

**Olli Tammilehto**

**Sensorimotoriset rytmit EEG-pohjaisten  
aivo-tietokone-liittymien ohjaussignaaleina**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

18. toukokuuta 2020

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Olli Tammilehto

**Yhteystiedot:** olli.a.tammilehto@student.jyu.fi

**Ohjaaja:** Timo Tiihonen

**Työn nimi:** Sensorimotoriset rytmit EEG-pohjaisten aivo-tietokoneiliittymien ohjaussignaaleina

**Title in English:** Sensorimotor rhythms as control signals in EEG-based brain-computer interfaces

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Sivumäärä:** 33+0

**Tiivistelmä:** Sensorimotoriset rytmit ovat tietyn alueen hermosolujen yhteistoiminnasta syntyvää jaksoittaista vaihtelua, jota voidaan mitata aivosähkökäyrän (EEG) avulla. Aivo-tietokoneiliittymä on järjestelmä, joka mittaa keskushermoston signaaleja ja muuntaa ne ohjelmiston avulla ohjauksikäskyiksi. Kirjallisuuden mukaan sensorimotoriset rytmit ovat käyttökelpoisia ohjaussignaaleja EEG-mittauksiin pohjautuvissa aivo-tietokoneiliittymissä. EEG:hen ja sensorimotorisiin rytmeihin pohjautuvia järjestelmiä on toteutettu onnistuneesti.

**Avainsanat:** aivo-tietokoneiliittymä, sensorimotoriset rytmit, EEG

**Abstract:** Sensorimotor rhythms are periodic fluctuations resulting from the cooperation of neurons in specific areas of the cortex, which can be measured by electroencephalography (EEG). Brain-computer interfaces are systems that measure signals from the central nervous system and convert them into control commands via software. According to literature, sensorimotor rhythms are usable as control signals in brain-computer interfaces based on EEG measurements. Systems based on EEG-measured sensorimotor rhythms have been successfully implemented.

**Keywords:** brain-computer interface, sensorimotor rhythms, EEG

## **Kuviot**

Kuvio 1. Aivoalueiden jaottelua. Motorinen aivokuori on jaettu primaariseen (tummempi alue) ja premotoriseen alueeseen. Augustinea (2017, s. 341) mukaillen. ....	4
Kuvio 2. Aivo-tietokoneiliittymän yleinen toimintaperiaate (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 4) mukaillen.....	10

# Sisältö

1	JOHDANTO .....	1
2	AIVOJEN RYTMIT .....	2
2.1	Aivokuori .....	3
2.1.1	Sensorimotorinen aivokuori .....	5
2.2	Sensorimotorisen aivokuoren tuottamat rytmit ja niiden funktiot.....	5
2.3	Aivorytmien mittaaminen EEG:llä .....	7
3	AIVO-TIETOKONELIITTYMÄT .....	9
3.1	Aivo-tietokoneliittymän määrittely .....	9
3.2	Ohjaussignaalit ja mentaaliset strategiat .....	11
3.2.1	Sensorimotoriset rytmit ohjaussignaaleina .....	13
3.3	Laitteistot ja ohjelmistot .....	14
3.4	Toimintaprotokollat .....	16
4	TIETOKONEEN KURSORIN MONIULOTTEINEN OHJAAMINEN EEG-POHJAISELLA AIVO-TIETOKONELIITTYMÄLLÄ .....	20
4.1	Tutkimuksen aivo-tietokoneliittymä.....	20
4.2	Tutkimusasetelma .....	20
4.3	Pohdintoja tutkimuksen tuloksista.....	22
5	YHTEENVETO.....	24
	LÄHTEET .....	26

# 1 Johdanto

Aivo-tietokoneliittymä on järjestelmä, joka koostuu keskushermoston aktiivisuutta mittaavasta laitteesta, mitattuja signaaleja käsittelevästä ohjelmistosta ja tietokonelaitteistosta, joka ajaa ohjelmistoa. Usein mukana on myös ulkoinen kohdelaite, jota järjestelmällä voidaan ohjata. Aivo-tietokoneliittymien toteuttamisessa olennaista on keskushermostoa mittaavan menetelmän valinta ja mitatusta signaalista suodatettava ohjaussignaali. Vaihtoehtoisia tapoja mitata keskushermoston toimintaa on useita (Paavilainen 2016; Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 8).

Tutkielmassa tarkastellaan aivo-tietokoneliittymän käsitettä sekä perehdytään aivo-tietokoneliittymän ohjauksen mahdollistavan aivosignaalin tyyppiin ja sen mittaamiseen. Tutkielmassa keskitytään elektroenkefalografian (EEG), eli aivosähkökäyrän, avulla mitattaviin sensorimotorisen aivokuoren tuottamiin rytmeihin perustuviin aivo-tietokoneliittymiin. EEG-pohjaiset aivo-tietokoneliittymät ovat ajankohtainen tutkimusaihe, sillä markkinat kuluttajaluokan EEG-laitteistolle ovat kasvaneet (Ratti ym. 2017) ja aivo-tietokoneliittymien uskotaan tarjoavan suuria mahdollisuuksia kliinisten sovellusten kentällä. Kliinisiä sovelluksia voisivat olla esimerkiksi motorisen toiminnan palauttaminen tai korvaaminen sekä kommunikaatiovälineet puhekykynsä menettäneille (Yuan ja He 2014). Tutkimusmenetelmänä toimii kirjallisuuskatsaus.

Luvussa 2 tutustutaan yleisesti aivojen tuottamiin rytmeihin sekä tarkastellaan liikeaivokuoren ja sensorisen aivokuoren muodostaman kokonaisuuden, sensorimotorisen aivokuoren, rakennetta ja sen toiminnasta seuraavia rytmejä. Luvussa 3 tarkastellaan aivo-tietokoneliittymän käsitettä ja sen yleisiä toimintaperiaatteita. Lisäksi luvussa 4 luodaan katsaus tutkimukseen, jossa tietokoneen kursorin moniulotteinen liikuttaminen toteutettiin EEG-pohjaisella sensorimotorisiin rytmeihin perustuvalla aivo-tietokoneliittymällä. Lopuksi tehdään yhteenveto katsauksen aikana tehdyistä havainnoista.

## 2 Aivojen rytmit

Aivojen tuottamat oskillaatiot, rytmit tai aallot ovat yksittäisten hermosolujen ja hermosolujoukoista muodostuvien hermoverkkojen luontaisesta yhteistoiminnasta syntyvää jaksoittaista vaihtelua, jonka taajuusalue vaihtelee 0,02 hertsistä 600 hertsiin (Buzsáki ja Draguhn 2004; Buzsáki 2006, s. 113). Rytmit voivat olla ulkoisen ärsykkeen tai aivojen oman sisäisen toiminnan aiheuttamaa (Buzsáki 2006). Hermoverkot muodostuvat yksittäisistä hermosoluista, jotka voivat resonoida ja oskilloida useilla taajuuksilla (Buzsáki ja Draguhn 2004), sekä niiden muodostamista moninaisista synaptisista kytkennöistä. Samat hermoverkot voivat saada aikaan eri taajuisia keskenään kilpailevia oskillaatioita, joiden ajatellaan liittyvän eri aivotiloihin ja -toimintoihin (Buzsáki ja Draguhn 2004). Useat eri rytmit voivat esiintyä rinnakkain sekä vaikuttaa toisiinsa (Buzsáki ja Draguhn 2004).

Aivorytmit tavataan jakaa taajuusalueittain alfa, beta, delta, theta ja gamma-aaltoihin (Buzsáki 2006, s. 113; Uhlhaas ym. 2010; Engel ja Fries 2010), joskin jako alueisiin vaihtelee määritelmästä riippuen. Alfaksi kutsutaan 8-12 hertsin taajuusalueen aaltoja (Buzsáki 2006), jotka liitetään aivojen "lepotilaan" ja yhdistetään aivojen inhibitoriseen, eli estävään toimintaan (Herrmann ym. 2016). Beta-aaltojen alue käsittää 10-30 hertsin välillä olevan taajuusalueen (Cheyne 2013; Engel ja Fries 2010; Buzsáki ja Draguhn 2004) ja sen oskillaatioiden ajatellaan liittyvän tahdonalaisten, passiivisten sekä kuviteltujen liikkeiden prosessointiin (Pfurtscheller ja Da Silva 1999; Cheyne 2013). Engelin ja Friesin (2010) mukaan beta-taajuuden aktiivisuus vaikuttaa ylläpitävän aivoissa parhaillaan käynnissä olevaa sensorimotorista tai top-down -tyyppiseen kognitiiviseen prosessointiin liittyvää tilaa. Gamma-aallot puolestaan ovat korkeita, 30-80 hertsin taajuusalueella nähtäviä oskillaatioita (Buzsáki ja Draguhn 2004), joiden uskotaan liittyvän kohteiden tunnistamiseen (Cheyne 2013; Buzsáki 2006, s. 260-261) ja aivokuoren aktivoitumiseen (Herrmann ym. 2016). Hippokampuksen synnyttämät 4-8 hertsin theta-aallot liitetään muistin toimintaan ja avaruudelliseen navigointiin (Herweg, Solomon ja Kahana 2020), 0,5-3,5 hertsin delta-aallot joihinkin tarkkaavuuden ja päätöksenteon prosesseihin (Güntekin ja Başar 2016).

