012].
- NEH08 Nijholt, A., van Erp, J. B.F. ja Heylen, D., BrainGain: BCI for HCI and games. *Conference/Workshop Paper of BrainGain/2: BCI Applications for Healthy Users -research project*, 10, huhtikuu 2008, sivut 32-35. [Myös [http://eprints.eemcs.utwente.nl/12172/01/aisb\\_bci.pdf](http://eprints.eemcs.utwente.nl/12172/01/aisb_bci.pdf), 13.08.2012].
- NiL09 Nicolesis, M. A. L. ja Lebedev, M. A., Principles of neural ensemble physiology underlying the operation of brain-machine interfaces. *Nature Reviews Neuroscience*, 10, heinäkuu 2009, sivut 530-540. [Myös <http://www.nature.com/nrn/journal/v10/n7/pdf/nr>

n2653.pdf , 12.02.2012].

- NiT07 Nijholt, A. ja Tan, D., Playing with your brain: brain-computer interfaces and games. *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, Salzburg, Itävalta, 2007, sivut 305–306. [Myös [http://portal.acm.org/ft\\_gateway.cfm?id=1255140&type=pdf&coll=Portal&dl=ACM&CFID=442779&CFTOKEN=56807533](http://portal.acm.org/ft_gateway.cfm?id=1255140&type=pdf&coll=Portal&dl=ACM&CFID=442779&CFTOKEN=56807533), 11.04.2012].
- Nyk01 Nykopp, T., Statistical modeling issues for the adaptive brain interface. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Suomi, Espoo, 9.6.2001. [Myös [http://www.lce.hut.fi/research/css/bci/tommis\\_thesis.pdf](http://www.lce.hut.fi/research/css/bci/tommis_thesis.pdf), 11.04.2012].
- PAV00 Pineda, J. A., Allison, B. Z. ja Vankov, A., The effects of self-movement, observation and imagination on  $\mu$  rhythms and readiness potentials (RP's): Toward a brain-computer interface (BCI). *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8, 2, kesäkuu 2000, sivut 219–222. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/86/18398/00847821.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=847821>, 11.04.2012].
- PfN01 Pfurtscheller, G., Neuper, C., Motor imagery and direct brain-computer communication. *Proc. IEEE*, 89, 7, heinäkuu 2001, sivut 1123–1134. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=939829>, 31.12.2012].
- Pfu00 Pfurtscheller, G. et al., Current trends in Graz brain-computer interface (BCI) research. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8, 2, kesäkuu 2000, sivut 216–219. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/86/18398/00847821.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=847821>, 11.04.2012].

- Pfu03 Pfurtscheller, G., Müller, G., Pfurtscheller, J., Gerner, H., Rupp, R., 'Thought' – control of functional electrical stimulation to restore hand grasp in a patient with tetraplegia. *Neuroscience Letters*, 351, elokuu 2003, sivut 33-36. [Myös <https://www.vpn.helsinki.fi/science/article/pii/S0304394003009479>, DanaInfo=www.sciencedirect.com, SSO=U+S0304394003009479#, 29.12.2012]
- Pfu10 Pfurtscheller, G., Allison, B. Z., Brunner, C., Bauernfeind, G., Solis-Escalante, T., Scherer, R., Zander, T. O., Mueller-Putz, G., Neuper, C. ja Birbaumer, N., The hybrid BCI. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 42, huhtikuu 2010, sivut 1–11. [Myös <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2891647/>, 17.05.2012].
- PNC11 Pires, G., Nunes, U. ja Castelo-Branco, M., Statistical spatial filtering for a P300-based BCI: Tests in able-bodied, and patients with cerebral palsy and amyotrophic lateral sclerosis. *Journal of Neuroscience Methods*, 195, Elsevier B.V., 2011, sivut 270-281. [Myös [http://www.isr.uc.pt/~urbano/interface10/publications/NeuroScienceMethods\\_submit\\_2.pdf](http://www.isr.uc.pt/~urbano/interface10/publications/NeuroScienceMethods_submit_2.pdf), 09.04.2012].
- ReE84 Reeke, G.N.Jr. ja Edelman, G.M., Selective networks and recognition automata. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 426, 1, marraskuu 1984, sivut 181-201. [Myös <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1749-6632.1984.tb16520.x/pdf>, 18.07.2012].
- Roc93 Rockstroh, B., Elbert, T., Birbaumer, N., Wolf, P., Düchting-Röth, A., Reker, M., Daum, I., Lutzenberger, W. ja Dichgans, J., Cortical self-regulation in patients with epilepsies. *Epilepsy Research*, 14, 1, tammikuu 2003, sivut 63–72. [Myös <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092012119390075I>,

20.07.2012].