Tällä hetkellä ei ole aukotonta empiiristä tietoa siitä, ovatko jotkin rytmit vain aivoiminnan epifenomenaalisia sivutuotteita (Davis, Tomlinson ja Morgan 2012). On kuitenkin olemassa

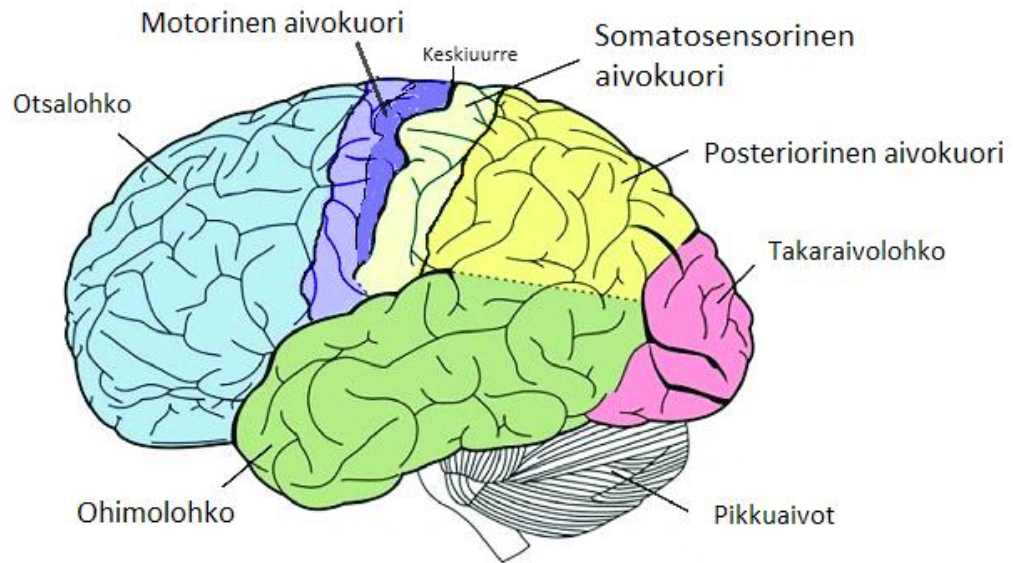
näyttöä oskillaatioiden toiminnallisesta merkityksestä sekä kehittyvissä (Uhlhaas ym. 2010) että kypsissä aivoissa (Engel ja Fries 2010). Myös rytmien kausaalisesta luonteesta on saatu viime aikoina viitteitä (Herrmann ym. 2016). Yleisesti oskillaatioiden ajatellaan olevan aivojen energiatehokas keino mahdollistaa hermosolupopulaatioiden ajallisesti ja paikallisesti samanaikainen toiminta, mikä koordinoi tiedonkäsittelyä aivoalueilla sekä tiedon siirtymistä alueiden välillä (Engel ja Fries 2010; Buzsáki ja Draguhn 2004). Voidaankin ajatella eri taajuusalueiden oskillaatioiden samalla aivoalueella tai saman taajuusalueen oskillaatioiden eri aivoalueilla olevan yhteydessä erilaisiin aivotoimintoihin aivoalueesta ja oskillaatioiden taajuudesta riippuen.

Seuraavassa alaluvussa kuvataan ihmisen aivokuoren rakennetta ja toimintaa, etenkin motorisen ja somatosensorisen aivokuoren osalta. Nämä alueet yhdessä muodostavat sensori-motoriseksi aivokuoreksi nimetyn alueen, jonka tuottamien rytmien luonnetta tarkastellaan lähemmin. Lopuksi esitellään tapa mitata aivokuoren tuottamia rytmejä EEG:llä, eli aivosähkökäyrällä.

## **2.1 Aivokuori**

Ihmisen aivokuori on viidestä hermosolutyypistä rakentuva kuusikerroksinen kokonaisuus, jonka eri alueet ovat jossain määrin erikoistuneet hoitamaan erilaisia kognitiivisia ja motorisia tehtäviä, kuten toiminnanohjausta, liikkeiden suunnittelua ja aistitiedon käsittelyä. Eri alueet ovat eroteltavissa toisistaan hermosolujen järjestäytymistapojen mukaan, ja ne voidaan luokitella esimerkiksi Brodmannin alueisiin (Augustine 2017, s. 338-344; Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 18-25; Buzsáki 2006, s. 59-60). Wolpawin ja Wolpawin (s. 20, 2012) mukaan aivokuori on aivo-tietokoneliittymien tutkimuksen kannalta merkittävä alue elektrodien helpon asettamisen sekä motoriikkaan ja kommunikaation liittyvien toiminnanohjauksen tehtävien vuoksi. Aivokuori voidaan jakaa alueisiin kuvion 1 esittämällä tavalla.

Aivojen keskiurteesta otsalohkon suuntaan sijaitsee motorinen, eli liikeaivokuori, joka on järjestynyt primaariseen ja premotoriseen alueeseen (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 21-22; Jehkonen ym. 2015, s. 38). Kehon eri osat ovat somatotooppisesti järjestyneet primaariselle alueelle, joka säätelee liikkeiden toteuttamista. Somatotooppisella järjestymisellä tarkoite-



Kuvio 1. Aivoalueiden jaottelua. Motorinen aivokuori on jaettu primaariseen (tummempi alue) ja premotoriseen alueeseen. Augustinea (2017, s. 341) mukailleen.

taan eri toimintojen erilaajuisia edustusalueita aivokuorella: esimerkiksi käden ja suun liikkeiden ohjaamiseen osallistuvat keskenään erilliset hermosolujoukot. (Jehkonen ym. 2015, s. 32-38; Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 20-32). Premotorisen alueen tehtävänä on vastata liikkeiden sekvensoinnista, eli liikesarjan eri osien ketjuttamisesta. Premotorinen alue hallinnoi liikesarjojen suunnittelua ja tilanteenmukaisesta koordinaatiota, kuten liikkeen aloittamista ja lopettamista.

Keskiuurteesta takaraivon suuntaan mentäessä vastaan tulevat primaarinen somatosensorinen aivokuori ja päälään posteriorinen, eli taempana sijaitseva, aivokuori. Somatosensorinen osa käsittelee kosketuksen, lämpötilan ja kivun aistimuksia. Lisäksi se vastaa proprioseptiikasta, eli ruumiinasentojen ja -liikkeiden aistimisesta (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 22). Posteriorinen, eli taempi osa, vastaa primaarisilta aistialueilta tulevan tiedon hienojakoisemmasta erottelusta. Posteriorisen osan ajatellaan sitovan eri aistialueilta tulevaa informaatiota yhteen liikkeiden ohjaamisen avustamiseksi (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 23).



### **2.1.1 Sensorimotorinen aivokuori**

Sensorimotorisella aivokuorella tarkoitetaan päälaella sijaitsevan keskiuurteen läheisyydessä olevien primaarisen liikeaivokuoren, primaarisen somatosensorisen aivokuoren ja pääläen posteriorisen aivokuoren muodostamaa aluetta (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 227). Primaarinen liikeaivokuori ja somatosensorinen aivokuori sijaitsevat keskiuurteen vastakkaisilla puolilla, posteriorinen kuori somatosensorisen kuoren "takana". Liikeaivokuori hoitaa liikkeiden toteutukseen liittyviä tehtäviä, somatosensorinen aivokuori käsittelee aistinelimiltä tulevia ruumiillisia tuntemuksia ja posteriorinen alue suorittaa primaarisilta aistialueilta saapuvan tiedon hienosyisempää käsittelyä. Alueet toimivat yhdessä tavoitteellisten liikkeiden toteuttamiseksi: aistitietoa käsittelevät alueet ohjaavat liikeaivokuorta päivittämään käynnissä olevia liikeratoja.

## **2.2 Sensorimotorisen aivokuoren tuottamat rytmit ja niiden funktiot**

Sensorimotoriset rytmit ovat liikkeiden suunnitteluun, säätelyyn ja suoritukseen liittyviä hermosolujen yhteistoiminnasta syntyviä oskillaatioita sensorimotorisella aivokuorella (Cheyne 2013). Sensorimotorisia rytmejä on tutkittu pitkään aivo-tietokoneliittymien yhteydessä (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 227), sillä rytmien syntyvät ja niitä muodostavat alueet ovat suhteellisen hyvin tunnettuja, ja näitä rytmejä voidaan verrattain hyvin mitata päälaelta EEG:tä käyttäen. Wolpawin ja Wolpawin (2012) sekä Pfurtschellerin (1999) mukaan sensorimotorisen alueen hermosolut tuottavat erilaisiin liikkeisiin ja niiden suunnitteluun liittyviä kolmella eri taajuusalueella havaittavia rytmejä. Nämä taajuusalueet ovat mu (8-12 Hz), beta (18-30 Hz) ja gamma (30-200+ Hz). Mu-rytmien ovat sensorimotoriselta aivokuorelta mitattavia alfa-aaltojen kanssa saman taajuusalueen jakavia, mutta aaltomuodoltaan erilaisia, liikkeisiin liittyviä rytmejä (Buzsáki 2006, s. 199).

Sensorimotorisilla oskillaatiolla on jonkinasteista somatotooppista ja taajuuksellista järjestymistä. Beta-rytmien ja mu-rytmien, sekä näiden tapahtumasidonnaisen synkronisaation ja desynkronisaation, on tutkimuksissa havaittu syntyvän aivojen keskiuurteen molemmin puolin sijaitsevilla aivopoimuilla, eli motorisella ja somatosensorisella aivokuorella (Cheyne 2013). Beta-rytmien ja niiden ilmiöt keskittyvät motoriselle, mu-rytmien somatosensoriselle

aivokuorelle (Cheyne 2013). Tahdonalaisia liikkeitä suunniteltaessa ja suorittaessa tapahtuu vahvaa ja lokalisoitunutta tapahtumasidonnaista desynkronisaatiota mu- ja beta-rytmeissä molempien aivopuoliskojen niillä edustusalueilla, jotka käsittelevät liikkeitä ja kehollisia tunteuksia (Jurkiewicz ym. 2006; Cheyne 2013). Liikkeen päättymisen jälkeen beta- ja mu-desynkronisaatio katoavat, ja voidaan havaita vahvaa beta-rytmin tapahtumasidonnaista synkronisoitumista, jonka ajatellaan estävän tarkoituksettomia liikkeitä tai ylläpitävän ajan-kohtaista sensorimotorista tilaa (Engel ja Fries 2010).

Mu-rytmeissä voidaan Wolpawin ja Wolpawin (2012) mukaan havaita kahdenlaisia desynkronisaatiokuvioita, joista toinen tapahtuu matalalla (8-10 hz) ja toinen korkeammalla (10-13 hz) taajuudella. Matalampi rytmi ilmenee kaikenlaisissa liikkeissä ja liittyy motoriseen valmistautumiseen ja motoriikkaan liittyviin tarkkaavuuden prosesseihin. Korkeamman taajuuden rytmi on somatotooppisesti rajautuneempi ja liittyy tehtävisidonnaiseen liikesuoritukseen. Mu-rytmissä tapahtuu myös muutoksia kuvitellun liikkeen aikana ja havainnoitessa jonkun toisen suorittamaa liikettä (Jurkiewicz ym. 2006).

Gamma-alueen oskillaatioilla on havaittu olevan vahvempaa somatotooppista järjestäytyneisyyttä ja aikalukittumista erillisten liikkeiden ja niiden kuvittelun suhteen kuin mu- ja beta-rytmeillä, ja rytmin onkin havaittu vahvistuvan liikkeen aikana (Cheyne 2013; Miller ym. 2010). Esimerkiksi käden liikuttamisen, tai sen kuvittelemisen, aikainen aktivaatio on erilaista kuin kielen liikuttamisen aikaansaama aktivaatio. Tästä voidaan päätellä, että erilaisien liikkeiden pitäisi olla helpommin eroteltavissa gamma-alueella kuin mu- tai beta-alueilla.

Tapahtumasidonnaiset aivovasteet noudattavat alueellista ja taajuuksellista somatotooppista järjestymistä sekä tietynlaisia aktivaatiokuvioita aktiivisen, passiivisen ja kuvitellun liikkeen sekä hermosolujen sähköisen stimulaation yhteydessä (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 228). Millerin ja kumppaneiden (2010) empiirisissä kokeissa onnistuttiin osoittamaan kuviteltujen ja todellisten liikkeiden aktivoivan samoja aivoalueita sekä tuottavan pitkälti samanlaisia sensorimotorisia oskillaatioita. Todellisen liikkeen aikaiset oskillaatiot olivat vahvempia kuviteltuun verrattuna, mutta takaisinkytkentään perustuvan harjoittelun myötä kuvittelun aikaansaama aktivaatio muuttui jopa suuremmaksi kuin todellisessa liikkeessä (Miller ym. 2010). Samassa tutkimuksessa havaittiin gamma-alueen oskillaatioiden suurempi somatotooppinen järjestäytyminen erillisten liikkeiden suhteen mu- ja beta-rytmeihin verrattuna.

Cheyne (2013) mukaan gamma-rytmin onkin havaittu vahvistuvan liikkeiden aikana. On olemassa myös muita tutkimuksia jotka osoittavat kuvitellun ja todellisen liikkeen aikaansaaman aivoaktivaation samankaltaisuuden (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 228-229).

### **2.3 Aivorytmien mittaaminen EEG:llä**

Aivosähkökäyrä eli EEG on päänahasta tai aivokuorelta mitattava signaali, joka syntyy aivokuoren hermosolupopulaatioiden yhtäaikaista sähköistä toiminnasta. Hermosolujen ärsytys luo sähköisen jännitteen aivokuoren pyramidaalisolujen solunulkoiseen tilaan hermosolun soomaosan dendriittien ja viejähaarakeen päässä olevien synapsien välille. Vierekkäisten, sopivassa asemassa toisiinsa nähden olevien jännitteisten hermosolujen muodostama suuri yhteisjännite saa aikaan ketjureaktion, joka polarisoi aivokalvojen ja pääkallon kerrosten sisältämiä varauksia niin, että päänahkaan asetettujen elektrodien sisälle muodostuu lopulta sähköisiä jännite-eroja. Mittalaitte mittaa näiden elektrodien jännite-eroja. EEG-signaali heikkenee matkalla aivokuorelta elektrodiin ja sisältää paljon kohinaa. Kohinaa aiheuttavat sisäiset ja ulkoiset tekijät. Sisäisiä tekijöitä voivat olla mm. silmien liikkeet ja lihaskäynnitys, ulkoisia tekijöitä voivat olla huoneessa sijaitsevat lamput ja tietokoneet. (Jackson ja Bolger 2014).

EEG-mittauksen erottelukyky rajoittuu mu-, beta- ja matalien taajuuksien gamma-rytmien alueille (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 227). Mitatut jännite-erot ovat sekoitus useiden taajuuksien rytmejä (Buzsáki 2006, s. 136). EEG:n ajallinen erottelukyky, eli kyky havaita aivotoiminnan nopeita muutoksia on erittäin hyvä (Buzsáki 2006, s. 81). Sen sijaan EEG:n paikallista erottelukykyä, eli kullakin hetkellä tietoa käsittelevien hermosolujen yksilöllistä erottelua, pidetään kehnona. Syy heikkoon erottelukykyyteen löytyy EEG:n tavasta mitata hermosolujen yhteistoiminnan aikaansaamia yhteisjännitteitä (Buzsáki 2006, s. 90-91). EEG:n tuottama data on kaksiulotteista sisältäen taajuuden ja ajan ulottuvuudet (Buzsáki 2006, s. 105).

Eräitä aivojen hermosolujen yhteistoiminnan mekanismeja ovat tapahtumasidonnainen (engl. event-related) synkronisaatio ja desynkronisaatio, mitkä voidaan havaita EEG:ssä ja aivo-magneettikäyrässä (magnetoencefalografia, MEG) kun ulkoinen tai sisäinen tapahtuma saa

aikaan toimintamuutoksia oskillaatioita tuottavissa hermoverkoissa (Pfurtscheller ja Da Silva 1999). Synkronisaatiolla tarkoitetaan tietyn alueen hermosolupopulaation yhtäaikaista oskilloimista samalla taajuudella. Desynkronisaatiolla viitataan yhtäaikaisen ja samantaajuisen oskillaation häviämiseen. Mittalaitteissa mekanismi näkyy signaalin taajuuskomponenttien tehon avaruudellisena ja ajallisena vaihteluna: teho kasvaa synkronisaation aikana ja heikkenee desynkronisaation aikana. Synkronisaatio ja desynkronisaatio voivat ilmetä samanaikaisesti eri aivoalueilla. Synkronisaatio saattaa liittyä aivojen inhibitoriseen, eli estävään toimintaan, ja desynkronisaatio "aktiiviseen toimintaan".

### **3 Aivo-tietokoneliittymät**

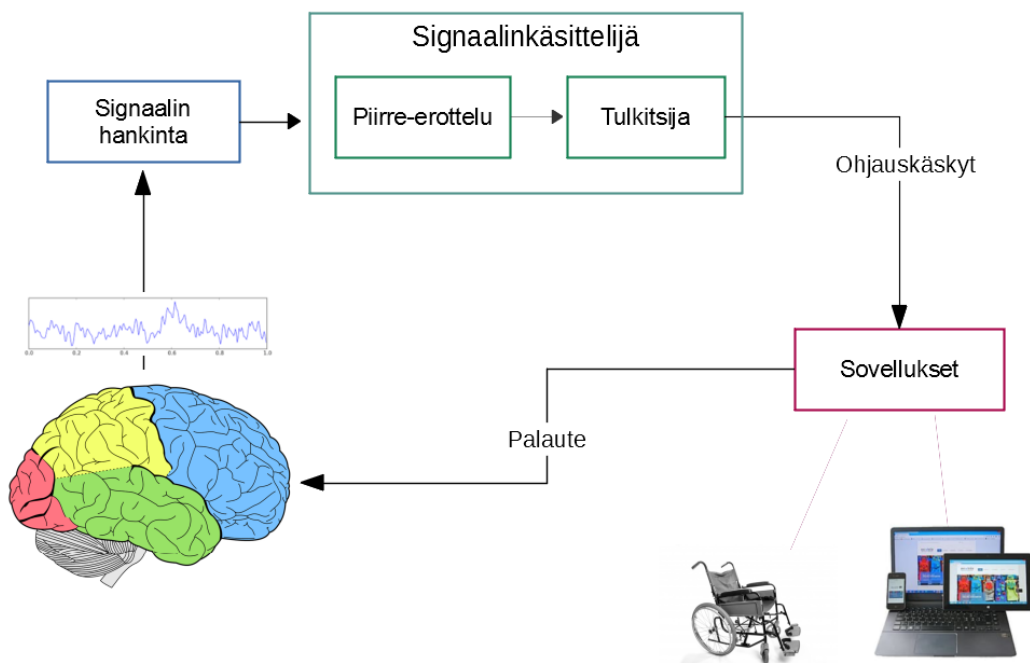
Aivo-tietokoneliittymillä (engl. brain-computer interface) tarkoitetaan keskushermoston toimintaa, yleensä aivoja, mittaavia järjestelmiä, jotka kykenevät muuttamaan mitattamansa signaalit ulkoisten laitteiden toiminta- tai ohjauksikäskyiksi. Järjestelmä käsittelee aivodataa ohjelmallisesti halutulla tavalla ja voi toimia eräänlaisena linkkinä aivojen ja ulkoisten laitteiden välillä. Koska aivoja voidaan tietyin varauksin pitää ihmisen mielen ja tietoisuuden työssijana (Revonsuo 2017), voidaan nämä järjestelmät nähdä tapana ohjata laitteita mielen tai ajatusten "voimalla". Järjestelmillä on jatkotutkimusten myötä potentiaalia saada aikaan mullistavia klinisiä ja viihdekäyttöön suuntautuvia sovelluksia.

Tässä luvussa tarkastellaan aluksi aivo-tietokoneliittymän määritelmää, minkä jälkeen kuvataan järjestelmän ohjaukseen käytettäviä mentaalisia strategioita ja niiden tuottamia ohjaussignaaleja. Seuraavaksi esitetään järjestelmään kuuluvien laitteistojen ja ohjelmistojen yleiset piirteet. Lopuksi tarkastellaan koko laitteiston toimintaa sen hallinnoimiseksi kehitettyjen toimintaprotokollien kautta.

#### **3.1 Aivo-tietokoneliittymän määrittely**

Tutkimuskirjallisuudessa aivo-tietokoneliittymien määritelmät ovat varsin yhdenmukaisia ja sisältävät paljon samoja elementtejä, joiden painotus ja laajuus vaihtelevat määritelmän mukaan. Lotte ym. (2018) käsittää aivo-tietokoneliittymän mittaus- ja viestijärjestelmänä, joka muuntaa käyttäjänsä aivojen aktivaatiokuvioita interaktiivisen sovelluksen ohjauksikäskyiksi tai sovellukselle lähetettäviksi viesteiksi. Yuan ja He (2014) puolestaan korostavat näkemystä aivo-tietokoneliittymistä aivojen elektrofysiologisten tai aineenvaihduntaan liittyvien signaalien uudenaikaisena ulostulokanavana, joka mahdollistaa kommunikoinnin ja ulkoisten laitteiden ohjaamisen ilman hermo-lihasjärjestelmän apua. Samaan tapaan, mutta kattavammin ja yleisemmin määrittelevät myös Wolpaw ja Wolpaw (2012), joiden mukaan aivo-tietokoneliittymä on järjestelmä, joka mittaa keskushermoston toimintaa ja muuntaa mitatun signaalin keinotekoiseksi ulostulosignaaliksi, jolla voidaan vaikuttaa keskushermoston sisäisen ja ulkoisen ympäristön välisiin vuorovaikutuksiin (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 3-6).

Määritelmä koskee sitä kokonaisuutta, joka kykenee mittaamaan signaalit ja muuttamaan ne ohjauksiksi, mutta ei varsinaisesti sisällä ohjattavaa ulkoista laitetta (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 176). Eri määritelmien painotuseroista voidaan päätellä, että aivo-tietokoneiliittymiä voidaan periaatteessa kehittää ja soveltaa moniin tarkoituksiin, kuten viestintälaitteiden ja apuvälineiden hallintaan. Aivo-tietokoneiliittymän määritelmä näyttäisi sisältävän aivojen lisäksi myös selkäytimestä ja aivorungosta signaaleja mittaavat järjestelmät mikäli niillä vaikutetaan keskushermoston ja sen ympäristön vuorovaikutuksiin. Aivo-tietokoneiliittymien yleinen toimintaperiaate näkyy kuvioista 2.



Kuvio 2. Aivo-tietokoneiliittymän yleinen toimintaperiaate (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 4) mukailten.