- San04 Sanchez, J.C., Carmena, J. M., Lebedev, M. A., Nicolelis, M. A. L., Harris, J. G. ja Principe, J. C., Ascertaining the importance of neurons to develop better brain-machine interfaces. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51, 6, kesäkuu 2004, sivut 943–953. [Myös [http://www.cnel.ufl.edu/analog/\\_private/publications/bmi\\_01300786.pdf](http://www.cnel.ufl.edu/analog/_private/publications/bmi_01300786.pdf), 18.07.2012].
- Sch04 Scherer, R., McFarland, D. J., Hinterberger, T., Birbaumer, N. ja Wolpaw, J. R., BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51, 6, 2004, sivut 1034-1043. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10/28897/01300799.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=1300799>, 11.04.2012].
- Sch07 Scherer, R., Schloegl, A., Lee, F., Blschof, H., Janša, J. ja Pfurtscheller, G., The self-paced Graz brain-computer interface: Methods and applications. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2007, tammikuu 2007, sivut 1-9. [Myös [http://delivery.acm.org/10.1145/1330000/1321357/p9-scherer.pdf?ip=128.214.2.137&acc=PUBLIC&CFID=128935156&CFTOKEN=28263095&\\_\\_acm\\_\\_=1342717577\\_6daccdcca7a4eea26d30533bc6f37df6](http://delivery.acm.org/10.1145/1330000/1321357/p9-scherer.pdf?ip=128.214.2.137&acc=PUBLIC&CFID=128935156&CFTOKEN=28263095&__acm__=1342717577_6daccdcca7a4eea26d30533bc6f37df6), 27.09.2012].
- Sch08 Schalk, G., Miller, K. J., Anderson, N. R., Wilson, J. A., Smyth, M. D., Ojemann, J. G., Moran, D. W., Wolpaw, J. R. ja Leuthardt, E. C., Two-dimensional movement control using electrocorticographic signals in humans. *Journal of Neural Engineering*, 5, 1, maaliskuu 2008, sivut 75-84. [Myös <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2744037/pdf/nihms-130443.pdf>, 30.07.2012].



- Sch11 Scherer, R., Friedrich, E. C. V., Allison, B., Pröll, M., Chung, M., Cheung, W., Rao, R. P. N. ja Neuper, C., Non-invasive brain-computer interfaces: enhanced gaming and robotic control. *Proceedings of IWANN 2011 Advances in Computational Intelligence*, Torremolinos-Malaga, Espanja, kesäkuu 2011, sivut 362-369. [Myös <http://www.springerlink.com/content/aw7782349378k206/fulltext.pdf>, 05.05.2012].
- SMP09 Scherer, R., Müller-Putz, G.R. ja Pfurtscheller, G., Flexibility and practicality: Graz brain-computer interface approach. Teoksessa *International Review of Neurobiology - Brain Machine Interfaces for Space Applications: Enhancing Astronaut Capabilities*, Izzo, D. ja Rossini, L., toimittajat, Academic press, heinäkuu 2009, sivut 119-131. [Myös [http://www0.cs.ucl.ac.uk/research/vr/Projects/PRESENCIA/Public/presencia\\_public/sharedDocuments/presencia\\_publications/Publications/wp4/tug/0644.pdf](http://www0.cs.ucl.ac.uk/research/vr/Projects/PRESENCIA/Public/presencia_public/sharedDocuments/presencia_publications/Publications/wp4/tug/0644.pdf), 12.01.2013]
- SoE06 Song, L. ja Epps, J., Classifying EEG for brain-computer interfaces: Learning optimal filters for dynamical system features. *Proceedings Of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Machine Learning*, Pittsburgh, PA, Yhdysvallat, 2006, sivut 857-864. [Myös [http://portal.acm.org/ft\\_gateway.cfm?id=1143952&type=pdf&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=38475729&CFTOKEN=59900667](http://portal.acm.org/ft_gateway.cfm?id=1143952&type=pdf&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=38475729&CFTOKEN=59900667), 11.04.2012].
- Solut Ilmoniemi, R., Aivojen rakenne ja toiminta: Solut. Helsingin yliopistollisen keskussairaalan verkkosivu, jossa käsitellään ihmisen solujen rakennetta. [<http://www.biomag.hus.fi/braincourse/L2.html>, 01.07.2012].
- Str06 Strehl, U., Leins, U., Goth, G., Klinger, C., Hinterberger, T. ja