Aivo-tietokoneiliittymien odotetaan etenkin tulevaisuudessa auttavan erilaisten neurologisten sairauksien tai hermoston toimintaan liittyvien häiriöiden aiheuttamissa kommunikaatiokyvyn, liikkuvuuden ja autonomisen hermoston toimintojen puutoksissa (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 317-322; Lotte ym. 2018). Pitkäaikaiseen ja melko itsenäiseen käyttöön tarkoi-

tettuja järjestelmiä onkin jo toteutettu eräissä tutkimuksissa (Sellers, Vaughan ja Wolpaw 2010; Wolpaw ym. 2018). Teknologian kehityksen ja tiedon lisääntymisen myötä voitaisiin motoriikkaan sidonnaisten toimintojen palauttamisen lisäksi kehittää järjestelmiä mm. emootioiden tunnistamiseen ja säätelyyn (Shanechi 2019). Sovellusmahdollisuuksien tiellä on kuitenkin teknisiä ja tutkimustiedollisia haasteita (Maskeliunas ym. 2016; McFarland ja Wolpaw 2017). Teknisiä haasteita ovat esim. parempien mittalaitteiden ja signaalinkäsittelymenetelmien kehittäminen, tutkimustiedollisia esim. tarkkaavuuden ja rentoutumisen prosessien ymmärtäminen. Haasteiden ylitsepääseminen avaisi aivo-tietokoneiliittymien mahdollisuudet myös arkipäiväisempään käyttöön töissä ja vapaa-ajan harrasteissa, esimerkiksi kognitiivisen kuormituksen ja stressin ilmaisimena tai videopelin ohjauslaitteena.

### **3.2 Ohjaussignaalit ja mentaaliset strategiat**

Aivo-tietokoneiliittymän ohjausta tarkasteltaessa voidaan erottaa toisistaan aivokuvioiden (engl. brain pattern) ja mentaalisten strategioiden (engl. mental strategies) käsitteet (Graumann, Allison ja Pfurtscheller 2010, s. 9-10). Mentaalisilla strategioilla tarkoitetaan niitä menettelytapoja, joita käytetään tietynlaisten keskushermoston aktivaatiokuvioiden luotettavaan tuottamiseen. Erilaiset mentaaliset strategiat aktivoivat aivoja säännönmukaisesti eri tavoin ajan ja alueen suhteen tuottaen aivotoiminnan kuvioita, jotka näkyvät mittalaitteissa erilaisina signaaleina. Erilaisia mentaalisia strategioita ovat mm. liikkeiden kuviteltu suorittaminen, huomion kiinnittäminen tiettyyn ruudulla esiintyvään ärsykkeeseen tai käyttäjän välineellisen ehdollistamisen kautta oppima kyky tuottaa tiettyjä aivojen rytmejä (Ramadan ja Vasilakos 2017). Liikkeiden, kuten käsien tai jalkojen heiluttamisen, kuvittelemisen on sensorimotorisiin rytmeihin pohjaavissa aivo-tietokoneiliittymissä paljon käytetty mentaalinen strategia (Graumann, Allison ja Pfurtscheller 2010; Yuan ja He 2014).

Aivo-tietokoneiliittymän ohjaussignaalit voidaan määrittellä ennalta määrättyjen mentaalisten strategioiden aikaansaamiksi keskushermoston tunnetuiksi aktivaatiokuvioiksi, joita voidaan luotettavasti ja toistuvasti mitata mentaalisen strategian suorittamisen aikana, tai muutama ajan hetki sen jälkeen. Ohjaussignaalit muutetaan aivo-tietokoneiliittymässä signaalinkäsittelijän avulla sovellusohjelman ohjauskäskyiksi. Ohjaussignaali voidaan valita monella tapaa ja sen tyyppi riippuu aivojen mittaustavasta. Aivotoimintaa voidaan mitata vaih-

toehtoisilla tavoilla esimerkiksi tarkastelemalla veren virtausta aivoalueille (fMRI) tai aivosähköistä toimintaa (EEG) (Paavilainen 2016). Erilaisia mittaustapoja onkin käytetty aivotietokoneiliittymien signaalien lähteinä (McFarland ja Wolpaw 2017), joskin EEG:n käyttö on varsin yleistä suotuisten ominaisuuksiensa vuoksi. Mittaustavan ja ohjaussignaalin valinta vaikuttanevat olennaisesti järjestelmän suorituskykyyn ja käytettävyyteen mm. mittaustarkkuuteen liittyvien seikkojen ja ohjaussignaaleita aikaansaavan mentaalisen strategian muodon kautta. EEG:tä voidaan pitää mittaustavoista lupaavimpana käytännön elämää helpottavien aivo-tietokoneiliittymien kannalta: laitteisto on ei-invasiivinen, suhteellisen halpa ja helposti liikuteltavissa paikasta toiseen. EEG-pohjaisista aivotietokoneiliittymistä on olemassa suhteellisen paljon tutkimusta (Abiri ym. 2019). Toisaalta EEG-laitteisto on suhteellisen herkkä häiriölähteille, kuten luvussa 2 todettiin.

EEG-pohjaisissa aivo-tietokoneiliittymissä ohjaussignaalit ovat sähköisiä. Aivosähköisen toiminnan lajeja on useita, esim. sensorimotoriset rytmit ja erityyppiset tapahtumasidonnaiset herätepotentiaalit (esim. P300 ja SSVEP), joilla tarkoitetaan ulkoisen ärsykkeen aikaansaamia aivosähkökäyrän 'normaalitilan' poikkeamia (Ramadan ja Vasilakos 2017). Ohjaussignaalit ja mentaaliset strategiat voidaan siis valita monella tapaa. Mittaustavan valinnan jälkeen tulee aivotutkimuksen tarjoamien ennakkotietojen perusteella suunnitella mikä osa mitatusta signaalista välitetään eteenpäin aivo-tietokoneiliittymän ohjelmistolle. Ennakkotietoja tarvitaan mentaalisen strategian aikaansaaman signaalin tunnistamiseksi ja erotteluksi kohinasta.

Kuten aivojen rytmejä koskevassa luvussa aiemmin todettiin, voivat aivojen rytmit olla aivotoiminnan tai mentaalisten strategioiden käytön seurauksena syntyviä epifenomenaalisia sivutuotteita. Tämä tarkoittaisi, ettei rytmeillä olisi erityistä merkitystä hermosolujen tai aivojen toiminnan kannalta. Voidaan kuitenkin päätellä, että vaikka rytmit olisivatkin aivotoiminnan sivutuotteita, ei sivutuotteisuus välttämättä vaikuta rytmien käyttökelpoisuuteen aivo-tietokoneiliittymien ohjaussignaaleina, sillä rytmien tiedetään joka tapauksessa syntyvän tiettyjen aivotoimintojen, kuten liikkeen kuvittelun, seurauksena tai niiden kanssa samanaikaisesti esiintyvänä. Aivotutkimuksen tuottamiin ennakkotietoihin nojaten voidaankin siis päätellä, minkälaisia rytmejä aivotoiminnot saavat aikaan. Esimerkiksi sensorimotoristen mu- ja beta-rytmien tiedetään ilmenevän motoristen toimintojen yhteydessä, kuten lu-



vussa 2 esitettiin. Tiedon pohjalta voitaisiinkin luoda erilaisia mentaalisia strategioita, mikä saattaisi lisätä mahdollisten ohjaukskäskyjen lukumäärää tarjoten mahdollisuuden aivo-tietokoneliittymien monimuotoisempaan käyttöön.

### **3.2.1 Sensorimotoriset rytmit ohjaussignaaleina**

Luvussa 2 todettiin, että sensorimotorinen aivokuori tuottaa omanlaisiaan aivorytmejä mu-, beta- ja gamma-alueilla. Näiden sensorimotoristen rytmien todettiin syntyvän kuviteltujen liikesarjojen ja liikesarjojen suunnittelun yhteydessä. Rytmien esiintymisessä havaittiin vaihtelua erityyppisten liikkeiden kuvittelun aikana. Liikkeen tyyppi oli yhteydessä rytmin syntymiseen tietyllä aivoalueella ja rytmin tiettyyn taajuusalueeseen rajatun ajanjakson aikana. Selkeyttä saatiin myös sensorimotoristen rytmien mittaamiseen EEG:llä ja EEG:n menetelmällisiin heikkouksiin, kuten mittausalueen rajoittuminen matalien gamma-taajuuksien alueelle. Millerin (2010) tutkimuksissa liikkeiden kuvitteluun liittyvien gamma-alueen (76-100 Hz) oskillaatioiden havaittiin olevan somatotooppiselta järjestymiseltään tarkkarajaisempia kuin mu- tai beta-rytmien, mikä voisi tehdä niistä parempia ja tarkempia ohjaussignaaleita mu- ja beta-rytmeihin verrattuna. Ongelman gamma-rytmien käytölle muodostaa kuitenkin EEG-mittareiden kapeaksi todettu mittausalue, jonka aivo-tietokoneliittymien kannalta relevantti mittausalue rajoittuu Wolpawin ja Wolpawin (2012, s. 229) mukaan 5-40 Hz taajuusalueelle. Mu- ja beta-rytmien taajuusalueet käsittivät 8-13 Hz ja 10-30 Hz alueet, jotka sisältyvät EEG:n mittausalueeseen.

Sensorimotoristen rytmien on todettu olevan käyttökelpoisia ohjaussignaaleja EEG-pohjaisten aivo-tietokoneliittymien yhteydessä (Yuan ja He 2014; McFarland ja Wolpaw 2017; Jonathan R. Wolpaw ja Dennis J. McFarland 2004a; McFarland, Sarnacki ja Wolpaw 2010; Royer ym. 2010). Ohjaussignaaleja tuottavana mentaalisena strategiana voidaan käyttää esimerkiksi käsien ja jalkojen liikkeen tai erilaisten liikesarjojen suorittamisen kuvittelua, joka saa aikaan pääläellä sijaitsevan somatosensorisen aivokuoren tuottamien beta- ja mu-rytmien tapahtumasidonnaista desynkronisaatiota. Desynkronisaatio on somatotooppisesti järjestynyttä ja koska oikea ja vasen aivopuolisko ohjaavat kehon vastakkaisia puolia (Augustine 2017), voidaan esimerkiksi oikean ja vasemman käden liikkeiden aikaansaamat desynkronisaatiot helposti erotella toisistaan. Aivo-tietokoneliittymien ohjausstrategioita ja ohjaussig-

naalien valintaa suunniteltaessa tätä tietoa voidaan hyödyntää esim. seuraavasti: kun koehenkilö kuvittelee vasemman käden liikuttamista, voi tietokoneen kursori liikkua näytön vaakakselilla vasemman suuntaan. Jalan liikuttamisen kuvittelulla voitaisiin säätää kursorin sijaintia pystysuunnassa. Moni sensorimotoristen rytmien käyttöä aivo-tietokoneiliittymien ohjaussignaaleina käsittelevä tutkimus on tehty laboratorio-olosuhteissa (Yuan ja He 2014), joissa aivo-tietokoneiliittymien käyttöä ja aivosignaalien mittaussykyä häiritseviä muuttujia on mahdollista kontrolloida. Luonnollisissa ympäristöissä aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmän luotettava toimintakyky saattaa kohdata lisähaasteita, kun häiritsevien muuttujien määrä suurenee.

Sensorimotoristen rytmien käytettävyys ohjaussignaaleina näyttäisi määräytyvän rytmejä aiheuttavien toimintojen löytämisestä sekä rytmien somatotooppisen järjestyneisyyden tasosta. EEG:n mittaustarkkuudella ja signaaliin sisältyvällä kohinalla on myös väliä: mittausalueen ulkopuolisia tai elektrodeista liian kaukan syntyviä rytmejä ei voi mitata ja liikaa kohinaa sisältävästä signaalista on vaikeaa erotella tietyn ohjausstrategian aikaansaama ohjaussignaali. Tällöin ohjaussignaalia ei välttämättä tunnisteta, eikä aivo-tietokoneiliittymä kykene välittämään oikeanlaisia ohjauskäskyjä.

### **3.3 Laitteistot ja ohjelmistot**

Aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmä koostuu fyysisestä laitteistosta ja signaaleja käsittelevistä ohjelmistoista. Wilson, Gruger ja Schalk (2012) kuvaavat näitä rakennneosia seikkaperäisesti. Fyysisiä osia ovat sensorit, jotka mittaavat fysiologisia signaaleja ja muuttavat ne jännitteeksi. Koska mitattavat jännitteet voivat olla pieniä (esim. EEG:n tapauksessa 10-20 mikrovoltia), tulee mitattua signaalia vahvistaa häiriöttömällä vahvistimella. Vahvistettu signaali muutetaan digitaaliseen muotoon analogia-digitaalimuuntimella, jonka jälkeen se välitetään ohjelmistoa ajavalle tietokonelaitteistolle. Mitattavien signaalien taajuusalueita ja häiriöitä voidaan kontrolloida eriasteisilla taajuussuodattimilla, jotka voivat olla osana vahvistimen, A/D-muuntimen tai ohjelmiston rakennetta. Häiriöt aiheutuvat usein muusta biologisesta ja sähkömagneettisesta toiminnasta, kuten sydämen sykkeestä, kasvojen lihasten toiminnasta tai lähellä olevista virtajohdoista.

Tietokonelaitteiston ajaman ohjelmiston voidaan ajatella koostuvan neljästä modulaarisesta alajärjestelmästä (Gerwin Schalk ym. 2004; Wilson, Guger ja Schalk 2012; McFarland ja Wolpaw 2017). Datankerääjä vahvistaa, digitoi ja tallentaa fyysisen mittalaitteen välittämiä signaaleja valmistaen ne laskennallista analyysia varten. Signaalinkäsittelijä kaivaa signaalin merkitykselliset piirteet esiin laskennallisilla menetelmin ja kääntää piirrekokonaisuudet algoritmisesti laitteiston ohjauksikäskyiksi. Sovellusohjelma käyttää saamiaan ohjauksikäskyjä ulkoisen laitteen tai jonkin sovelluksen ohjaamiseksi ja antaa käyttäjälle palautetta järjestelmän suorituksesta. Toimintaprotokolla määrittelee järjestelmän mittauksien, analyysien ja ohjauksikäskyjen ajoitukset sekä hallinnoi toimenpiteiden vaiheita ja signaalinkäsittelijän matemaattisten mallien tai algoritmien parametrisointia, eli mitä vakioarvoja malleissa käytetään tai mitä piirteitä datasta erotellaan. Alajärjestelmät voivat kommunikoida keskenään esimerkiksi TCP/IP-protokollalla (G. Schalk ym. 2004). Ramadan ja Vasilakos (2017) esittelevät katsausartikkelissaan yleisiä ja kaikille avoimia ohjelmistoalustoja (esim. BCI2000 ja OpenVIBE), joiden avulla aivo-tietokoneiliittymän ohjelmistollisia osia voidaan toteuttaa. Alustoista löytyy valmiita työkaluja signaalinkäsittelyyn ja laskennalliseen analyysiin, ja valtaosa alustoista on toteutettu C++ tai Python-kielellä. Avoimet ohjelmistoalustat saattavat helpottaa järjestelmien toteuttamista ja yhdenmukaistaa tutkimusta.

Aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmät voivat olla invasiivisia tai ei-invasiivisia (Jonathan R Wolpaw ja Dennis J McFarland 2004b). Invasiivisissa ratkaisuisissa keskushermoston tuottama signaali mitataan suoraan aivojen sisältä tai kuorikerrokselta, mikä vaatii kirurgisia toimenpiteitä mittalaitteen asettamiseksi. Esimerkiksi sensoreita sisältävä implantti voitaisiin asettaa suoraan sensorimotorisen aivokuoren ylle mittaamaan näiden solujen toimintaa. Ei-invasiivisissa järjestelmissä signaaleja mitataan ulkoisesti asetettavilla mittalaitteilla, jotka eivät vaadi kirurgista asettamista, kuten päänahkaan asetettavilla elektrodeilla.

EEG:llä on lukuisia hyviä ominaisuuksia, joiden vuoksi sen käyttö aivo-tietokoneiliittymien pohjalla olevana mittaustapana on perusteltua. EEG on ei-invasiivisten aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmien yhteydessä eniten tutkittu ja käytetty mittaustapa (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 105): aiheeseen liittyvää tutkimusta löytyykin neljän vuosikymmenen takaa (McFarland ja Wolpaw 2017). Kiinnostus EEG-pohjaisiin järjestelmiin ei ole sattumaa, sillä EEG on muihin aivotutkimuksen välineisiin verrattuna halpa, ei-invasiivinen ja pitkään tutkittu tapa mita-

ta aivojen toimintaa. EEG-mittalaitteiston suhteellinen halpuus muihin mittalaitteisiin, kuten magneettikuvantamislaitteistoon, verrattuna mahdollistaa jopa kuluttajakäyttöön suunnattujen aivo-tietokoneliittymien toteuttamisen, esimerkiksi käyttämällä kuluttajaluokan Emotiv-mittalaitetta ja BCI2000-sovellusalustaa järjestelmän toteuttamisessa. Ei-invasiivisuutensa vuoksi laitteiston käyttöönotto on myös helppoa ja turvallista: vaativia kirurgisia leikkauksia ei tarvitse tehdä. Kuten tutkielman luvussa 2 todettiin, EEG:n ajallinen erottelukyky on erinomainen ja EEG:llä mitattavista aivorytmeistä on paljon tutkimustietoa. Hyvä ajallinen erottelukyky voinee sujuvoittaa järjestelmän käyttöä, sillä aivosignaalin nopea muuttuminen voisi vähentää ohjauksen viivettä. Lisäksi aivo-tietokoneliittymiä suunniteltaessa tulee olla käsitys siitä, minkälaista aivosignaalia halutaan käyttää ohjaussignaalina. Aivotutkimuksen tuottaman tiedon hyödyntäminen on aivo-tietokoneliittymien ohjauksen suunnittelussa ehdotonta, sillä se auttaa erottelemaan ohjaukseen käytettäviä aivotiloja, eli kuhunkin toimintaan liittyvää ajallista ja alueellista hermosolujoukkojen toimintaa, toisistaan. Aivoista mitattavat signaalit ovat kohinaisia, sisältävät monia eri lähteitä ja voivat liittyä monenlaisiin kognitiivisiin ja emotionaalisiin prosesseihin. Mentaalisten strategioiden tuottamia ohjaussignaaleja voidaan siis hyödyntää vain jos joitakin niiden ominaispiirteitä tunnetaan.

EEG:n tuottaman datan analysointiin on olemassa useita työkaluja signaalien suodattamiseen, piirteiden erotteluun ja eroteltujen piirteiden luokitteluun (Wolpaw ja Wolpaw 2012, s. 123-145; Lotte ym. 2018). Signaalinkäsittelyä suorittava alajärjestelmä koostuu näistä data-analyysiin käytettävistä matemaattisista malleista ja algoritmeista, joiden avulla piirteet erotellaan monimuotoisesta datasta ja luokitellaan ohjauksikäskyjä varten. Piirteet voidaan erotella jatkuvaluonteisesta EEG-datasta esim. jakamalla ne erillisiin luokkiin taajuusalueittain. Jako taajuusalueisiin voidaan tehdä esim. Fourier-muunnoksella, autoregressiivisellä taajuusanalyysillä tai pääkomponenttianalyysillä. Piirteiden luokitteluun voidaan käyttää lineaarisia tai epälineaarisia luokittimia, kuten tukivektorikoneita ja neuroverkkoja tai erilaisien luokittimien yhdistelmiä.

### **3.4 Toimintaprotokollat**

Mason, Allison ja Wolpaw (2012) määrittelevät aivo-tietokoneliittymän toimintaprotokollan säännöstönä, joka määrittää aivo-tietokoneliittymän eri osien toiminnan ja yhteispelin

käyttäjän ja ympäristön kanssa. Heidän mukaansa toimintaprotokolla koostuu neljästä perusosasta, jotka liittyvät aivo-tietokone-liittymän toiminnan käynnistämiseen, signaalinkäsittelijään kuuluvien algoritmien parametrisointiin, ohjaukaskäskyjen ja sovellusohjelman suoritamiin toimenpiteisiin sekä virhetilanteiden käsittelyyn. Toimintaprotokollat siis varmistavat ja hallinnoivat aivo-tietokone-liittymän osien yhteispeliä ja määrittävät miten ja milloin aivosignaali mitataan, käsitellään ja muutetaan ohjaukaskäskyksi.

Aivo-tietokone-liittymän voidaan sanoa käynnistyvän, kun järjestelmä alkaa aktiivisesti mitata käyttäjänsä aivotoimintaa. Käyttäjä voi tavoitteellisesti keskittyä aivo-tietokone-liittymän ohjaamiseen jotain mentaalista strategiaa käyttäen, jolloin puhutaan intentionaalisesta eli tarkoituksellisesta ohjaamisesta (engl. intentional control) (Graumann, Allison ja Pfurtscheller 2010, s. 3; Mason, Allison ja Wolpaw 2012). Sellaista tilaa, jossa käyttäjä ei tarkoituksellisesti ohjaa järjestelmää, kutsutaan tarkoituksettoman ohjauksen tilaksi (engl. no intentional control). Luvussa 2 todettiin, että aivoista mitattavat signaalit ovat alttiita häiriötekijöille ja että samanlaisia rytmejä voidaan havaita eri aivoalueilla eri aivotoimintoihin kytkeytyneinä. Aivo-tietokone-liittymien käytön kannalta on siis kyettävä erottelamaan milloin käyttäjä tarkoituksellisesti ohjaa järjestelmää sellaisesta tilasta, jossa ohjaustarkoitusta ei ole. Tätä varten toiminnan käynnistämiseen on esitetty kahta erilaista toimintaprotokollaa: synkronista ja asynkronista protokollaa (Graumann, Allison ja Pfurtscheller 2010; Mason, Allison ja Wolpaw 2012).