- Birbaumer, N., Self-regulation of slow cortical potentials: A new treatment for children with attention-deficis/hyperactivity disorder. *Pediatrics*, 118, 5, marraskuu 2006, sivut e1530–e1540. [Myös <http://pediatrics.aappublications.org/content/118/5/e1530.full.pdf+html>, 22.07.2012].
- Vau03 Vaughan, T.M., Guest editorial brain-computer interface technology: a review of the second international meeting. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 11, 2, kesäkuu 2003, sivut 94–109. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7333/27323/01214694.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=1214694>, 11.04.2012].
- Vau06 Vaughan, T.M., McFarland, D.J., Schalk, G., Sarnacki, W.A., Krusienski, D.J., Sellers, E.W. ja Wolpaw, J.R. The Wadsworth BCI research and development program: At home with BCI. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 14, 2, kesäkuu 2006, sivut 229–233. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1642776>, 09.01.2013].
- Vel08 Velliste, M., Perel, S., Spalding, M.C., Whitford, A.S. ja Schwartz, A.B., Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding. *Nature*, 453, elokuu 2008, sivut 1098-1101. [Myös [http://freylab.missouri.edu/boat\\_notes/nature06996.pdf](http://freylab.missouri.edu/boat_notes/nature06996.pdf), 09.01.2013].
- Ven10 Venthur B., Blankertz, B., Gugler, M. F. ja Curio, G., Novel applications of BCI technology: Psychophysiological optimization of working conditions in industry. *IEEE International Conference on Systems and Man Cybernetics (SMC)*, Istanbul, Turkki, lokakuu 2010, sivut 417-421. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5641772>, 15.04.2012].

- ViB10 Vidaurre, C. ja Blankertz, B., Towards a cure for BCI illiteracy. *Brain Topography*, 23, 2, 2010, sivut 194-198. [Myös <http://www.springerlink.com/content/h1740384u4233036/fulltext.pdf>, 31.07.2012].
- Vid73 Vidal, H.J., Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2, 1973, sivut 157-180. [Myös <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>, 15.04.2012].
- Wal08 Waldert, S., Preissl, H., Demandt, E., Braun, C., Birbaumer, N., Aertsen, A. ja Mehring, C., Hand movement direction decoded from MEG and EEG. *The Journal of Neuroscience*, 28, 4, tammikuu 2008, sivut 1000-1008. [Myös <http://www.neuro.cjb.net/content/28/4/1000.full.pdf+html>, 29.07.2012].
- Wol99 Wolpaw, J.R., Birbaumer, N., Heetderks, W. J., McFarland, D. J., Peckham, P. H., Schalk, G., Donchin, E., Quatrano, L. A., Robinson, C. J. ja Vaughan, T. M., Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. *IEEE Transactions of Rehabilitation Engineering*, 8, 2, kesäkuu 1999, sivut 164-173. [Myös <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=847807>, 15.04.2012].
- Wol02 Wolpaw, J.R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G. ja Vaughan, T. M., Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113, 6, kesäkuu 2002, sivut 767-791. [Myös <http://www.ai.rug.nl/~lambert/projects/BCI/literature/serious/non-invasive/BCI-for-communication-and-control.pdf>, 11.04.2012].
- YKK10 Yoh, M.-S., Kwon, J. ja Kim, S., NeuroWander: a BCI game in the

form of interactive fairy tale. *Proceedings of Ubicomp '10 Adjunct*,  
Kööpenhamina, Tanska, syyskuu 2010, sivut 389-390. [Myös  
[http://delivery.acm.org/10.1145/1870000/1864450/p389-yoh.pdf?ip=128.214.2.138&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=80787261&CFTOKEN=88117672&\\_\\_acm\\_\\_=1336240872\\_896cc77928611a20236c00625e154449,05.05.2012](http://delivery.acm.org/10.1145/1870000/1864450/p389-yoh.pdf?ip=128.214.2.138&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=80787261&CFTOKEN=88117672&__acm__=1336240872_896cc77928611a20236c00625e154449,05.05.2012)].