Synkronisessa protokollassa järjestelmän tekemä aivotoiminnan mittaus rajoittuu rajattuihin 'aikaikkunoihin', joiden aikana mittaus ja ohjaus tapahtuu. Aikaikkunaa voi edeltää jokin merkki, joka viestii mittauksen alkamisesta. Järjestelmä olettaa, että käyttäjällä on intentio ohjata laitteistoa aivosignaaleitaan käyttäen aikaikkunan auettua, jolloin tarkoituksettoman ohjauksen ongelma vältetään. Synkronisen protokollan 'aikaikkunapohjainen' toeutustapa tuottaa kuitenkin omanlaisiaan ongelmia. Järjestelmää ei voi ohjata aikaikkunan ollessa sulkeutuneena ja toisaalta järjestelmä olettaa ohjaussignaalin tulevan aikaikkunan ollessa auki, mikä voi saada aikaan tarkoituksettomien ohjaussignaalien lähettämistä.

Asynkronisessa protokollassa käyttäjän aivotoimintaa mitataan jatkuvasti. Tällöin aivo-tietokone-liittymän käyttö voisi olla luonnollisempaa, sillä järjestelmä on valmiina vastaanottamaan ohjaussignaaleja tilanteessa kuin tilanteessa, jolloin käyttäjän ei tarvitsisi odottaa erillisen

aikaikkunan aukeamista järjestelmän ohjaamiseksi. Asynkronisen protokollan aikaikkunattomuus on kuitenkin myös sen heikkous: tarkoituksettomia ohjaussignaaleja voidaan lähettää paljon herkemmin kuin synkronisessa protokollassa. Tähän ongelmaan voitaisiin kenties vastata kehittämällä mittauksen tai signaalinkäsittelyn menetelmiä, joilla aivoaktivaatiokuvia ja aivotiloja voitaisiin tarkemmin erotella toisistaan.

Signaalinkäsittelijän parametrisoinnilla tarkoitetaan ohjaussignaalin piirteiden erottelussa ja ohjauksen kannalta merkityksellisten piirteiden luokittelussa käytettävien matemaattisten mallien ja algoritmien muuttujien arvojen määrittämistä. Parametrit voidaan määrittellä ennen käyttöä tai ne voivat määräytyä käytön aikana automaattisesti (Mason, Allison ja Wolpaw 2012). Kun parametrit määritellään ennen käyttöä, mentaalisen strategian aikaansaama aivotoiminta mitataan ja opetetaan luokittelijalle, joka lopulta muuttaa ohjaussignaalit ohjauksikäskyiksi järjestelmän varsinaisen käytön aikana. Adaptiivisiksi menetelmiksi kutsutaan niitä aivo-tietokoneiliittymien yhteydessä käytettyjä malleja ja algoritmeja, jotka kykenevät itsenäisesti määrittämään parametrit käytön aikana. Adaptiivinen parametrisointi auttaa järjestelmää mukautumaan käyttäjänsä tuottamien aivorytmien ohjauksen kannalta oleellisiin piirteisiin (Jonathan R Wolpaw ja Dennis J McFarland 2004b). Esimerkiksi Wolpawin ja McFarlandin (2004) tutkimuksessaan käyttämä adaptiivinen algoritmi päivitti automaattisesti ja jatkuvasti ohjaukseen käytettäville piirteille asetettuja painoarvoja niiden merkityksen mukaan.

Ohjaussignaaleista kaivetut piirteet luokitellaan ja välitetään sovellusohjelmalle, joka tulkitsee luokitellut piirteet ohjauksikäskyiksi. Ohjaukskäskyjensä avulla sovellusohjelma käynnistää ja ohjaa ulkoisen sovelluslaitteiston toimintaa. Sovellusohjelmat voivat toimia prosessi- tai tavoitesuuntautuneen (engl. process-oriented, goal-oriented) protokollan mukaisesti (Graimann, Allison ja Pfurtscheller 2010; Mason, Allison ja Wolpaw 2012). Tavoitesuuntautuneesti rakennetuissa sovellusohjelmissa erilaiset ohjaukskäskyt käynnistävät erilaisia "skriptinkaltaisia" valmiiksi määriteltyjä komentosarjoja, jotka suorittavat kaikki tietyn tavoitteen saavuttamiseen liittyvät välivaiheet. Esimerkiksi oikean käden liikkeen kuvittelemisen aiheuttama aivoaktivaatiokuva voisi saada aikaan ohjaukskäskyn, joka aloittaa tv-kanavan vaihtamiseen tarvittavat välivaiheet sisältävän komentosarjan. Käyttäjän ei tarvitsisi ohjata tv-kanavan vaihtamista välivaihe-välivaiheelta niin, että ensin avataan kanavalikko, jonka jäl-

keen jonkin sortin osoitin tulisi kohdistaa halutun kanavan päälle ja lopuksi vielä lähettää käsky kanavavalinnan hyväksymiseksi. Prosessisuuntautuneesti rakennetuissa sovellusohjelmissä käyttäjän tulee suorittaa välivaiheet itse: aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmän välittämät ohjauskäskyt ovat yksittäisiä askeleita, joita koostamalla monimutkaisempia toimintoja voidaan suorittaa. Esimerkiksi tietokoneen kursorin ohjaaminen näytöllä voisi tapahtua peräkkäisiä pieniä liikkeitä yhdistämällä.

Lotten ja ym. (2018) mukaan EEG-pohjaisten aivo-tietokoneiliittymien käyttöönotossa on kaksi erillistä vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa signaalin luokitusalgoritmi opetetaan tunnistamaan ja optimoimaan yksittäisen käyttäjän aivorytmien toiminnalliset piirteet ja piirteiden lähteet käyttäjältä ennakkoon mitatusta EEG-datasta. Luokitusalgoritmin opetuksessa käytetyn EEG-datan tulee olla peräisin ajanjaksolta, jolloin käyttäjä toteuttaa jotakin mentaalista strategiaa. Toisessa operationaalisessa vaiheessa järjestelmä mittaa ja tunnistaa käyttäjän aivoaktivaation säännönmukaisuuksia kääntäen ne ohjelmiston alajärjestelmien kautta sovelluksen toimintakäskyiksi reaaliajassa.

Toimintaprotokollan perusosasten voidaankin siis ajatella määrittävän aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmän automaation taso, joka voi koostua siitä kuinka monta välivaihetta voidaan suorittaa käyttäjän yksittäistä ohjauskäskyä kohden, kuinka paljon vaivaa tulee nähdä signaalinkäsittelijän päivittämiseksi ja kuinka paljon tulee kiinnittää huomiota synkronisen protokollan aikaikunan oikea-aikaiseen aktivoitumiseen. Tällöin asynkroninen ja tavoitesuuntautunut aivo-tietokoneiliittymän toimintaprotokolla, joka määrittää parametrinsa automaattisesti käytön aikana, edustaisi automaattisinta ja siten vaivattominta aivo-tietokoneiliittymän muotoa. Vastaavasti synkroninen ja prosessisuuntautunut toimintaprotokolla, jonka parametrit määritellään ennen käyttöä, edustaisi vähiten automaattista aivo-tietokoneiliittymää, mikä voisi vaatia käyttäjältä enemmän parametrien säätämistä ja vaivannäköä käytön suhteen. Toisaalta on hyvä huomata, että järjestelmän käytön automaation tason merkityksellisyys riippuneen aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmällä ohjattavan sovellusohjelman luonteesta. Esimerkiksi kuvioiden vapaan piirtämisen hallinnassa prosessorientoitunut toimintaprotokolla tarjoaa suuremman vapauden kuvioiden piirtämisessä. Sen sijaan tavoitesuuntautunut protokolla voi pyörätuolia ohjatessa olla mielekkäämpi: jokaista pyörän pyörähdystä ei tarvitsisi ohjata erikseen.

## **4 Tietokoneen kursorin moniulotteinen ohjaaminen**

### **EEG-pohjaisella aivo-tietokoneliittymällä**

Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkiä onnistuneesta moniulotteiseen ohjaukseen kykenevän aivo-tietokoneliittymän kokeesta tutkimusympäristössä. McFarlandin, Sarnackin ja Wolpawin (2010) tutkimusryhmä toteutti aiempien tutkimustensa pohjalta EEG:llä mitattaviin sensorimotorisiin rytmeihin pohjautuvan aivotietokoneliittymän, jolla tutkimukseen osallistuneet koehenkilöt (n=4) oppivat liikuttamaan tietokoneen kursoria kolmiulotteisessa virtuaaliympäristössä. Aluksi esitellään tapauksen tutkimusasetelma, jonka jälkeen siinä käytettyä aivo-tietokoneliittymää kuvataan luvun 3 käsitteillä. Lopuksi pohditaan tutkimuksen merkitystä.

#### **4.1 Tutkimuksen aivo-tietokoneliittymä**

Tutkimuksen aivo-tietokoneliittymän ohjauksen mentaalisenä strategiana käytettiin liikkeen kuvittelua ja ohjaussignaaleina sensorimotorisia rytmejä, joiden laatu tiedettiin aiemman tutkimuksen (Jonathan R Wolpaw ja Dennis J McFarland 2004b) perusteella. Mittalaitteistona toimi ei-invasiivinen 64-kanavainen EEG-mittari, joka keräsi dataa koehenkilöiden pääläelle asetetuista 64-elektrodista. Ohjelmistona toimi BCI200-alusta, joka sisälsi signaalinkäsittelijän (Laplace-muunnos ja autoregressiivinen malli) ja luokittelijan (lineaariset yhtälöt). Toimintaprotokollien näkökulmasta tutkimuksessa toteutetun aivo-tietokoneliittymän signaalinkäsittelijän parametrisointi tapahtui automaattisesti harjoittelusessioiden aikana ja järjestelmän toiminta käynnistyi asynkronisesti, kun taas tietokoneen kursorin liike tapahtui prosessorientoituneesti.

#### **4.2 Tutkimusasetelma**

Tutkimus (McFarland, Sarnacki ja Wolpaw 2010) suoritettiin kontrolloiduissa laboratorioolosuhteissa, joissa mahdollisia EEG: häiriölähteitä voitiin ottaa huomioon. Kokeen aikana koehenkilöille puettiin 64-elektrodia sisältävä myssy ja he istuivat nojatuolissa liikkumat-



ta kuvaruutua katsoen. Koehenkilöt kävivät lävitse useita opetusistuntoja, joiden aikana he opettelivat ohjaamaan kursoria aluksi jokaista ulottuvuutta (horisontaalinen, vertikaalinen ja syvyysuntainen) kohden erikseen, minkä jälkeen siirryttiin asteittain moniulotteisempaan ohjaukseen. Koehenkilöitä pyydettiin käyttämään mentaalisen strategianaan vasemman käden, oikean käden tai jalan liikkeiden kuvittelua. Mentaaliset strategiat tuottivat mu- ja beta-alueen sensorimotorisia rytmejä, joita käytettiin ohjaussignaaleja. Opetusistuntojen aikana koehenkilöiden tehtävänä oli ohjata tietokoneen kursori rajatulle alueelle tietokoneen ruudulla tietyn ajan sisällä. Alueet vaihtelivat kokeiden aikana ja pienenivät harjoittelun myötä, jolloin ohjauksen tuli käydä tarkemmaksi. Opetusistuntoja jatkettiin, kunnes ohjaus ei enää merkittävästi parantunut. Kokonaisuudessaan tämän ohjaustason saavuttamiseen kului ajallisesti noin 12,5-23,5 tuntia harjoittelua koehenkilöstä riippuen.

Opetusistuntojen jälkeen suoritettiin varsinainen koe, jossa koehenkilöt ohjasivat tietokoneen kursoria kolmessa ulottuvuudessa. Kokeessa tietokoneen kursori asetettiin kolmiulotteisen virtuaaliympäristön keskelle, josta kursori tuli 15 sekunnin kuluessa ohjata virtuaaliympäristön kulmaan ilmestyvälle rajatuille alueelle. Rajatun alueen sijainti vaihteli kokeesta toiseen. Koehenkilöiden välillä oli selviä eroja kursorin hallinnassa: koehenkilöiden suoriutuminen hyväksytysti kaikista kokeista vaihteli 56-94 prosenttiin tutkittavasta riippuen.

Koehenkilöiden tuottamat sensorimotorisiin rytmeihin pohjautuvat ohjaussignaalit mitattiin sensorimotorisen aivokuoren ylle asetetuilla elektrodeilla. Tutkijat käyttivät Laplace-muunnokseen perustuvaa suodatinta EEG-signaalien paikalliseen erotteluun poissulkeakseen muualta aivoista tai ympäristöstä tulevat signaalien virhelähteet ja erotellakseen kolmeen eri ulottuvuuteen liittyvät ohjaussignaalit toisistaan. Suodatetusta signaalista eroteltiin taajuuksia autoregressiivisellä mallilla. Erotelluista taajuuksista valittiin piirteitä 10-31 hertsin taajuusalueelta 3 hertsin välein. Piirteistä koostettiin muuttujia, joita käytettiin tietokoneen kursoria ohjaavissa lineaarisissa yhtälöissä ja jokaista kursorin liikkeen ulottuvuutta vastasi yksi lineaarinen yhtälö. Lineaaristen yhtälöiden osana oleville koostetuille piirremuuttujille asetettiin painoarvot, joita muokattiin automaattisesti jokaisen aivo-tietokoneliittymän harjoituskäytön jälkeen pienimmän neliösumman (LMS) algoritmilla. Lineaariset yhtälöt tekivät ennusteita kursorin sijainnista näytöllä pohjautuen koehenkilön tuottamiin sensorimotorisista rytmeistä kaivettuihin piirteisiin. Tutkimuksessa sensorimotoriesen aivokuoren alueet, joilta ohjaussig-

naalirytmijä mitattiin, kaventuivat tutkimuksen edetessä harjoittelun ja signaalinkäsittelijän optimoitumisen myötä. Eri liikesuuntia ohjaavien rytmien todettiin syntyvän eri aivokuoren alueilta.

### **4.3 Pohdintoja tutkimuksen tuloksista**

McFarlandin, Sarnackin ja Wolpawin (2010) tutkimuksessa osoitettiin, että moniulotteinen ohjaus ei-invasiivisella sensorimotorisiin rytmeihin ja EEG:hen pohjautuvalla aivo-tietokoneiliittymällä on mahdollista. Heidän tutkimuksensa mukaan koehenkilöt oppivat hallitsemaan tuottamia sensorimotorisia rytmejä ja käyttämään niitä tehokkaammin aivo-tietokoneiliittymän ohjauksessa. Ohjauksen hallinta parani koehenkilön suorittaman harjoittelun ja aivo-tietokoneiliittymän automaattisen parametrisoinnin myötä, mikä sai aikaan sensorimotoristen rytmien mittausalueen tarkentumisen. Harjoittelun myötä tietoisesta kuvittelusta osuus ohjauksen yhteydessä vaikutti häviävän, eli ohjauksesta tuli automaattisempaa ja vaivattomampaa. Mentaalisen strategian käyttö ohjaussignaalien tuottamiseksi menetti siis merkitystään harjoittelun myötä.

Tutkimuksen pohdintaosiossa annettiin myös viitteitä siitä, että liikkeen hallinta ei tapahdu yksin tarkasti lokalisoituneella primäärisen liikeaivokuoren alueella aivoissa, vaan että liikkeen hallintaan osallistuu myös muita aivokuoren eri osiin levittäytyneitä hermoverkkoja mm. etuoslohkossa ja esimotorisilla alueilla. Tutkijoiden mukaan aivo-tietokoneiliittymän ohjaustarkkuutta voitaisiin luultavasti parantaa päästämällä läpi signaaleja myös muilta liikkeen toteutukseen ja suunnitteluun osallistuvilta aivoalueilta. Tutkijoiden havaintoja näyttäisi tukevan luvussa 2 esiin tulleet tiedot sensorimotorisen aivokuoren eri osien vastaamista toiminnoista.

Tutkimuksessa kursoria pystyttiin ohjaamaan kuuteen erilliseen suuntaan kolmiulotteisessa virtuaaliympäristössä. Tutkimuksessa esiteltyä ohjausstrategiaa voitaisiin soveltaa myös muuntyyppisiin sovelluksiin, jolloin aivo-tietokoneiliittymällä voitaisiin erotella kuusi erilaista ohjauskäskyä, joilla sovellusohjelma voi saada aikaan sovelluslaitteen toimenpiteitä. Eroteltavien ohjauskäskyjen määrän lisääntyminen voisi tehdä aivo-tietokoneiliittymästä monipuolisen käyttöliittymän esim. tietokoneen tai television ohjaamiseen. Artikkelissa tode-

taan, että jatkotutkimuksien myötä vastaavalla menetelmällä voitaisiin halvaantuneille palauttaa liikkeidensä hallinta (McFarland, Sarnacki ja Wolpaw 2010), esimerkiksi moottoroidun pyörätuolin ohjaamisessa.

Yhdistämällä McFarlandin, Sarnackin ja Wolpawin (2010) tutkimuksessa esitettyä koeasetelmaa ja opetusistuntoja sekä luvussa 3 todettua aivo-tietokoneiliittymän ohjelmiston modulaarisuutta, voitaisiin toteuttaa muitakin kuin kursoria hallinnoivia aivo-tietokoneiliittymäohjaimia. Luvussa 3 aivo-tietokoneiliittymän ohjelmiston todettiin voivan koostua neljästä modulaarisesta alajärjestelmästä. Erillisiä alajärjestelmiä olivat signaalinkäsittelijä ja sovellusohjelma, eli aivoista saatavia signaaleja suodattava ja piirteitä luokitteleva järjestelmä sekä ulkoista laitetta ohjaava sovellusohjelma. Koska järjestelmät ovat erillisiä, voitaisiin tutkimusasetelmassa esitellyn tavan mukaisesti opettaa henkilöitä käyttämään aivo-tietokoneiliittymää. Kun ohjaus on saatu riittävän tarkaksi, voitaisiin sovellusohjelma kenties vaihtaa kursoriliikkeestä jonkin toisen sovelluksen ohjaamiseen. Samoja ohjaussignaaleja voitaisiin mahdollisesti käyttää useamman sovellusohjelman ohjaamiseksi.

## 5 Yhteenveto

Tutkielmassa saatiin selkoa aivo-tietokoneiliittymäjärjestelmän keskeisiin osiin ja käsitteisiin aiemman tutkimuskirjallisuuden pohjalta. Aivo-tietokoneiliittymä määriteltiin keskushermoston signaaleja mittaavana järjestelmänä, joka mitattujen signaalien perusteella välittää ohjaukskäskyjä sovellusohjelman kautta ulkoisille laitteille. Järjestelmän keskeisiä osia olivat mittalaitteet, signaaleja käsittelevä ja tulkitseva ohjelmisto sekä ohjaukskäskyjä ulkoisille laitteille välittävä sovellusohjelma. Tutkielmassa määriteltiin myös eräs keskushermoston tuottama signaalityyppi, sensorimotoriset rytmit, joiden toimintaa tarkasteltiin aivo-tietokoneiliittymien yhteydessä. Sensorimotoristen rytmien mittaamista aivosähkökäyrällä (EEG) käytiin lyhyesti läpi. Lopuksi tarkasteltiin miten McFarlandin, Sarnackin ja Wolpawin (2010) tutkimuksessa EEG:llä mitattuihin sensorimotorisiin rytmeihin perustuvalla aivo-tietokoneiliittymällä toteutettiin tietokoneen kursorin moniulotteinen ohjaus. Enemmän tai vähemmän käyttökelpoisen aivo-tietokoneiliittymän toteutus on mahdollista kun mittalaitteena käytetään EEG:tä ja ohjaussignaaleina sensorimotorisia rytmejä.

Kirjallisuuskatsauksen aikana kävi selväksi aivo-tietokoneiliittymien toteutukseen ja käyttöön liittyviä tekijöitä, joista osa oli rajoittavia. Aivo-tietokoneiliittymien toteuttaminen näyttäisi vaativan ennakkotietoja aivojen tiedonkäsittelystä, jotta voitaisiin luoda tarkoituksenmukainen ja toimiva mentaalinen strategia järjestelmän ohjaamiseksi, ja aivojen mittaustavoista, joilla mentaalisten strategioiden aikaansaamat ohjaussignaalit voidaan välittää signaalinkäsittelijälle ohjaukskäskyjen muodostamista varten. Myös tekniset seikat on otettava huomioon järjestelmän toiminnassa: mittalaitteen laatu ja tarkkuus sekä signaalien käsittelyssä ja luokittelussa käytettävien algoritmien ja matemaattisten mallien valinta vaikuttavat järjestelmän toimintanopeuteen, ohjauksen tarkkuuteen ja käytettävyyteen. Esimerkiksi EEG-laitteen mitta-alueen rajoittuminen matalien taajuuksien mu- ja beta-rytmeihin voi rajoittaa potentiaalisesti käyttökelpoisten ohjaussignaalien määrää ja heikentää ohjaustarkkuutta: korkeataajuuksiset rytmit gamma-alueelta voisivat, ainakin Millerin (2010) tutkimukseen nojaten, toimia parempina ohjaussignaaleina tarkemman somatotooppisen järjestymisensä vuoksi mu- ja beta-rytmeihin verrattuna, mikäli niitä voitaisiin EEG:n avulla paremmin mitata.

Katsauksessa kävi ilmi, että monet aivo-tietokoneiliittymät on toteutettu hyvin kontrolloiduissa ympäristöissä (LaFleur ym. 2013; Yuan ja He 2014). Laboratorio-olosuhteissa aivoista mitattavaa signaalia häiritsevät tekijät, kuten EEG:n tapauksessa lihastoiminnan aiheuttama sähköinen toiminta tai ympäristössä sijaitsevat sähkölaitteet, voidaan sulkea pois, jolloin aivo-tietokoneiliittymän käyttöympäristö on arkielämään verrattuna varsin keinotekoinen. Vaikka joitain tutkimuksia aivo-tietokoneiliittymien käytöstä laboratorio-olosuhteiden ulkopuolella on tehty (Wolpaw ym. 2018), voisi nyky menetelmillä toteutettavissa olevien aivo-tietokoneiliittymien käyttökelpoisuutta testata luonnollisemmissa ympäristöissä mahdollisten kehityskohteiden löytämiseksi. Jatkotutkimuksia vaatii myös McFarlandin, Sarnackin ja Wolpawin (2010) tutkimuksessa esiintynyt havainto aivo-tietokoneiliittymän käytön oppimiseen liittyvistä suurista eroista koehenkilöiden välillä.

Kaikkiaan kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan päätellä, että EEG-mitatut sensorimotoriset rytmit ovat käyttökelpoisia aivo-tietokoneiliittymien ohjaussignaaleja, ainakin tiettyyn ohjaustarkkuuteen asti. Aivorytmien mahdollinen 'sivutuotteisuus' ei näytä vaikuttavan rytmien käyttökelpoisuuteen ohjaussignaaleina, sillä rytmit joko ovat yhteydessä tai kumpuavat tietyistä aivotoiminnoista. Luvussa 4 esitetyn tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että ohjaustarkkuutta voitaisiin parantaa selvittämällä minkälaisia laajalle levittäytyneitä hermoverkostoja mentaaliset strategiat aktivoivat ja rajoittamalla mittaus mahdollisuuksien mukaan mentaalisen strategian yhteydessä aktivoituville aivoalueille. Lisäksi aivo-tietokoneiliittymän ohjelmiston modulaarisuus saattaisi mahdollistaa samojen mentaalisten strategioiden käyttämisen eri sovellusohjelmien ohjaamiseksi.

## Lähteet

Abiri, Reza, Soheil Borhani, Eric W Sellers, Yang Jiang ja Xiaopeng Zhao. 2019. “A comprehensive review of EEG-based brain–computer interface paradigms”. *Journal of neural engineering* 16 (1): 011001.

Augustine, J. R. 2017. *Human neuroanatomy (Second edition.)* Hoboken, New Jersey: Wiley Blackwell.

Buzsáki, György. 2006. *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press.

Buzsáki, György, ja Andreas Draguhn. 2004. “Neuronal Oscillations in Cortical Networks”. *Science* 304 (5679): 1926–1929. ISSN: 0036-8075. doi:10.1126/science.1099745. eprint: <https://science.sciencemag.org/content/304/5679/1926.full.pdf>. <https://science.sciencemag.org/content/304/5679/1926>.

Cheyne, Douglas Owen. 2013. “MEG studies of sensorimotor rhythms: a review”. *Experimental neurology* 245:27–39.

Davis, Nick J, Simon P Tomlinson ja Helen M Morgan. 2012. “The role of beta-frequency neural oscillations in motor control”. *Journal of Neuroscience* 32 (2): 403–404.

Engel, Andreas K, ja Pascal Fries. 2010. “Beta-band oscillations—signalling the status quo?”. *Current opinion in neurobiology* 20 (2): 156–165.

Graimann, Bernhard, Brendan Z Allison ja Gert Pfurtscheller. 2010. *Brain-computer interfaces: Revolutionizing human-computer interaction*. Springer Science & Business Media.

Güntekin, Bahar, ja Erol Başar. 2016. “Review of evoked and event-related delta responses in the human brain”. *International Journal of Psychophysiology* 103:43–52.

Herrmann, Christoph S, Daniel Strüber, Randolph F Helfrich ja Andreas K Engel. 2016. “EEG oscillations: from correlation to causality”. *International Journal of Psychophysiology* 103:12–21.

Herweg, Nora A, Ethan A Solomon ja Michael J Kahana. 2020. “Theta Oscillations in Human Memory”. *Trends in Cognitive Sciences*.

- Jackson, Alice F, ja Donald J Bolger. 2014. “The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: A review for the rest of us”. *Psychophysiology* 51 (11): 1061–1071.
- Jehkonen, Mervi, Tiia Saunamäki, Liisa Paavola ja Juhani Vilkki. 2015. *Kliininen neuropsykologia*. Helsinki: Duodecim.
- Jurkiewicz, Michael T, William C Gaetz, Andreea C Bostan ja Douglas Cheyne. 2006. “Post-movement beta rebound is generated in motor cortex: evidence from neuromagnetic recordings”. *Neuroimage* 32 (3): 1281–1289.
- LaFleur, Karl, Kaitlin Cassady, Alexander Doud, Kaleb Shades, Eitan Rogin ja Bin He. 2013. “Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain–computer interface”. *Journal of neural engineering* 10 (4): 046003.
- Lotte, Fabien, Laurent Bougrain, Andrzej Cichocki, Maureen Clerc, Marco Congedo, Alain Rakotomamonjy ja Florian Yger. 2018. “A review of classification algorithms for EEG-based brain–computer interfaces: a 10 year update”. *Journal of neural engineering* 15 (3): 031005.
- Maskeliunas, Rytis, Robertas Damasevicius, Ignas Martisius ja Mindaugas Vasiljevas. 2016. “Consumer-grade EEG devices: are they usable for control tasks?” *PeerJ* 4:e1746.
- Mason, Steven G, Brendan Z Allison ja Jonathan R Wolpaw. 2012. “10| BCI Operating Protocols”. *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*: 189.
- McFarland, Dennis J, William A Sarnacki ja Jonathan R Wolpaw. 2010. “Electroencephalographic (EEG) control of three-dimensional movement”. *Journal of Neural Engineering* 7, numero 3 (toukokuu): 036007. doi:10.1088/1741-2560/7/3/036007. <https://doi.org/10.1088%2F1741-2560%2F7%2F3%2F036007>.
- McFarland, DJ, ja JR Wolpaw. 2017. “EEG-based brain–computer interfaces”. *current opinion in Biomedical Engineering* 4:194–200.
- Miller, Kai J, Gerwin Schalk, Eberhard E Fetz, Marcel den Nijs, Jeffrey G Ojemann ja Rajesh PN Rao. 2010. “Cortical activity during motor execution, motor imagery, and imagery-based online feedback”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (9): 4430–4435.
- Paavilainen, Petri. 2016. *Toimivat aivot: kognitiivisen neurotieteen perusteita*. Edita.

- Pfurtscheller, Gert, ja FH Lopes Da Silva. 1999. “Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles”. *Clinical neurophysiology* 110 (11): 1842–1857.
- Ramadan, Rabie A, ja Athanasios V Vasilakos. 2017. “Brain computer interface: control signals review”. *Neurocomputing* 223:26–44.
- Ratti, Elena, Shani Waninger, Chris Berka, Giulio Ruffini ja Ajay Verma. 2017. “Comparison of Medical and Consumer Wireless EEG Systems for Use in Clinical Trials”. *Frontiers in Human Neuroscience* 11:398. ISSN: 1662-5161. doi:10.3389/fnhum.2017.00398. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2017.00398>.
- Revonsuo, Antti. 2017. *Foundations of Consciousness*. Routledge.
- Royer, A. S., A. J. Doud, M. L. Rose ja B. He. 2010. “EEG Control of a Virtual Helicopter in 3-Dimensional Space Using Intelligent Control Strategies”. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 18, numero 6 (joulukuu): 581–589. ISSN: 1558-0210. doi:10.1109/TNSRE.2010.2077654.
- Schalk, G., D. J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer ja J. R. Wolpaw. 2004. “BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system”. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 51 (6): 1034–1043.
- Schalk, Gerwin, Dennis J McFarland, Thilo Hinterberger, Niels Birbaumer ja Jonathan R Wolpaw. 2004. “BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system”. *IEEE Transactions on biomedical engineering* 51 (6): 1034–1043.
- Sellers, Eric W, Theresa M Vaughan ja Jonathan R Wolpaw. 2010. “A brain-computer interface for long-term independent home use”. *Amyotrophic lateral sclerosis* 11 (5): 449–455.
- Shanechi, Maryam M. 2019. “Brain–machine interfaces from motor to mood”. *Nature neuroscience* 22 (10): 1554–1564.
- Uhlhaas, Peter J, Frédéric Roux, Eugenio Rodriguez, Anna Rotarska-Jagiela ja Wolf Singer. 2010. “Neural synchrony and the development of cortical networks”. *Trends in cognitive sciences* 14 (2): 72–80.
- Wilson, J Adam, Christoph Guger ja Gerwin Schalk. 2012. “BCI hardware and software”. *Brain-computer interfaces: principles and practice*: 165–188.



Wolpaw, Jonathan R., Richard S. Bedlack, Domenic J. Reda, Robert J. Ringer, Patricia G. Banks, Theresa M. Vaughan, Susan M. Heckman ym. 2018. “Independent home use of a brain-computer interface by people with amyotrophic lateral sclerosis”. *Neurology* 91 (3): e258–e267. ISSN: 0028-3878. doi:10.1212/WNL.0000000000005812. eprint: <http://n.neurology.org/content/91/3/e258.full.pdf>. <https://n.neurology.org/content/91/3/e258>.

Wolpaw, Jonathan R., ja Dennis J. McFarland. 2004a. “Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101 (51): 17849–17854. ISSN: 0027-8424. doi:10.1073/pnas.0403504101. eprint: <https://www.pnas.org/content/101/51/17849.full.pdf>. <https://www.pnas.org/content/101/51/17849>.

———. 2004b. “Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans”. *Proceedings of the national academy of sciences* 101 (51): 17849–17854.

Wolpaw, Jonathan, ja Elizabeth Winter Wolpaw. 2012. *Brain-computer interfaces: principles and practice*. OUP USA.

Yuan, H, ja B He. 2014. “Brain–Computer Interfaces Using Sensorimotor Rhythms: Current State and Future Perspectives”. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 61, numero 5 (toukokuu): 1425–1435. ISSN: 1558-2531. doi:10.1109/TBME.2014.2312397.